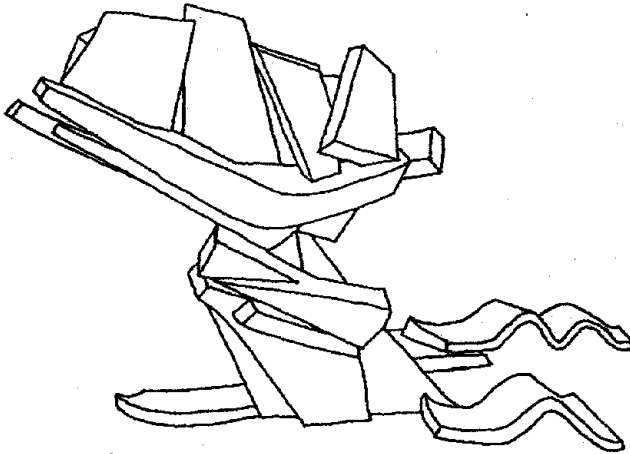
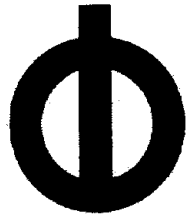


Dansk Betonforening



Dansk Betondag 1996

Publikation nr.

45

Forside illustration:

Noahs Ark

af den israelske kunstner

Rolf Roda Reilinger

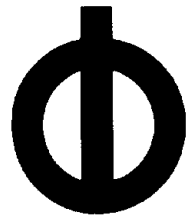
I 1976 lod Aalborg Kommunes kunsthøjråd denne godt 30 ton tunge skulptur opføre, som det første kunsthøjværk i Aalborg, der er udført af jernbeton.

Skulpturen symboliserer menneskets redning efter anden verdenskrigs ragnarok, et emne, der ligger kunstneren stærkt på sinde. Således har han også i Jerusalem på Denmarks Square opført en anden skulptur, hvor inspirationskilden er de danske fiskerbåde, der under krigen bragte mange jøder til friheden.

Noahs Ark er som nævnt af jernbeton. Entreprenørfirmaet Bach & Egmose opførte den af præfabrikerede elementer, der blev støbt på elementfabrikken Elcobyg i Hobro. Hovedarmeringen i elementerne er af almindeligt blødt stål, men samplingsbeslagene er udført af rustfast stål. Efter montagen er udspæringerne, hvori samplingsbeslagene er anbragt, blevet udstøbt, således at man får et monolitisk indtryk af skulpturen.

Kunstneren bearbejdede selv formsiderne og for at få det tydeligste aftryk af disse flader, blev betonen proportioneret som en flydebeton med det dengang ret nye superplast. Desuden er der anvendt de kunstigt fremstillede Synopalsten for at få så hvid en beton som muligt.

Dansk Betonforening



Dansk Betondag 1996

Publikation nr. **45**

Denne publikation indeholder indlæggene fra

Dansk Betondag 1996

Der blev afholdt den 12. september 1996
på Scandic Hotel, Aalborg

Forside-illustration:

- se inderside af omslag.

Publikationen er udgivet af:

Dansk Betonforening
c/o Ingeniørforeningen i Danmark
Vester Farimagsgade 29
1780 København V
Tlf.: 33 15 65 65 - Fax 33 15 37 07

Mette Geiker:

Forord 5

Jesper Sand Damtoft:

Cement år 2025 7

Curt Arne Carlsson:

Varför inte slagcement? 19

P. Freiesleben Hansen:

En ny betonprofessors visioner 29

Per H. Villadsen:

Monolitisk elementbyggeri 45

Svend Röttig:

Brandpåvirkede betonkonstruktioners bæreevne 55

Chr. Munch-Petersen:

Kalibrering af måleudstyr i betonelement-,
betonvare- og fabriksbetonproduktion 93

Ervin Poulsen:

Typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering 109

Peter Lundhus:

Øresundkonsortiets strategier 131

Jens Vejlbj Thomsen:

Limfjordstunnelen - 30 års sænketunnelerfaringer 139

Forord

Den stigende internationalisering og den øgede fokus på miljøaspekter påvirker bygge- og anlægsbranchen i væsentlig grad.

Dette har sammen med det seneste store anlægsprojekt, Øresundsforbindelsen, påvirket programmet for årets betondag, som omhandler materialevalg (cement), dansk betonforskning, standardisering og tunnelbygning.

Anvendelse af teoretisk viden og praktiske erfaringer danner basis for vor samfundsmæssige økonomi og konkurrencedygtighed.

Tak til alle de, som på Dansk Betondag 1996 medvirker til et forøget kendskab til beton som bygningsmateriale.

Mette Geiker
formand for
Dansk Betonforening

Aalborg Portland
Postboks 165
9100 Aalborg

Cement år 2025

af

Geolog Jesper Sand Damtoft
Afdelingsleder, Alternative Råmaterialer

Juli 1996

1. Indledning

Der er kun 29 år til år 2025. Mange af os, der i dag beskæftiger sig med cement og beton, vil stadig være aktive på det tidspunkt. Samtidig står samfundet over for nogle meget store miljømæssige udfordringer, der også vil få betydning for bygge- og anlægsbranchen. Der er derfor god grund til at overveje nogle af de tendenser, der vil præge cementudviklingen på lidt længere sigt.

Den vigtigste udviklingstendens i vort samfund i dag er måske den stigende bevidsthed om, at jordens ressourcer er udtømmelige. Der er grænser for, hvor meget vi kan belaste vort miljø uden uoprettelige skader, der kan blive en trussel for vor velfærd. Problemerne bliver ikke mindre af det øgede ressourceforbrug, der følger af den tredje verdens berettigede krav om at opnå en levestandard på samme niveau som vores.

Bygge- og anlægsbranchen vil i de kommende år være præget af disse tendenser. Der er gode muligheder for, at anvendelse af cement og beton kan medvirke til den udvikling mod et bæredygtigt samfund, der må forventes i fremtiden.

2. Cement og et bæredygtigt samfund

Ved en bæredygtigt økologisk samfundsudvikling forstås en udvikling, der ikke sker på bekostning af eftertiden. Der findes et givet økologisk råderum for vort forbrug af ressourcer og den deraf følgende påvirkning af omgivelserne. Hvis den tredje verden skal nå en levestandard, der nærmer sig vores, og hvis vor miljøpåvirkning skal reduceres til et niveau, hvor der ikke sker uoprettelige skader, er der kun plads til et givet, begrænset, forbrug af naturressourcer og anden miljøpåvirkning.

Miljøorganisationen NOAH gav i juni 1996 et bud på, hvorledes et bæredygtigt samfund kunne udformes [1]. Forslagene er ganske drastiske, f.eks. foreslås det, at benzinprisen hæves til 28 kr. pr. liter, kødforbruget skæres ned til en fjerdedel, og cementforbruget reduceres til en tiendedel.

Påstanden om cementproduktionens store miljøbelastning hviler på et løst grundlag. NOAH skelner ikke klart mellem cement og beton, ansætter det nuværende danske forbrug af cement dobbelt så højt som det er i virkeligheden, tager ikke hensyn til, at der genanvendes en lang række restprodukter i produktionen af cement, og er ikke klar over, at beton kan genanvendes som tilslag i ny beton. Endelig forventer man tilsyneladende ingen teknisk udvikling, der yderligere kan reducere forbruget af ikke-fornyelige ressourcer ved produktionen af cement.

Betonbranchens miljøpåvirkning er, på mere seriøs basis, blevet analyseret gennem en større livscyklusanalyse gennemført af DTI

Byggeri og Carl Bro Gruppen as [2]. Beton fremstår ud fra rapporten ikke som et særligt miljøbelastende produkt. Rapporten peger dog på muligheden for at nedbringe ressourceforbruget gennem betonens livscyklus bl.a. ved at udvikle "renere teknologi"-løsninger inden for cementproduktionen.

Der er dermed ikke belæg for at tillægge forbruget af cement og beton nogen væsentlig negativ betydning for miljøet. Derimod peger udviklingstendenserne inden for produktionen af cement i retning af, at anvendelse af cement og dermed beton som konstruktionsmateriale kan yde vigtige bidrag til den ønskede udvikling mod et bæredygtigt samfund.

Dette kan bl.a. ske ved en fortsat udvikling af "renere teknologi"-løsninger inden for cementproduktionen:

1. Større erstatning af ikke-fornyelige råstoffer ved øget genanvendelse af restprodukter og øget anvendelse af fornyelige ressourcer i produktionen af cement.
2. Cement fremstillet på basis af forbedrede klinkertyper, produceret ved lavere energiforbrug, med mindskede procesemissioner, og med større indhold af restprodukter eller andre materialer som filler.

3. Cementproduktionen i dag

Aalborg Portland fremstiller årligt ca. 2,6 mio. tons cement. Cementen fremstilles ved at brænde en blanding af kridt, flyveaske, kisaske og forskellige restprodukter i en roterovn. Råmaterialerne tilføres ovnsystemets ene ende, mens en brænder i den anden ende sørger for opvarmningen. Ved passagen gennem ovnen opvarmes råmaterialerne gradvist til en temperatur på ca. 1450°C, og der sker de kemiske reaktioner, der danner cementens bestanddele. Efter passage gennem roterovnen køles det dannede halvfabrikata, klinker, i en køler. Varmen fra afkølingen af klinkerne genanvendes i brændingen af klinkerne. Klinkerne formales herefter til cement i en cementmølle. Den færdige cement kan her tilføres gips, og der kan her ligeledes tilsættes til sætningsmaterialer, f.eks. kridt-filler.

Der er siden 1978 investeret over 900 mio. kr. i energi- og miljøforanstaltninger hos Aalborg Portland. Der er bl.a. bygget en ny cementovn til grå klinker, hvorved energiforbruget til denne produktion er reduceret med en trediedel [3]. Der er endvidere installeret et varmegenvindingsanlæg til de hvide ovne, hvor røggassen anvendes til at fremstille over 40 MW fjernvarme til nettet i Aalborg [4].

Der er efter disse nyanlæg kun begrænsede muligheder for at sænke ressourceforbruget ved at investere i nyt procesudstyr. Udviklingstendensen er derfor nu at reducere forbruget af rå-

stoffer gennem øget genanvendelse af restprodukter i stedet for naturlige råmaterialer; samt at udvikle nye klinkertyper, der kan fremstilles med lavere energiforbrug, har potentiale for høj tidlig styrke, og muliggør større brug af restprodukter som råmateriale eller filler.

4. Genanvendelse af restprodukter i cementproduktionen

Der er flere miljømæssige fordele ved at anvende restprodukter som råstoffer i produktionen af Portland-cement:

1. Anvendelse af naturressourser spares og råstofindvinding begrænses.
2. Restprodukter nyttiggøres i en produktion i stedet for at blive deponeret eller destrueret i specielle anlæg.
3. I cementovnen passerer røggasserne fra brænderen i modstrøm med de kalkrige råmaterialer, hvorved ovnsystemet virker som kalkskrubber. Den "indbyggede" evne til at rense røggasserne for tungmetaller er gentagne gange dokumenteret gennem omfattende målinger [5,6,7,8,9,10].
4. Organiske stoffer, der tilføres de varme dele af ovnen, nedbrydes fuldstændigt [5,7,11].
5. Tungmetaller indbygges i cementen og bindes derved effektivt i den færdige beton [12,13,14,15].
6. Der fremkommer, som hovedregel, ingen ny restprodukter som følge af anvendelse af restprodukter i cementproduktionen.
7. Forureningen fra produktionen kan i mange tilfælde nedsættes. Restprodukterne kan f.eks. have et lavere vandindhold eller en mere hensigtsmæssig sammensætning end primære råstofkilder, eller de kan påvirke fremstillingsprocessen på en anden positiv måde. Det har f.eks. vist sig, at brugte dæk kan genanvendes som middel til at reducere cementovnens forurening med gasarten NOx.

Aalborg Portland har siden 1978-79 genanvendt flyveaske fra kulfyrede kraftværker som erstatning for ler i råblandingen. Ud over at indvindingen af ler kunne stoppes i 1988, har dette været medvirkende til at nedsætte energiforbruget ved cementfremstillingen, da flyveasken i modsætning til ler er tør [16]. Herved er der sparet store mængder kul og udledning af CO₂ og andre procesgasser.

I de senere år er bortskaffelsesomkostningerne for affald og restprodukter steget voldsomt. Dette skyldes, at deponering og forbrænding er blevet belagt med store afgifter for at fremme

genanvendelsen. Det er derfor blevet økonomisk attraktivt at genanvende flere restprodukter som erstatning for naturlige råstoffer i cementproduktionen. Genanvendelsen af restprodukter i Aalborg Portlands produktion er derfor støt stigende og nåede i 1995 over 400.000 tons. Tabel 1 giver en oversigt over de restprodukter, der blev genanvendt af Aalborg Portland i 1995.

Tabel 1: Restprodukter, anvendt i Aalborg Portlands produktion, 1995			
Navn	Årlig mængde (tons/år)	Oprindelse	Proceseffekt
Flyveaske	222.000	Kulfyrede kraftværker	Erstatter ler, tørring af ler spares
Afsøvlingsgips	44.000	Kulfyrede kraftværker, eget anlæg	Erstatter naturgips
Kisaske	53.000	Svovlsyreproduktion	Kilde til jern
Papirslam	53.000	Fremstilling af genbrugspapir	Erstatter kridt og ler
Olieholdig slam	10.000	Tankrensning, spildolieopbejldning	Erstatter sand, ler, kilde til jern, 1-5% olieindhold
FCC-katalysator	9.000	Olieraffinaderier	Erstatter kaolin til hvid cement
Aluminiumoxid	12.000	Genanvendelse af aluminium	Erstatter ler, lavt alkaliindhold, mindsket deponering af elfilterstøv
Brugt blegejord	1.900	Oprensning af vegetabilsk og mineralsk olie	Erstatter ler, energiindhold ca. 50% af kul, proceshjælp
Jernoxidslam	2.000	Stålvalseværket	Jernkilde
Blæsemiddel	1.000	Blæsning af rene og shopprimede emner	Erstatter ler, sand
Bitumen	1.800	Raffinering af spildolie	Energikilde
Brugte dæk	Forsøg	Køretøjer	Emissionsreduktion, kilde til jern, erstatter kul.
TOTAL	409.700		

Ved Aalborg Portlands genanvendelse af restprodukter er det en forudsætning at genanvendelsen ikke må:

1. Påvirke miljøet i negativ retning
2. Skade arbejdsmiljøet
3. Give problemer i produktionen af cement
4. Ændre cementkvaliteten i negativ retning.

For at fremme genanvendelse af restprodukter, og sikre at forudsætningerne bliver opfyldt, blev der i 1993 oprettet en særlig afdeling, Alternative Råmaterialer. Blandt afdelingens opgaver er at foretage en grundig modtagekontrol og analyse af modtagne restprodukter. Dette sikrer, at specifikationerne bliver overholdt, således at miljø, produktion og cementkvalitet ikke påvirkes i negativ retning.

Der er stadig stort potentiale for at udvikle genanvendelsen af restprodukter i fremstillingen af cement. Blandt de vigtigste genanvendelsesprojekter, der arbejdes med for tiden er:

1. Tørret spildevandsslam
2. Brugte gummidæk.

Målet er på længere sigt at reducere forbruget ikke alene af råmaterialer, men også af importerede brændsler som kul og olie. Dette kan ske ved øget anvendelse af restprodukter og biomasse som f.eks. gummi og træ. Herved vil anvendelsen af fornyelige råstoffer øges, og emissionerne af bl.a. CO₂ og NO_x yderligere reduceres.

5. Nye klinkertyper

Den grundlæggende sammensætning af Portland-cement har ikke ændret sig væsentligt siden Joseph Aspdin i 1824 udtog sit patent på et produkt af dette navn. Der er imidlertid gennem årene blevet gjort talrige forsøg på at fremstille forbedrede cementklinker ved at foretage forskellige ændringer af den kemiske sammensætning af råblandingen eller ved at ændre fremstillingsprocessen.

Specielt er brugen af de såkaldte mineralisatorer blevet undersøgt intensivt [17]. Mineralisatorer er stoffer, der, tilsat i små mængder til råblandingen, virker fremmende for de kemiske reaktioner under brændingen. Herved kan brændingstemperaturen sænkes, og cementens indhold af alit kan øges. Da alit er den komponent i Portland-cement, der giver hurtigst styrkeudvikling og samtidig høj sen styrke, er mineralisatorer set som en mulighed for at fremstille en forbedret cement ved lavere brændingstemperatur. Herved reduceres brændselsforbrug og emissioner.

Trods de mange forsøg har mineraliseret cement indtil for nylig ikke vundet indpas i en aktuel cementproduktion. Årsagen har været, at brændselsbesparelsen har været for ringe sammenlignet med besværlighederne ved at indføre en ny produktionsmetode og omkostningerne ved indkøb af råmaterialet, der skal anvendes som mineralisator.

I 1990 blev der imidlertid startet et udviklingsprojekt i samarbejde mellem den engelske cementproducent Blue Circle, det finske Lohja (nu Finncementi) og Aalborg Portland. Baggrunden var et patent, udtaget af Blue Circle i 1975 på en mineraliseret cement med meget høj tidlig styrke [18]. Som mineralisatorer anvendtes en blanding af gips og ca. 0,5% af mineralet flussspat.

Projektets resultater viste, at det var muligt at fremstille cementer med styrker som konventionelle rene Portlandcementer ved at blande mineraliserede klinker med 15-35% af filler som f.eks. flyveaske, formålet slagge og kalksten [19].

Overraskende gode resultater blev opnået ved at blande mineraliseret cement, fremstillet hos Aalborg Portland, med fint kridt, fremstillet i udskillecyklonen på Aalborg Portlands største cementovn [20,21]. Det viste sig, at den fine kridt reagerer med den mineraliserede cement på en sådan måde, at en meget hurtig styrkeudvikling opnås.

Aalborg Portland har ført denne udvikling videre og markedsført en mineraliseret cementtype, med 15% kridtfiller, som den nye Basis-Cement. Ved at kombinere mineraliseret cement og kridtfiller er der her opnået en cement med høj tidlig styrke, 28-døgnstyrke som Rapid-Cement og gode all-round brugsegenskaber. Da klinkerindholdet i cementen samtidig er reduceret i forhold til Rapid-Cement, opnås en væsentlig ressourcebesparelse og reduceret CO₂-emission.

Cement, fremstillet ud fra traditionelle klinker, har kun et begrænset udviklingspotentiale. Det må derfor forventes, at udenlandske cementfabrikker følger Aalborg Portlands eksempel, og i stigende grad producerer mineraliseret cement med højt fillerindhold. Udviklingstendenserne vil formodentlig gå i retning af optimerede klinkertyper og fillersammensætninger, der vil gøre det muligt at øge fillerindholdet i de producerede cementer uden at gå på kompromis med cementens brugsegenskaber.

Helt nye klinkertyper kan på længere sigt komme på tale. De klorholdige alinit-cementer [22] og belit-cementer, der har lavere indhold af calcium end normal Portland-cement [23] er begge cementtyper, der potentielt kan fremstilles ved lavere brændingstemperaturer og dermed med reduceret brændselsforbrug og CO₂-emission. Alinit-cement er endvidere interessant ved, at restprodukter, der i dag er problematiske, som f.eks. PVC, kan anvendes som råstof til denne cementtype.

Det må dog understreges, at cementer, baseret på nye klinkertyper som f.eks. alinit og belit, befinder sig meget langt fra en egentlig produktion. Det er på ingen måde vist, at beton med tilfredsstillende brugsegenskaber og holdbarhed kan fremstilles ud fra disse "alternative" cementer. Det er derfor meget tænke-

ligt, at de klinkertyper, der vil blive anvendt i 2025 meget ligner de, der produceres hos Aalborg Portland i dag.

6. Konklusion

Fremtiden afspejles i nutiden. Når denne artikel overvejende har handlet om miljøtiltag og produktforbedringer, der er undervejs nu, er det for at vise nogle af de udviklingsretninger, der sikkert vil præge udviklingen de næste 29 år.

Meget tyder på, at udviklingen vil gå i retning af et økologisk bæredygtigt samfund under en eller anden form. Der er god grund til at forvente, at cement- og betonbranchen vil få en rolle i denne udvikling. Dette vil ske ved, at forbruget af ikke-fornyelige ressourcer mindskes og erstattes med restprodukter og biomasse som råmaterialer og brændsler i cementproduktionen. Samtidig vil kvaliteten af cementklinkerne stige, således at der kan anvendes flere restprodukter som filler eller tilslag i cement og beton.

Parallelt med denne udvikling af cement kan det forventes, at en stadigt stigende del af betonens tilslag vil bestå af genbrugsbeton, og nye avancerede og ressourcebesparende betontyper som CRC vil vinde indpas.

Beton, og dermed cement, står med gode kort på hånden til i årene fremover at få en central rolle i bygge- og anlægssektorens tilpasning til det økologisk bæredygtige samfund.

Referenceliste

1. **NOAH** (1996): "Bæredygtigt Danmark." National rapport. Kampagnen for et bæredygtigt Europa. Friends of the Earth Denmark/NOAH. 55 p.
2. "Brancheanalyse beton - renere teknologi ved betonfremstilling." Miljøprojekt nr. 304, Miljøstyrelsen 1995, 59 p. + delrapporter
3. **Borgholm, H.E. & Nielsen, P.B.** (1988): "Aalborg Portland's new 4000 tpd semi-dry process kiln system." Zement-Kalk-Gips 41(12), 595-600
4. **Borgholm, H.E.** (1993): "Successful utilization of heat recovery and desulphurization plant at Aalborg Portland." World Cement, November 1993, 2-8
5. **Høidalen Ø.** (1993): "Norwegian environmental Requirements on the use of liquid substitute fuels in rotary kilns." Præsenteret på VDZ Zementtagung, Düsseldorf 1993. 18 p. + ill.

6. **Kirchner, G.** (1986): Verhalten der Schwermetalle beim brennen von Zementklinker." Zement-Kalk-Gips 39(10), 555-557
7. **Pershing, D.W., Sarofim, A.F., Dellinger, B.H., Heap, M.P. & Owens, W.D.** (1993): "An evaluation of emissions from cement kilns co-fired with hazardous wastes." Proc. 29th International Cement Seminar, San Francisco, December 1993, 83-102
8. **von Seebach, M. & Tompkins, J.B.** (1991): "Metal emissions are predictable." Rock Product, April 1991, 31-35
9. **Sprung, S.** (1988): "Spurenelemente - Anreicherung und Minderungsmaßnahmen." Zement-Kalk-Gips 41(5), 251-257
10. **Woodford, J., Gossman, D.G., Jameson, R. & Gossman, S.E.** (1995): "The effect of process differences on system removal efficiencies (SRES) and the fate of metals in cement kilns." I: "Waste combustion in boilers and industrial furnaces" Air & Waste Management Associations SP-95, 191-215
11. **Dambrine, E.** (1992): "Waste burning and thermal destruction of organic compounds in a cement kiln. Recent test performed by Ciments Francais." Proc. European Seminar on "Improved Technologies for the Rational Use of Energy in the Cement Industry. TERMIE. Berlin oktober 1992. 7 p. + ill.
12. **Karstensen, K.H.** (1994): "Burning of hazardous wastes as co-fuel in a cement kiln - Does it affect the environmental quality of cement ?" I: Goumans J.J.J.M., van der Sloot, H.A. & Aalbers, Th.G. (ed.): "Environmental aspects of construction with waste materials." Elsevier Science, 433-451
13. **von Seebach, H.M. & Tseng, H.** (1993): "The suitability of cements manufactured with hazardous waste derived fuels and with fossil fuels for drinking water application." Præsentet på VDZ Zementtagung, Düsseldorf 1993. 8 p. + ill.
14. **Sprung, S., Rechenberg, W. & Bachmann, G.** (1994): "Environmental compatibility of cement." Zement-Kalk-Gips 47(10), E262-E267
15. **Sprung, S., Rechenberg, W. & Bachmann, G.** (1994): "Environmental compatibility of cement and concrete." I: Goumans J.J.J.M., van der Sloot, H.A. & Aalbers, Th.G. (ed.): "Environmental aspects of construction with waste materials." Elsevier Science, 369-386
16. **Borgholm, H.E.** (1992): "Reducing environmental pollution by using fly ash as a raw meal component." Zement-Kalk-Gips 45(6), 141-145

17. **Moir, G. & Glasser, F.P.** (1992): "Mineralisers, modifiers and activators in the clinkering process." Proc. 9th Int. Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, 125-152
18. **Murray, R.J. & Brown, A.W.** (1978): U.K. Patent no. 1498057
19. **Kelham, S., Damtoft, J.S. & Talling, B.** (1995): "The influence of high early strength (HES) mineralised clinker on the strength development of blended cements containing fly ash, slag or ground limestone." Proc. 5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete.
20. **Borgholm, H.E. & Damtoft, J.S.** (1993): Europæisk Patent EP 0 640 062 B1
21. **Borgholm, H.E., Herfort, D. & Rasmussen, S.** (1995): "A new blended cement based on mineralised clinker." World Cement, August 1995, 27-33
22. **Uchikawa, H. & Obana, H.** (1995): "Ecocement - frontier of recycling of urban composite wastes." World Cement, November 1995, 33-40
23. **Stark, J., Müller, A., Rümpler, K., Seydel, R. & Jost, K.** (1987): "Manufacture of active belite cement with regards to the reduction of energy consumption." Il Cemento 3/1987, 239-250

Øresundscement I/S
3 Lars Bjørnsstræde
1454 København K

Varför inte slaggcement?

av

Civilingenjör Curt Arne Carlsson

Juli 1996

Varför inte slaggcement?

1. Introduktion

Användning av slagg som ersättning för cement har en hundraårig historia i Europa. Vi talar här om granulerad masugnsslagg, som fås som restprodukt vid järnframställning. I masugnen smälts en blandning av järnmalm, koks och kalksten. Slaggen, som är lättare än järnet, lägger sig ovanpå och kan därmed lätt separeras från smältan. Slaggen kyls sedan snabbt, vilket är nödvändigt för att erhålla en amorf och reaktiv produkt i form av ett grusliknande material. Slaggen kan sedan malas och användas antingen direkt som ett tillsatsmaterial vid betongtillverkning (vanligt i England) eller malas tillsammans med cementklinker och gips till ett slaggcement (vanligt i Holland).

Eftersom slagg är en restprodukt vid järntillverkning, har man naturligtvis mest erfarenhet i länder där sådan tillverkning förekommer. Det faktum att slagg är en restprodukt är ett viktigt skäl till att uppmuntra en användning i betongtillverkning, eftersom man annars skulle dra på sig stora deponeringsproblem för slagg vid järnframställning. Det är emellertid en ganska liten del av den totala slaggproduktionen från järn- och stålverk som lämpar sig för användning i betong.

I början hade man stora problem vid användning av slagg i betong, mest beroende på en stor kvalitetsvariation i slaggen. Detta problem är avsevärt mindre idag, men man skall komma ihåg att slagg är ingen enhetlig produkt mellan olika järnverk eller olika länder utan varierar högst avsevärt. De flesta järnverk styr sin produktion på järnets kvalitet och slaggens kvalitet med hänsyn till betongegenskaper lämnas därhän. Man måste därför vara ytterst vaksam på de parametrar, som är väsentliga för just den betong, som man skall tillverka och förprova denna omsorgsfullt med övriga ingående delmaterial.

De egenskaper den färska och hårdnade betongen får är naturligtvis även beroende av hur stor mängd slagg, som används. Vanliga andelar slagg är 10-70 % av cementvikten. I nedanstående sammanställning kommer i första hand slaggcement med hög inblandning av slagg att avhandlas (ca 70 % inblandning är ett minimum för att erhålla sulfatresistens, vilket ofta är ett krav i anläggningskonstruktioner i marin miljö).

2. Reaktion med cement

Slaggen är latent hydraulisk, vilket innebär att den måste aktiveras för att man skall få en bindning. Detta sker i slaggcementbetong med hjälp av Ca(OH)_2 , alkali och sulfater i den färska betongen. Reaktionsprodukterna påminner mycket om de man får vid användning av vanligt portlandcement, men man har mindre andel CaO och mer aluminium- och magnesiumoxid. Dessutom är andelen bildad Ca(OH)_2 i betongen betydligt lägre vid användning av stora slaggmängder.

Tabell 1 visar några av de viktigaste parametrarna för slagg för några olika järnverk. Slaggcementens reaktivitet bestäms i första hand av någon s.k. hydraulisk modul t.ex.:

$$M_1 = (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 \text{ eller bara } M_2 = \text{CaO} / \text{SiO}_2$$

Ju större värde på modulen desto större reaktivitet.

Utöver de rent kemiska parametrarna hos slaggen påverkas reaktiviteten av glashalten och finmalningsgraden.

Blast Furnace slag				
Country	Producer	CaO %	MgO %	Al ₂ O ₃ % SiO ₂ %
Netherlands	Imvader	37	11	17 33
Spain	Ensidesa	40	7	11 36
	AHV	44	8	9 36
United Kingdom	British Steel	40	8	12 36
Italy	ILVA	44	7	12 36
Sweden	Luleå	51	16	3 33
	Oxelosund	58	13	10 36

Tabell 1. Kemiska parametrar för några slaggtyper i Europa.

Slaggcementen har en betydligt långsammare hållfasthetsutveckling den första veckan än motsvarande portlandcement. Därefter får man en acceleration av bindningen och som regel har man nått samma hållfasthetsnivå efter 28 dygn.

3. Färskbetongegenskaper

Vattenseparationen hos slaggcementbetong beror på flera faktorer som finmalningsgrad, reaktivitet osv. En allmän uppfattning är att slaggcement ger större problem med vattenseparation än portlandcement.

Arbetbarhet är en metodrelaterad egenskap och man har svårt att hitta bra metoder, som egentligen beskriver det man behöver för att jämföra olika betonger (flytbarhet, kletighet osv.). Det intressanta för en entreprenör är normalt hur mycket energi, som behöver tillföras för att fylla ut formen, eliminera kaviteter och driva ut önskad luft i betongen. Det är dessutom viktigt att veta denna parameter vid olika tidpunkter efter blandning av betongen. Sättnmättet ger definitivt inget bra mått på denna egenskap. Däremot kan Power's omformningsmätare och Vebe-mätaren ge goda ställföreträdande värden.

Arbetbarheten och dess utveckling i tiden tar sig helt olika för slaggcementbetong och portlandcementbetong, vilket kan bli en överraskning för den som inte är van vid båda sorters betonger. Slaggcementbetong ger en god bearbetbarhet momentant, men styvnar till väldigt fort och blir svår att

hantera. Emellertid ger en relativt liten vibreringsinsats den goda konsistensen tillbaks och man kan nästan tala om ett tixotropiskt beteende. Portlandcement ger en mer gradvis tillstyvnad. Slaggcementbetongens stora kletighet kan ge problem då den tenderar att klippa fast i vibreringsstavar, vilket kan skapa defekter när vibreringsstavarna förflyttas. Det är svårt att bedöma de bägge cementtyperna i termerna bättre och sämre. Det är snarare en fråga om att bli van att hantera de olika betongerna. Naturligtvis har ballasten stor inverkan på arbetbarheten, som i stor utsträckning kan påverka ovanstående generella beskrivning.

4. Hårdnande betong

Bindningen i slaggbetong sker betydligt långsammare än för konventionell betong och i synnerhet vid kall väderlek. Det missgynnar naturligtvis hållfasthetsegenskaperna, men kan vara positivt i masskonstruktioner ur värmesprickbildningssynpunkt.

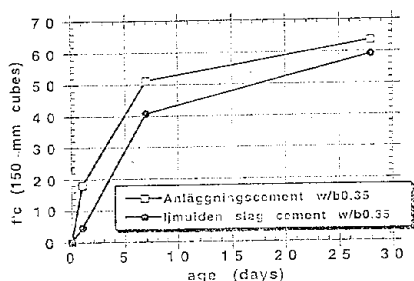


Fig. 1 Hållfasthetsjämförelse mellan ett slaggcement och ett portlandcement.

5. Sprickbildning

Sprickbildning i betong kan uppstå, när en förhindrad volymminskning bygger upp dragpåkänningar, som överskrider draghållfastheten. Volymminskningen kan ske genom kemisk krympning, avdunstning från betongytan (i tidigt skede och senare), eller genom avkylning. Därutöver kan man få sprickbildning i betong på grund av svällande påverkan i betongen (som armeringskorrosion och alkali-kiselsyrareaktioner, frysnings o.s.v.).

I litteraturen varnar man ofta för slaggcementbetongens sämre egenskaper, när det gäller kemisk krympning och avdunstningskrympning i tidigt skede. Det är således viktigt att täcka och tillföra vatten till slaggcementbetong under betydligt längre tid (flera veckor) än för portlandcementbetong.

Slaggcementbetong är känt för att reducera risken för termosprickbildning och därmed kräva mindre eller eliminera kylningsinsatsen vid gjutning av

DANSKBET2 DOC

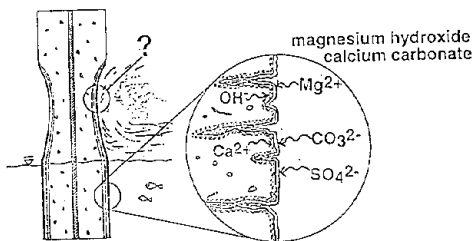
masskonstruktioner på grund av sin mindre värmeutveckling. En omvärdering av detta rykte har emellertid skett bland många forskare på senare år. Bland annat har man utfört jämförelsejämtningar i Tyskland och funnit att vissa (lågalkaliska, lågvärmeceement) portlandceement ger till och med en mindre sprickbildning än slaggceement. Se /1/. Dessa portlandceement har visat sig besitta en gynnsammare draghållfasthet-, krypnings- och styvhetsutveckling än slaggceement, som bidrar till bättre fördelning och upptagande av påkänningar.

6. Beständighet

Det är viktigt att förstå att olika nedbrytningsmekanismer överlagras varandra, så att den ena skapar förutsättningar för att den andra skall kunna starta. Så kan t.ex. alkali-kiselsyrareaktion, saltfrysning och armeringskorrosion samverka. Man får således inte bortse från någon miljöbelastning under hela livslängden, om man skall erhålla en bestående konstruktion.

För att erhålla en beständig betongkonstruktion måste man producera en homogen betong som förblir intakt trots påverkan i form av temperaturväxlingar, frost, salt, sulfater, etc. Denna homogenitet åstadkoms delvis genom en lågpermeabel matris, en betong utan kaviteter och en begränsad sprickbildning. Dessutom bör ofrånkomliga sprickor kunna läkas på ett betryggande sätt. Erfarenheter från användning av slaggceementbetong och vanlig portlandbetong i svenska betongdammar har visat att sprickläkningen i regel är betydligt sämre om andelen portlandceement är låg.

En lågpermeabel matris får man genom att använda låga vattenceementtal, rätt avvägning mellan arbetbarhet och vibreringsinsats och god härdning av betongen. Slaggceement har visat sig ge en väldigt god effekt på permeabilitet framförallt med avseende på klorider. Studerar man emellertid permeabiliteten i tiden för lågalkaliska portlandceementbetonger med inblandning av små mängder micro-silica (0-5%) i marin miljö, finner man att även dessa får en mycket hög täthet mot klorider redan efter några års fältexponering. Denna förtätning beror på ett jonutbyte vid betongytan, som skapar väldigt täta skikt av $Mg(OH)_2$, $CaCO_3$, $CaSO_4$ och som betyder att portlandceement i marin miljö nästan ger lika god täthet som slaggceement. Detta innebär att man vid livslängdsprognoser bör använda sig av data från långvariga fältförsök i en representativ miljö, i stället för att förlita sig på korta laboratorieförsök, vilket tyvärr är alltför vanligt.



Changes in effective Cl diffusivity over time assuming Fick's 2 law valid submerged concrete

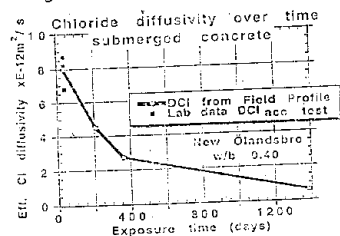


Fig. 2 och 3. Tätning av betonytan i marin miljö.

För att erhålla en begränsad sprickbildning måste hänsyn tas till de aspekter, som gavs i kap. 5.

Vad saltfrostsador beträffar, så är de flesta experter överens om, att det är betydligt svårare att åstadkomma ett stabilt och tillfredsställande luftporsystem i slaggcementbetong än i betong med lågalkaliska portlandcement. Tester utförda på SP i Borås visar trenderna för utförda frysprov enligt "Boråsmetoden" SS137244 utborrade ur vibrerade betongblock. Vid utomhusgjutningar med slaggbetong försämras ofta det redan dåliga luftporsystemet ytterligare, som en följd av betongens långsamma bindning i vårt nordiska klimat. Användning av flyttillsatser retarderar slaggbetongen ytterligare, vilket kan innebära att det från början instabila luftporsystemet kollapsar helt.

Casting & testing freeze-thaw resistance

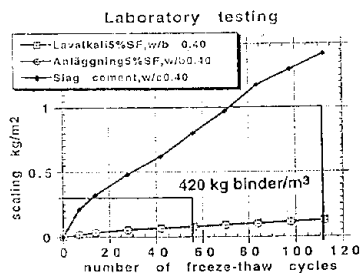
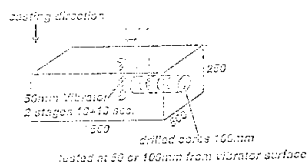


Fig. 4. Jämförelse av frostbeständighet vid SP-prov.

När det gäller armeringkorrosion får man beroende på miljö ta hänsyn till karbonatisering och/eller kloridinitiering, ofta i kombination med saltfrostangrepp. Karbonatisering fortskrider normalt betydligt snabbare i slaggcementbetong än i portlandcementbetong. Detta verifieras också i en Round Robin test, som för närvarande pågår i sju olika länder. Karbonatiserad betong förlorar mycket av sin kloridbromsande verkan. Speciellt gäller detta för betong med mycket slagg, eftersom denna betong i motsats till portlandbetong får ett öppnare porsystem och därmed försämrad kloridtäthet med ökande ålder.

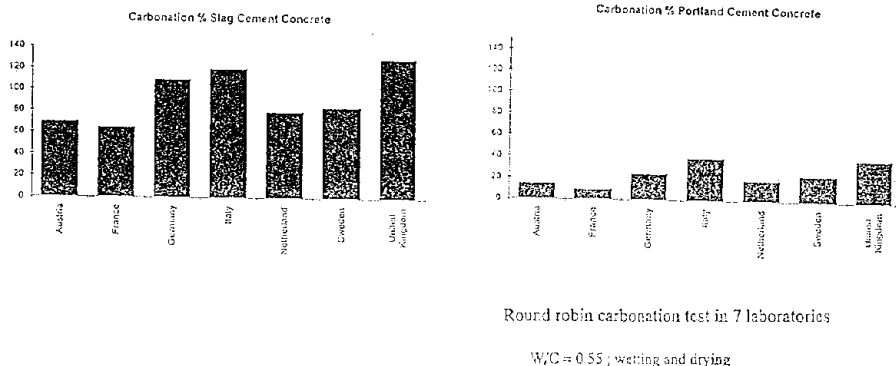


Fig. 5. Round Robin test av karbonatisering.

För kloridinitierad korrosion har man att ta hänsyn till permeabiliteten *över tid* hos matrisen (som långt ifrån alltid är gynnsam för slaggcement), sprickor och tröskelvärdet, dvs den kloridnivå, som korrosionen startar vid. Denna är utöver vattencementtalet och relativa fuktigheten beroende på alkaliteten, som är ytterst ogynnsam för slaggcementbetong. En ökad sprickbenägenhet och karbonatisering hos slaggcementbetong, dålig frostbeständighet och framför allt en minskad förmåga att laka uppkomna sprickor, leder ofta till att slaggcementbetong blir svårare att hantera ur korrosionssynpunkt jämfört med portlandbetong.

Slaggcement med högt slagginnehåll verkar helt eliminera alkali-kiselsyrareaktioner, när reaktiv ballast används.

Referenser:

/1/ 46 Practical experience with concrete technological measures to avoid cracking. Springenschmid, Breitenbucher, Mangold. Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Proceedings of the International RILEM Symposium. 1994.

/2/ Sandberg P "Critical evaluation of factors affecting chloride initiated reinforcement corrosion in concrete", LTH Byggnadsmaterial TVBM-7088, Lund 1995, sid 50-51.

DANSKBT2.DOC

Instituttet for Bygningsteknik
Aalborg Universitet
Sohngaardsholmsvej 57
9000 Aalborg

En ny betonprofessors visioner

af

P. Freiesleben Hansen
professor

Indholdsfortegnelse	Side
En ny betonprofessors visioner 1	31
Ingeniøruddannelserne ved Aalborg Universitet	31
Lidt historie	
Fakulteter ved Aalborg Universitet	
Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet	
Instituttet for Bygningsteknik	33
Nogle nøgletal for Instituttet for Bygningsteknik	
Instituttets faglige og forskningsæssige struktur	
Instituttets strategiplan 1995-2000	
Instituttets Betonlaboratorium	
Universiteternes Betonforskning (UBF)	37
Hovedpunkter i universiteternes samarbejdsaftale	
Arbejdet er begyndt	
Program for Forskning, Udvikling og Undervisning	38
Baggrundsaktiviteter	
Betonundervisningen ved Instituttet for Bygningsteknik	
Betonteknologisk Forskning og Udvikling	
Iværksatte Ph.D.-projekter	
En ny betonprofessors visioner 2	42
Litteratur	43

En ny betonprofessors visioner 1

Det er med nogen tøven, man som foredragsholder nærmer sig denne, ret spøjse, foredragstitel, som arrangementskomitéen har forfattet. Selvfølgelig – visioner og drømme skal der til – men visioner og drømme er kun meningsfulde, når de har et vist mål af kontakt med virkelighedens verden. *Det må vi så prøve at give dem!*

I forskningsgruppen **Materialefysik og Betonteknologi** ved *Instituttet for Bygningsteknik* ved Aalborg Universitet har vi gennem dette forår udarbejdet en operationel handlingsplan og finansieringsplan for de kommende års materialeteknologiske *Forskning, Udvikling og Undervisning* ved Institutet. I denne indsats indgår cement- og betonteknologi selvsagt med stor vægt.

Den virkelighedens verden, vi herunder har måttet forholde os til, omfatter – med udgangspunkt i status – forhold som faglige ressourcer, økonomi, laboratoriefaciliteter, undervisningsmæssig belastning og organisatorisk opkobling. Ingen af disse emner animerer i sig selv til drømmerejser af længere varighed. Når vi her i dette efterår begynder arbejdet med vort program, så sker det trods alt med en rimelig optimisme. Dette skyldes ikke mindst, at vi mentalt *har været ude i alle krogene* – at *vi i enighed ved, hvad vi vil*.

På denne baggrund forekommer det vist rimeligt, om vi tager udgangspunkt i realiteterne – og gemmer visioner og drømmerier til et senere tidspunkt i foredraget.

Ingeniøruddannelserne ved Aalborg Universitet

Indledningsvis vil det nok være nyttigt at skabe sig et overblik over, hvorledes *ingeniøruddannelserne* er indplaceret i det hierarki af uddannelser, der dækkes af institutionen *Aalborg Universitet*. For udenforstående kan det faglige og styrelsesmæssige kredsløbssystem i denne institution virke ganske uoverskuelig, for ikke at sige labyrinthisk. Men netop dette – det næsten urskovsagtigt, pibende faglige miljø – rummer en række spændende samarbejdsmuligheder for en ingeniøruddannelse. *Det vil vi gerne vide at udnytte.*

Lidt historie

Aalborg Universitet, (AAU) – tidligere *Aalborg Universitetscenter*, (AUC) – blev oprettet i 1974 som landets femte universitet. Ved oprettelsen blev flere, allerede eksisterende uddannelsesinstitutioner i Aalborg integreret i det nye universitet, bl.a. *Danmarks Ingeniørakademi*, *Aalborg Teknikum*, *Den Sociale Højskole* samt afdelinger af *Handelshøjskolen*. Herudover blev landinspektørstudiet overført fra *Landbohøjskolen* i København.

Med sammenlægningen blev de forskellige uddannelser organiseret efter en ny studieform: *Problemorienteret* og *projektorganiseret gruppearbejde*, en studieform, der siden har kendetegnet universitetets undervisningsprofil.

Aalborg Universitet er i dag landets trediestørste universitet med tæt ved 10 000 studerende, med 1 400 ansatte og med et årligt budget på 550 mio. kroner. Siden 1977 har universitetets hovedsæde været området ved Sdr. Tranders, ca. 6 km fra Aalborgs centrum. Herudover har universitetet Aalborg-afdelinger på Sohngaardsholmsvej og Strandvejen samt en Esbjerg-afdeling på Niels Bohrs Vej.

Fakulteter ved Aalborg Universitet

Aalborg Universitet omfatter fagligt og styrelsesmæssigt tre fakulteter: Det *Humanistiske Fakultet*, det *Samfundsvidenskabelige Fakultet* og det *Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet*. Disse tre fakulteter er opdelt i 15 fagligt/administrative enheder – *Institutter* – der er centre for

universitetets forskningsaktiviteter. Uafhængigt af institutterne er uddannelserne styret af en række fagspecifikke *Studienævn*, der forestår udvikling og styring af kandidatuddannelserne. Den fornødne undervisning rekvireres af disse studienævn fra de respektive forskningsinstitutter.

Kandidatuddannelser, forskningsområder og institutter, knyttet til universitetets tre fakulteter, er for nærværende.

- **Det Humanistiske Fakultet:** Engelsk, Tysk, Fransk, Spansk, Sprog og Internationale Studier, Erhvervssprog, Sprog og Internationale Forhold, Humanistisk Informatik, Kommunikation, Musik, Musikterapi, Dansk og Psykologi. Den institutmæssige, og dermed forskningsmæssige, underlægning til disse uddannelser omfatter

- Institut 10: *Musik og Musikterapi*
- Institut 11: *Kommunikation*
- Institut 12: *Sprog og Internationale Kulturstudier*

- **Det Samfundsvidenskabelige Fakultet:** Socialrådgiver, Historie, Samfundsfag, Administration, Samfundsøkonomi, Revision, HD, Erhvervsøkonomi, Erhvervsjura. Under dette fakultet hører fire fagligt/administrative institutenheder

- Institut 1: *Sociale Forhold og Organisation*
- Institut 2: *Økonomi, Politik og Forvaltning*
- Institut 3: *Erhvervsstudier*
- Institut 4: *Samfundsudvikling og Planlægning*

Her kommer imidlertid en lille finurlighed ind, idet Institut 4: *Samfundsudvikling og Planlægning* er et såkaldt "tværfakultært" institut. Det hører samtidig under det *Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet*, hvor det bl.a. dækker de tekniske discipliner *Landmåling* og *Matrikelvæsen*.

- **Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet:** Diplom- og Civilingeniør, Datalogi, Fysik og Matematik, Landinspektør. Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet omfatter ialt otte *Institutter*

- Institut 5: *Vand, Jord og Miljøteknik*
- Institut 6: *Bygningsteknik*
- Institut 7: *Kemi og anvendt Ingeniørvidenskab* (Esbjerg)
- Institut 8: *Elektroniske Systemer*
- Institut 9: *Produktion*
- Institut 13: *Fysik*
- Institut 14: *Energiteknik*
- Institut 15: *Maskinteknik*

Udover det her skitserede uddannelsessortiment forventer AAU i nær fremtid at udbygge med fagområderne: *Filosofi og Videnskabsteori* samt *Sociologi*. Ikke mindst førstnævnte disciplin har interessante aspekter for en teknisk-videnskabelig uddannelse.

Vi skal med andre ord botanisere i dele af det *Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet* for at "finde" Aalborg Universitets bygningsingeniøruddannelse.

Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet

Under dette fakultet finder vi seks ingeniøruddannelser, herunder bygningsretningen. Hertil kommer kandidatuddannelser inden for *Matematik/Fysik/Datalogi* og indenfor *Landmåling*.

Universitetets forskning, afspejlet i institutstrukturen, er som nævnt *ikke* identisk med de uddannelsesretninger, der udbydes. Institutterne fungerer i bogstavelig forstand som entreprenører på undervisningsoprádet. De studieansvarlige nævn planlægger uddannelsesforløbene og rekvirerer derefter de nødvendige undervisningsopgaver løst af institutternes medarbejdere. Et særkende i AAU's uddannelse er også den etårige basisuddannelse, der er fælles for alle fakultetets studieretninger. De nuværende uddannelsesretninger på ingeniørområdet fremgår af følgende figur.

Tek-Nat Basisudd.	Kemi / Bioteknologi	(diplom.ing./civ.ing.)
	Anlægssektor	(diplom.ing./civ.ing.)
	Byggesektor	(diplom.ing./civ.ing.)
	Industrisektor	(diplom.ing./civ.ing.)
	Informationsteknologi / Teleteknik	(diplom.ing./civ.ing.)
	Eksportteknologi	(diplom.ing./civ.ing.)
	Matematik / Fysik / Datalogi	(B.S./cand.scient)
	Landmåling / Matrikelvæsen	(landinspektør)

Oversigt over kandidatuddannelser under det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet. De øverste, seks retninger omfatter diplom- og civilingeniøruddannelser af varighed 3½ år hhv. 5 år. Den naturvidenskabelige retning omfatter B.S.- og cand.scient.-uddannelser af varighed 3 år hhv. 5 år. Endelig er landinspektøruddannelsen 5 årig. Den 1-årige basisuddannelse er fælles for alle retninger.

Vi har nu – geografisk og fagligt – fået indkredset det sted i AAU's kredsløbssystem, hvor *Materialefysik / Betonteknologi* hører hjemme. Som det er fremgået, varetages forskningsaktiviteter på området af et institut, medens uddannelsen forestås af et studienavn. Mere konkret: Vores forskning er henlagt til: *Instituttet for Bygningsteknik* – vores undervisning administreres af fakultetets *B-studienavn*, der både varetager bygningsingeniøruddannelsens *Anlægssektor* og *Byggesektor*.

Instituttet for Bygningsteknik

De fysiske kulisser for den betonteknologiske forskning er nu sat: *Instituttet for Bygningsteknik*. Instituttet har til huse i et bygningskompleks, Sohngaardsholmsvej 57, der inden universitetets oprettelse i 1974 tilhørte *Aalborg Teknikum*. Efter senere tilbygning af bl.a. nyt *Betonlaboratorium*, *Spændplan* til dynamisk prøvning og et *Maskinværksted* råder Instituttet i dag over moderne og velfungerende lokaler og faciliteter til undervisning og forskning.

For at forstå den faglige placering af *Materialefysik / Betonteknologi* i disse rammer, kan det være nyttigt, dels at blade lidt i Institutets *Strategiplan 1995-2000*, der er udarbejdet på anfordring af Fakultetet, dels at se lidt nærmere på den faglige strukturering af Institutets forskning. Men først et par nøgletal for Institutet.

Nogle nøgletal for Institutet for Bygningsteknik

I opgørelsesperioden 1989-1993 har instituttets medarbejdere udgivet ialt 387 videnskabelige publikationer; inden for samme periode er der afsluttet 24 Ph.D.-uddannelser ved Institutet. Institutet har i opgørelsesperioden modtaget ialt ca. 12 mio kroner til forskningsprogrammer fra forskningsrådene, EU og Energistyrelsen.

På tidspunktet for handlingsplanens udfærdigelse var der ved Institutet beskæftiget 5 professorer/ingeniørdocenter, 2 docenter, 15 lektorer, 5 adjunkter og 18 TAP; på samme tidspunkt var der indskrevet ialt 13 Ph.D.-studerende.

Institutts faglige og forskningsmæssige struktur

Institutts forskning og undervisning er bundet op på tre såkaldte *Forskningsenheder*, der igen er underdelt i syv *Forskningsgrupper*. Lidt forenklet sagt: en forskningsenhed dækker et ingeniørteknisk *fagområde* – en forskningsgruppe dækker en ingeniørteknisk *fagdisciplin*. Den gældende struktur er

Forskningsenhed	Forskningsgrupper
6. Klimateknik	6.1 Luftfordeling og transportprocesser
7. Konstruktionsanalyse	7.1 Analyse af bærende konstruktioner 7.2 Stokastisk mekanik
8. Konstruktionsdesign	8.1 Materialefysik og Betonteknologi 8.2 Informationsteknologi i byggeriet 8.3 Design af konstruktioner 8.4 Brud, udmattelse og eksperimentel mekanik

Den benyttede, lidt specielle nummerering af forskningsenheder og -grupper beror på, at Institutets indsatsområder kun udgør en delmængde af Fakultetets samlede forskningsflade.

Vi har nu – lag for lag – arbejdet os ind til og har fået nålen sat i forskningsgruppen *Materialefysik / Betonteknologi* på AAU's landkort. Denne øvelse har samtidig givet os et billede af de faglige og organisatoriske "randbetingelser", forskningsgruppen må arbejde under.

Det næste spørgsmål, vi må stille os, er: Hvilke forventninger har *man* til denne, vi kan vist godt kalde det, *mikroorganisme* af en forskningsgruppe? Her er der ganske god hjælp at hente i den *Strategiplan 1995-2000*, der er udarbejdet af Institutet.

Institutts strategiplan 1995-2000

En udtalt målsætning i Institutts overordnede strategiplan er at sikre kvalitet, niveau og fornyelse af Institutts undervisningsaktiviteter og herigennem skabe et undervisningsmiljø, der kan være attraktivt for både udenlandske studerende og gæstelærere. Det er endvidere Institutts målsætning at øge antallet af Ph.D.-studerende på forskerskolen til ca. 20.

På grundlag af en gennemført analyse finder Institutet, at især materialeområdet bør prioriteres højt. Man vil derfor fremme forskningsprojekter inden for forskningsenhederne *Konstruktionsanalyse* og *Konstruktionsdesign* i det omfang, de er rettet mod materialeområdet.

Hvad der gemmer sig bag disse overordnede betragtninger kommer vist bedst frem gennem et direkte citat, hentet fra Institutets *Strategiplan 1995-2000*

citat// Ved etablering af forskningsgruppe 8.1 "Materialefysik og Betonteknologi" er der tale om en modernisering af den hidtidige materialeforskning til fordel for en forskning, som bygger på en mere central anvendelse af grundfagene: matematik, fysik og kemi.

På byggematerialeområdet har forskningen hidtil været koncentreret om frisk betons egenskaber, fiberbeton og hydratiseringskinetik. Disse områder ønskes videreført og udbygget, bl.a. ved at materialefysik, hærdeknologi og materialers brudforhold får en central placering.

Materialefysikken er et fagområde, som omfatter anvendelse af grundlæggende termodynamiske principper ved løsning af vigtige materialeteknologiske problemstillinger. Området danner grundlag for studiet af vigtige problemer inden for materialestrukturer, materialeomdannelse samt materialers holdbarhed. Som eksempel på anvendelse kan nævnes materialers opførsel under brand. Materialefysikken er her et redskab til beregning af givne ydre påvirkningers indflydelse på materialeegenskaberne.

Hærdeknologien er et vigtigt redskab ved undersøgelse af temperaturens indflydelse på de kemiske processer, der sker under betonens hærkning. I denne forbindelse skal det nævnes, at en videreførelse af et Ph.D.-projekt om reaktionskinetik og temperatureffekt i betoner med portlandcement, flyveaske og mikrosilica vil være aktuel. Også studiet af tætte, cementfattige bindemidlers egenskaber vil blive videreført.

Udvikling og anvendelse af edb til håndtering af materialeteknologiske problemer vil blive prioriteret højt. //citat slut

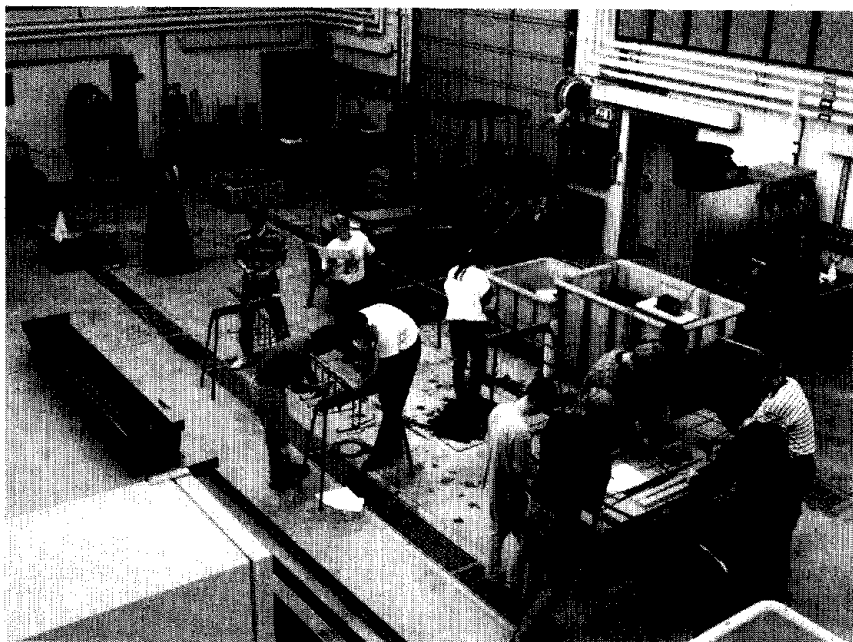
Disse betragtninger viser, at Institutet vil investere i forskning, udvikling og uddannelse på materialeområdet. Helt konkret har dette da også manifesteret sig i, at man i 1994 kunne indvi et moderne, nybygget *Betonlaboratorium* til brug for Institutets forskning og undervisning i betonteknologi.

Institutets Betonlaboratorium

Med 1994 tilbygningen af et selvstændigt *Betonlaboratorium* på 350 m² har Institutet for Bygningsteknik dels skabt en tidssvarende ramme for betonteknologisk forskning og udvikling, dels sikret, at undervisningen i betonteknologi kan gøres virkelighedsnær gennem praktiske laboratorieøvelser for de studerende. Det nye laboratorium råder over sædvanligt udstyr til undersøgelse af tilslagsmaterialer og frisk og hærdnet beton. Herudover er laboratoriet udstyret med følgende, mere eksotiske udstyr

- Vibrationsblander med vakuumudstyr til effektiv homogenisering af tætte, cementbundne materialer med højt fiberindhold
- Udstyr til tilstandsvurdering af betonkonstruktioner: Covermeter, EKP-måling af potentialer, Elektroder for alkaliindhold og chloridindhold, bestemmelse af luft- og vandpermeabilitet, udboring af betonkerner, betonskæring, ultralydudstyr samt fotoudstyr
- Billedbehandlingsudstyr til brug ved luftporebestemmelse som led i strukturanalyse af hærdnet beton

Desuden råder laboratoriet over et termostatstyret klimarum på 12 m², som kan styre temperatur (10 – 60 °C) og luftfugtighed (30 – 95 % RF); benyttes bl.a. som hærdekammer for betonprøver. Endvidere er der i laboratoriet et et programmerbart klimaskab (–20 °C til 180 °C).



Et kig ud over hallen i det nye betonlaboratorium ved Institutet for Bygningsteknik. Problemorienteret og projektorganiseret gruppearbejde kendetegner undervisningen ved AAU. Som led i et projekt: "Projektering af parkeringshus" gennemfører og rapporterer studerende på 4. halvår f.eks. en beton-teknologisk øvelse, der omfatter: undersøgelse af tilslagsmaterialer, proportionering, undersøgelse af hærdnet beton, bukning og binding af armering samt udstøbning, hærdning og bæreevneundersøgelse af armerede betonbjælker. Her: en scene fra dette forløb.

Som led i vores handlingsplan – og inden for rammerne af den senere omtalte samarbejds-aftale UBF – vil forskningsgruppen gennem kommende programmer arbejde på, at følgende måleudstyr og apparatur anskaffes til laboratoriet

- *Isotermkalorimeter* til brug ved reaktionskinetiske undersøgelser af hærdnende cementpasta
- *Adiabatisk kalorimeter* til præcisionsmåling af hærdnende betons varmeudviklingsegen-skaber
- *DTA/TG-udstyr* til brug ved undersøgelse af dekomponeringsreaktioner i brandbelastede, cementbundne materialer
- *Dilatometer* til isoterm undersøgelse af svindfænomener i hærdnende cementpasta og cementmørtel

Forskningsgruppen arbejder for øjeblikket med at få indrettet et egentligt fysisk/kemisk la-boratorium i en anden bygningsfløj. Det er hensigten, at den teoretiske undervisning i *Ma-terialefysik* fremover skal underbygges med praktiske gruppeøvelser i laboratoriet, således at grundlæggende fysisk-kemiske fænomener kan demonstreres og afmystifiseres for de stude-rende. Indretning af dette laboratorium betyder samtidig en aflastning af betonlaboratoriet, idet mere delikate fysisk/kemiske og vådkemiske forskningsundersøgelser kan henlægges hertil.

De investeringer, der er forbundet med at indrette et forskningslaboratorium med moderne måle- og laboratorieudstyr, er betydelige. De fondsbevillinger, der er til rådighed, er begrænsede. Der er med andre ord nogle meget kontante, økonomiske "randbetingelser", vi må forholde os til i forskningen. Dette bringer os naturligt ind på forskningsgruppens forhold til omverdenen. Lad os her begynde med at registrere én glædelig begivenhed, som efter vor opfattelse betyder en væsentlig styrkelse dansk betonforskning, nemlig etableringen af

Universiteternes Betonforskning (UBF)

Fem institutter, engageret i betonforskning ved *Danmarks Tekniske Universitet, Aalborg Universitet og Aarhus Universitet*, har i foråret 1996 underskrevet en samarbejdsaftale, der sigter på at fremme forskning og undervisning på betonområdet. Denne samarbejdsaftale – benævnt *Universiteternes Betonforskning (UBF)* – omfatter følgende institutter

- Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer, Danmarks Tekniske Universitet
- Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet
- Institut for Anvendt Bygge- og Miljøteknik, Danmarks Tekniske Universitet
- Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitet
- Instrumentcenter for Faststof-NMR-spektroskopi, Aarhus Universitet

Med denne samarbejdsaftale er der skabt et vigtigt, fagligt netværk imellem institutterne. Det reelle indhold i denne aftale? – lad os se lidt på et par af de centrale paragraffer i aftalen.

Hovedpunkter i universiteternes samarbejdsaftale

Formålet med dannelsen af det faglige netværk er, at *samordne og fremme* universiteternes forskning og undervisning på betonområdet. Dette søges opnået gennem aktiviteter, beskrevet i aftalens paragraf 2, citeret i det følgende

§ 2. AKTIVITETER

- § 2.1 Fælles optræden i nationale diskussioner om betonforskning og -udvikling.
- § 2.2 Information om og koordination af institutternes basale egenfinansierede forskning.
- § 2.3 Fremme og koordinere ansøgninger til nationale og internationale projektforsæringskilder. UBF deltager ikke som ansøger. De deltagende institutter er selv ansvarlige.
- § 2.4 Arbejde på at få sat forskning i gang i universitetsmiljø uden for de traditionelle betoninstitutters kreds, således at den nødvendige tværfaglighed kan blive etableret.
- § 2.5 Information om og koordination af undervisningsforløb og undervisningsmaterialer på diplomingeniør-, civilingeniør- og Ph.D.-niveau.
- § 2.6 Udveksling af studerende og forskere mellem universiteterne i forbindelse med projektarbejde.
- § 2.7 Koordinering af udvikling og indkøb af apparatur og udstyr.
- § 2.8 Arrangement af et årligt betonforskningsmøde, evt. i samarbejde med Dansk Betonforening, for at orientere erhvervslivet og fremme samarbejde med industrien.

Med disse tiltag rører man åbentlyst ved nogle dybe og alvorlige "mangelsymptomer" i den hidtidige universitetsforskning på betonområdet. Det gælder forholdet til forskningsråd

og finansieringskilder, det gælder tværfagligheden i universiteternes forskning, det gælder samarbejdet om uddannelserne og – nok det *mest* afgørende – det gælder samspillet med erhvervslivet. Ikke mindst dette sidste forhold ligger forskningsgruppen *meget stærkt* på sinde, hvad der også fremgår af vores handlingsplan.

Er der så tale om realiteter – eller er det visioner og drømme? Vi føler os overbeviste om, at samarbejdsaftalens intentioner *vil* blive virkeliggjort. Om ikke andet, så er det i dag en simpel *nødvendighed*, at der skabes et samarbejde af denne art på universitetsniveau.

Arbejdet er begyndt

Det etablerede faglige netværk, UBF, afholdt sit første møde på *Instituttet for Bygningsteknik*, AAU, i dagene 7.-8. maj i år. På mødet fremlagde alle deltagende forskere en oversigt over igangværende forskning og undervisning. Endvidere var der på mødet indlæg om: "*Den videregående uddannelse inden for brandområdet*" hhv. "*Anvendelse af Informationsteknologi i undervisning*". På mødet aftalte man forhold omkring ledelsesform, faglige initiativer og kontaktopbygning. Resultatet af disse indledende øvelser er samlet i en *Proceedings* fra mødet [1].

Efterfølgende har en styringsgruppe med docent Anders Nielsen, BKM, som formand arbejdet med at iværksætte de aftalte aktioner. Interessant er i denne sammenhæng, at der allerede er etableret kontakt mellem UBF og *Dansk Teknologisk Institut*, (DTI), med henblik på et samarbejde, der bl.a. omfatter koordinering af strategiske planer og handlingsplaner. I forlængelse heraf er det hensigten, at UBF og DTI sammen vil arbejde på at skabe et aktivt samspil med dansk erhvervsliv. I dette samspil bør *Dansk Betonforening* naturligvis være medaktør.

Jo – *Universiteternes Betonforskning*, UBF, er i dag en realitet!

Program for Forskning, Udvikling og Undervisning

Vi har nu – ret detaljeret – redegjort for det faglige, for det fysiske og for det organisatoriske univers, forskningsgruppen: **Materialefysik og Betonteknologi** må forholde sig til. Med udgangspunkt heri vil vi omtale de tiltag, der er gjort på betonområdet og i hovedtræk skitsere den handlingsplan, vi arbejder ud fra. Vi vil herunder omtale det planlægningsarbejde, der er udført, give en oversigt over betonundervisningen samt omtale igangsatte og planlagte forskningsaktiviteter.

Baggrundsaktiviteter

Forskningsgruppen: **Materialefysik og Betonteknologi** ved Instituttet for Bygningsteknik, AAU, har efter etableringen pr. 1.2.1996 arbejdet med at definere en klar målsætning for den faglige og uddannelsesmæssige indsats med en tidshorisont på 5-10 år. Under dette arbejde har vi for en række nøgleområder i ord formuleret en klar og operationel beskrivelse af

- **Målsætning:** Hvilken forsknings- og uddannelsesmæssig status ønsker gruppen vi skal have om 10 år, og hvad ønsker vi, at gruppen fagligt skal have præsteret i denne periode
- **Aktioner:** Hvilke aktioner er nødvendige, hvilke laboratoriefaciliteter skal opbygges, og hvilke samarbejdsrelationer skal gruppen etablere for at nå dette mål
- **Succeskriterier:** Hvilke kriterier har vi for, at den forsknings- og undervisning, gruppen præsterer, er meningsfuld

Disse tre punkter er gennemarbejdet for en række nøgleområder; på grundlag heraf er der formuleret en kort og koncis beskrivelse af *Målsætning*, *Aktioner* og *Succeskriterier* inden for følgende områder

- **Faglige aktiviteter**, hvad angår *Forskning*, hhv. *Udvikling* og *Undervisning*
- **Samarbejdsrelationer**, dels hvad angår forskningsgruppens *Interne samarbejde* med andre faggrupper på Aalborg Universitet, dels hvad angår gruppens *Eksterne samarbejde* med danske og udenlandske forskningsinstitutioner og med erhvervslivet
- **Teknisk-administrative aktiviteter**, dvs. forhold omkring indretning og drift af *Betonlaboratorium*, omkring *Økonomi* samt for gruppens aktiviteter på *Edb-området*

I sammenhæng med denne FoU-planlægning har den foran omtalte samarbejdsaftale: *Universiteternes Betonforskning*, (UBF), naturligvis været en vigtig brik i jeres overvejelser.

En øvelse af denne art er på flere måder nyttig. Selve resultatet: *at man får bearbejdet og nedskrevet, hvad man vil – at man får et overblik over, hvad dette kræver – er nyttigt!* Vigtigere er måske selve processen: *det*, at man tvinges til at forholde sig realistisk til virkeligheden i sine valg! At vælge er jo uløseligt forbundet med det, at fravælge!

Det heromtalte planlægningsarbejde er afsluttet ved efterårssemestrets begyndelse. Med udgangspunkt i den lagte strategi er det dernæst gruppens hensigt at søge det nødvendige finansieringsgrundlag skabt gennem en langsigtet og systematisk indsats. I denne sammenhæng er UBF-initiativet ligeledes en vigtig parameter.

Betonundervisningen ved Institutet for Bygningsteknik

Ved Aalborg Universitet er undervisningen kendetegnet af den *problemorienterede, gruppeorganiserede studieform*, forstået på den måde, at udvalgte problemer i hvert semester bearbejdes i projektform gennem gruppearbejde; dette projektarbejde understøttes af sideløbende, tilpassede kurser for de studerende.

I studieplanen optager kurser og projektarbejde nogenlunde samme tid. Varighed af kurser og projektarbejde angives i såkaldte *moduler (M)*; det gælder, at

1 kursusmodul = 5 minimoduler á 4 timer = 20 timer

1 projektmodul = 6 minimoduler á 4 timer = 24 timer

Et minimodul (4 timer) disponeres typisk således, at halvdelen af tiden udnyttes til forelæsninger og gennemgang af stof og halvdelen til gruppearbejde med øvelsesopgaver i stoffet. Et semester består af ialt 30 moduler, incl. eksamen.

I det følgende er angivet en oversigt over obligatoriske kurser inden for emnerne *betonteknologi* og *betonkonstruktioner*, samt oplysninger om disse kursers placering og omfang.

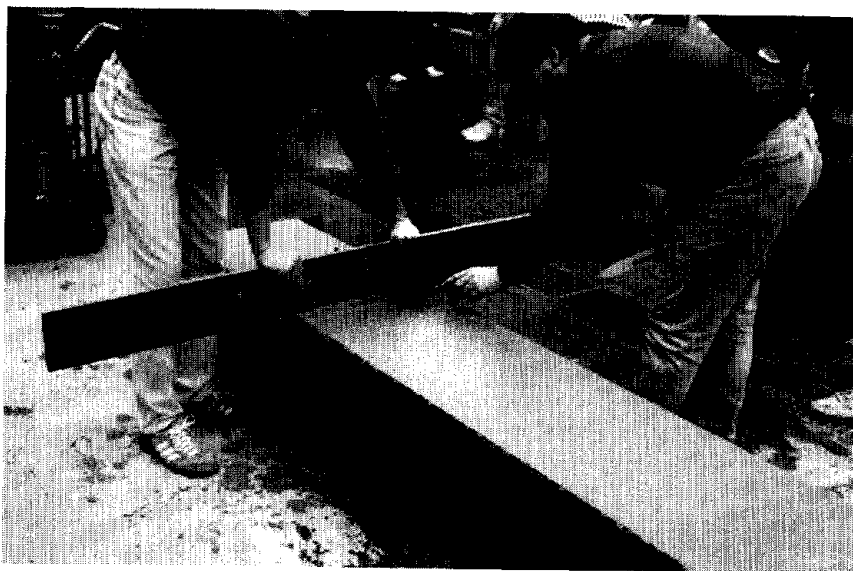
Tidspunkt	Emne	Varighed
4. semester	Betonkonstruktioner	2 kursusmoduler
	Betontechnologi	1 kursusmodul
	Projektarbejde, incl. lab.forsøg	11 projektmoduler
	Betontechnologi, laboratorium	0.5 projektmodul
5. semester	Materialefysik	2 kursusmoduler
6. semester	Spændbeton	1 kursusmodul
	Montagebyggeri	1 kursusmodul
	Betonkonstruktioners holdbarhed	1 kursusmodul
	Hærdeteknologi	1 kursusmodul
	Betonkonstruktioner	8 projektmoduler

På 9. semester tilbydes en række valgfrie kurser inden for *betontechnologi* og *betonkonstruktioner*. På 9. og 10. semester har de studerende endvidere mulighed for at specialisere sig i

betonemner gennem valg af projekter.

Diplom- og civilingeniøruddannelsen ved *Aalborg Universitet* er enstrengt, idet begge retninger er fælles til og med 6. semester. En diplomingeniør udarbejder nu et afgangsprojekt i det 7. semester; dette projekt kan helt eller delvist omhandle et emne inden for *betonteknologi* eller *betonkonstruktion*.

En civilingeniør fortsætter med kursus- og projektvirksomhed gennem 7., 8. og 9. semester, hvorefter der på 10. semester udarbejdes et afsluttende eksamensprojekt. Dette kan ligeledes omhandle emner inden for *betonteknologi* eller *betonkonstruktion*.



Kornkurver og forskyningsarmering, integraler og differentialer – det hele bliver meningsfyldt, hvis man selv gennemlever processen fra de rå tilslagsmaterialer til de sitrende måleure, når den hærdede T-bjælke går i brud på spændeplanet. To ingeniørstuderende på 4. halvår afretter "deres" armerede bjælke i det nyindrettede betonlaboratorium ved Institutet for Bygningsteknik. Kan en husmoder gøre det mere nænsomt?

På undervisningsområdet forventer vi, at det største udviklingspotentiale ligger i en videreudvikling og implementering af disciplinen *Materialefysik*. Dette potentiale ligger bl.a. i at vi i projektarbejder, specielt eksamensprojekter og Ph.D.-projekter, kan arbejde med nye og givtige aspekter i materialeforskningen, ikke mindst på betonområdet.

Materialefysikken skaber samtidig nye og interessante, forskningsmæssige fællesnævne og samarbejdsmuligheder til discipliner som eksempelvis *Klimateknik*, *Miljøteknik* og *Brandforskning*. Vi har derfor i oplæg til B-studienævnet arbejdet med forslag til kursusformer, der udnytter disse muligheder. Eksempler herpå er videregående kurser i emner som: *Korrosionsteori*, *Transportfænomener* og *Materialemodellering*.

Under ét må det nok siges, at studerende, der ønsker at specialisere sig i emner inden for *betonteknologi* eller *betonkonstruktioner*, har mulighed for at få en faglig stærk uddannelse ved *Aalborg Universitet*.

Betonteknologisk forskning og Udvikling

Forskningsmæssigt vil vi systematisk koncentrere den teoretiske og eksperimentelle indsats omkring to udvalgte hovedområder. Der er dels tale om et "klassisk" betonteknologisk område, dels tale om et nyt indsatsområde – *perkolations teori* – som vi forventer vil komme til at spille en afgørende rolle inden for materialeforskningen i de kommende år. De hovedområder, vi vil koncentrere indsatsen om, er

- **Hærdeteknologi for cementbundne materialer**, herunder studier af *hydratiseringsprocesser* og *hydratiseringskinetik* gennem isotherm/adiabatisk kalorimetri og ved undersøgelse af kemisk/geometrisk svind
- **Permeabilitet af porøse materialer**, herunder især studier med udgangspunkt i *perkolations teori* og teoretiske og eksperimentelle studier af poresystemers *konnektivitet*

Efter vor opfattelse er den hærdeteknologiske beskrivelse af nye betontyper med høj styrke og stor tæthed et vigtigt indsatsområde. Karakteristisk for disse, såkaldte *høj kvalitetsbetoner*, er et lavt v/c-forhold kombineret med tilsætning af puzzolaner som flyveaske og mikrosilica. Dette har dels afgørende indflydelse på betonens varmeudvikling og hærdedeforløb, dels medfører det et autogent svind, der kan udløse skadelige revnedannelser i hærdnende, temperaturbelastede konstruktionstværsnit. På dette indsatsområde ligger der efter vor opfattelse et umiddelbart behov for en forsknings- og udviklingsindsats.

Et indsatsområde, der i de næste 10-20 år vil komme til at ændre beskrivelsen af porøse materialers fysik radikalt, er efter vor opfattelse de nye, matematiske analyseværktøjer, der er ved at blive skabt omkring disciplinerne: *Kaosteori*, *Fraktalteori* og *Perkolations teori*. I dette matematisk/fysiske grænseområde, der oprindeligt blev kendt gennem fascinerende, selv-similære geometriske figurer, er der i dag ved at blive skabt et spændende, nyt værktøj til beskrivelse af porøse materialers struktur [2], [3], [4]. Vi ønsker alvorligt at lægge en billet ind på den udvikling, der vil komme på området, bl.a. inden for betontechnologien!

Herudover vil vi tage opgaver op, der illustrerer anvendelsen af *Materiale fysik* inden for materialeforskningen, herunder specielt betonforskningen. Som eksempler på emner, dette bringer på tale, kan nævnes

- **Materialer og brand** med hovedvægt på materialeaspektet som dette f.eks. giver sig til kende gennem termiske *dekomponeringsreaktioner* og *tryk opbygning* i brandpåvirket beton, samt forskellige muligheder for "aktiv" brandsikring gennem kompositopbygning af tværsnit
- **Holdbarhed af beton** med hovedvægt på undersøgelse af fysisk/kemiske aspekter i forbindelse med betons nedbrydningsreaktioner

Vi vil fremover udbygge disciplinen *Materiale fysik* [5], [6] inden for Instituttets undervisning. Vi bruger ordet *Materiale fysik* i betydningen: en moderne, grundfagsbaseret materiallære, formuleret på bygningsingeniørens præmisser. Allerede gennemførte studenterprojekter har vist, at disciplinen åbner en række nye muligheder i undervisningen og i det teoretiske og eksperimentelle arbejde med bl.a. beskrivelse af materialers opførsel under brandpåvirkning, [7], [8]; det er netop ét af de forskningsområder, vi vil søge udbygget i de kommende år.

Iværksatte forskningsaktiviteter

På nuværende tidspunkt har vi iværksat to forskningsprojekter som led i Ph.D.-forskeruddannelserne. Der er dels tale om et Ph.D.-projekt under det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, dels tale om et erhvervsforsker Ph.D.-projekt i ATV-regi. Projekterne omfatter

1. Aktiveringsenergi af hærdnende portlandcement systemer

Ph.D.-projekt under det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet. Projektet sigter på at videreudvikle et matematisk/fysisk koncept for en ny temperaturfunktion til brug ved hærdeberegninger. Gennem et tidligere Ph.D.-projekt: *Reaktionskinetik og temperatureffekt i portland cement systemer med mikrosilica af flyveaske*, [9], er der skitseret et grundlæggende koncept for en revideret modenhedsfunktion defineret ud fra konsekutive reaktioner med forskellig aktiveringsenergi. Af modellen følger implicit en differentialligning for egenskabsudvikling, som indeholder informationer om temperaturens og partikelstørrelsesfordelingens indflydelse på aktiveringsenergien. I projektet indgår endvidere udvikling af en ny, differentiell måleteknik til bestemmelse af hærdnende cementsystemers aktiveringsenergi.

Det forventes, at der gennem dette projekt opbygges personlige kontakter og forskningsmæssige relationer såvel til *Trondheim Universitet* som til *Delft University of Technology*.

2. Bedømmelse af betonafløbsledningers restlevetid

Erhvervsforsker Ph.D.-projekt i ATV-regi. Projektet er ansøgt sammen med rådgivende ingeniørfirma *Nellemann, Nielsen & Rauschenberger A/S*; I projektet deltager endvidere de to danske rørproducentforeninger: *ig-gruppen* og *Eurorør-gruppen* som trediepart, ligesom disse brancheforeninger bidrager til projektets finansiering.

Sigtet med projektet er at udvikle et analyseværktøj til brug ved prioritering og planlægning af renoveringsarbejder for afløbssystemer i beton. I projektet indgår bl.a. udarbejdelse af et beregningsgrundlag for stokastisk analyse af sammensatte afløbsledningers pålidelighed på grundlag af de enkelte rørelementers svigtsandsynlighed. I forbindelse med projektet gennemføres i samarbejde med kommunale forvaltninger en kvalitetsorienteret kortlægning af rørbranchens udvikling samt en laboratorieundersøgelse af betonrør med "kendt" historie fra renoveringsarbejder. Endelig sigter projektet på at udvikle, indlære og afprøve *Neurale netværksmodeller* til brug ved tilstandsvurderinger.

Som led i dette projektet opbygges kontakter til *Institut For Vassbygging*, (IVB), ved Universitetet i Trondheim, hvor man har påbegyndt en forskning på dette område.

En ny betonprofessors visioner 2

Visioner – drømme – er skabt af så let stof – er så flygtigt søde og æteriske, at de ikke kan indfanges og nedskrives på almindeligt papir. Har de ikke ståsted i at *ville*, skifter de umærkeligt ansigt – bliver til noget andet – til *lufkasteller*! Derfor skal de omgås med ydmyghed!

Jovist – vi har visioner – vi har drømme!

Vi har opridset det univers, vi tilhører. Vi har med grov pensel skitseret nogle af de opgaver, vi vil lægge vore kræfter i. Det vil vi, fordi vi har en hemmelig drøm

- det er drømmen om, at vi gennem målbevidst arbejde kan skabe et attraktivt og udfordrende fagligt miljø ved *Instituttet for Bygningsteknik*, som kan samle en gruppe af dygtige unge universitetsstuderende og universitetsforskere omkring nogle vigtige opgaver inden for dansk materialeforskning
- det er drømmen om, at vi kan bidrage til den faglige udvikling af forskningen på materialeområdet, og at vi kan gøre det i et nært samspil med dansk byggeindustri

Men *det* er en hemmelig drøm! – så *den* afslører vi *ikke*!

Litteraturliste

- [1] Universiteternes Betonforskning: *Proceedings*, Møde maj 1996, Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitet, Aalborg, maj 1996
- [2] Peitgen, H & Jürgens, H & Saupe, D.: *Chaos and Fractals, New Frontiers of Science*, Springer Verlag New York, Inc. (1992)
- [3] Kaye, B.H.: *A Random Walk Through Fractal Dimensions*, VCH Weinheim, (1994)
- [4] Feder, J.: *Fractals*, Plenum Press, New York, (1988)
- [5] Freiesleben Hansen, P.: *Materialefysik for bygningsingeniører, Beregningsgrundlag*, SBI-Anvisning 183, Statens Byggeforskningsinstitut, (1995)
- [6] Freiesleben Hansen, P & Jehrbo Jensen, J.K.: *Materialefysik for bygningsingeniører, Opgavesamling 1994*, Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitet, (1994)
- [7] Lapertis, F. & Nygaard, M.: *Temperature Distribution in Fire Exposed Concrete Structures*, Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, (1995)
- [8] Lapertis, F. & Nygaard, M.: *Temperature and Pressure Relations in Fire Exposed High Strength Concrete Structures*, Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, (1995)
- [9] Schaumann, J.: *Reaktionskinetik og temperatureffekt i portland cement systemer med mikrosilica og flyveaske*, Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitet, (1995)

Carl Bro as
Rådgivende ingeniører F.R.I
Schngårdsholmsvej 2
9000 Aalborg

Monolitisk elementbyggeri

af

Per H. Villadsen

Juli 1996

Indholdsfortegnelse

Side

0.	Indledning	47
1.	Baggrund	47
2.	Idé	48
3.	Projektudvikling	49
4.	Dokumentation	49
5.	Projektering og gennemførelse	52

MONOLITISK ELEMENTBYGGERI

Et nyt byggesystem har set dagens lys ved opførelsen af Aalborg Universitet - 8. byggeafsnit

0. Indledning

Hovedoverskriften for dette udviklingsprojekt har været fleksibilitet. Med andre ord "at udvikle et fleksibelt konstruktions-system inden for kontor- og undervisningsbyggeriet under behørig hensyntagen til økonomi og byggetid".

Sidste gang der i større målestok har været arbejdet med fleksibilitet indenfor byggeriet var i 1983 i forbindelse med Boligministeriets konkurrence om fleksible boliger. Der var mange gode ideer fremme i den konkurrence, men på grund af, at der er andre funktionskrav til kontor- og undervisningsbyggeri, kan løsningerne fra boligbyggeriet ikke anvendes. Det er f.eks. kravet til store spændvidder, altså store søjlefri rum, som boligkonkurrencen ikke kunne honorere.

Vi ved, at man kan opnå fleksible løsninger med store spændvidder, såfremt man støber hele den bærende konstruktion på stedet. En meget langsommelig proces, som stort set ikke benyttes i moderne, dansk byggeri.

Det vi nu har fundet frem til er populært sagt at udføre en "støbt på stedet konstruktion" som elementbyggeri. Derved kan vi kombinere fordelene fra den insitu støbte konstruktion omkring fleksibilitet med fordelene fra det almindelige elementbyggeri vedrørende økonomi og byggetid.

1. Baggrund

Det er nu næsten 20 år siden, planlægningen og projekteringen af AAU's 1. byggeafsnit fandt sted. Efter at have gennemført 7. byggeafsnit i en næsten konstant byggerytme, hvor de arkitektoniske og ingeniørmæssige hovedideer, som blev skabt i forbindelse med 1. byggeafsnit, er blevet videreført gennem alle byggeafsnitene, var tiden nu inde til at foretage nytænkning.

Forklaringen er bl.a., at der, siden 1. afsnit blev projekteret, er fremkommet en række ændrede bygningsreglementskrav til f.eks. isolering, lyd m.v. samt at de senere års kraftige udvikling på

installationsområdet (intelligente huse m.v.) bør få indflydelse på et nybyggeri.

De lovmæssige ændringer, der er sket gennem årene, er naturligvis indarbejdet i forbindelse med en løbende udvikling, der har været fra byggeafsnit til byggeafsnit, og det er også indtrykket, at det såvel arkitektonisk som funktionsmæssigt er en meget tilfredsstillende bebyggelse. Men de mange tilpasninger, der har fundet sted, har efterhånden låst byggesystemet fast uden de store muligheder for udvikling.

2. Idé

Normale betonelementsystemer består af søjler, bjælker og dakelementer. I det nye system sammenstøbes dakelementerne med en stålfiberarmeret specialmørtel. Samlingerne muliggør elementbyggerier, hvor det bærende system består af én stor sammenhængende betonplade understøttet af søjler i et net på 6 x 6 m.

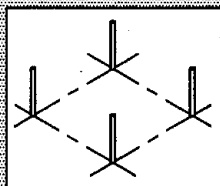
Systemet opbygges af præfabrikerede betonelementer i dimensioner, der tillader normal transport fra elementfabrik til byggeplads.

Systemet medfører, at arkitekterne får langt større frihed i plan- og facadeudformningen. De indvendige vægge kan placeres frit på dækket, og facadeudformningen bliver helt uafhængig af konstruktionssystemet.

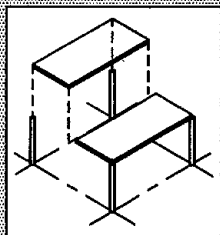
Samtidig får ingeniørerne bedre plads til at fremføre installationerne, når der ikke længere skal tages hensyn til bjælker, der rager ned fra loftet.

Bygherren opnår den meget store fleksibilitet, der er ønskværdig i byggerier, hvor indretningen stadig undergår ændringer afhængigt af de skiftende bruges behov.

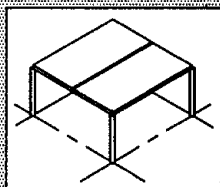
Systemet er ideelt til undervisnings- og forskningsbygningen samt til kontorbygninger med mange installationer.



Først markeres søjlerne i et mønster på 6 x 6 meter.



Betonelementerne placeres med en indbyrdes afstand på 10 centimeter.



Fugen udfyldes med specialmørtel.

3. Projektudvikling

I forbindelse med udbygningen af Aalborg Universitet har Undervisningsministeriet, Byggedirektoratet ønsket at udvikle et nyt byggesystem, der skal tilgodese såvel en fleksibel bygningsudformning som frie indretnings- og ombygningsmuligheder samt gode muligheder for installationsføringer.

For at opfylde disse krav blev der fremsat ønske om, at bygningsens konstruktive opbygning kunne være et søjle-/pladesystem med 6 x 6 m søjleafstand, primært udført af præfabrikerede bygningsdele.

Teknikergruppen Dall & Lindhardt A/S og Carl Bro as udførte i perioden januar-februar 1994 en screening af mulige løsninger for et sådant konstruktivt system. Konklusionen af screeningen var, at man anbefalede at arbejde videre med en løsning, hvor man samler præfabrikerede betonelementer bøjningsstift ved sammenstøbning med stålfiberarmeret densitmørtel.

Den stålfiberarmerede densit er udviklet af Aalborg Portland. I forbindelse med udvikling og afprøvning af materialet har Aalborg Portland deltaget i et EUREKA-projekt, hvor forskellige egen-skaber er afprøvet. I øjeblikket deltager Aalborg Portland og Carl Bro Gruppen i et BRITE-EuRam-projekt "MINISTRUCT", hvis hovedformål er at udvikle design- og beregningsmetoder for armerede konstruktioner med stålfiberarmeret densitmørtel.

For at underbygge tidligere udførte forankringsforsøg samt for at overføre disse rene trækforsøg til bøjningsforsøg er følgende afprøvningsprogram udført:

- Forankringsforsøg
- Bjælkeforsøg
- Pladeforsøg
- Brandforsøg

Forankringsforsøgene er udført på Cement- og Betonlaboratoriet i Aalborg. Forsøgene er en del af MINISTRUCT-projektet, og de afrapporteres i forbindelse med dette projekt.

De øvrige forsøg er udført for Undervisningsministeriet, Byggedirektoratet på Aalborg Universitet, Instituttet for Bygnings-teknik's laboratorier i Aalborg.

4. Dokumentation

Konstruktionssystemet er opbygget af betonelementer på 3 x 6 m, der samles til en kontinuert plade understøttet af søjler med 6 x 6 m afstand. Den afprøvede samlingsmetode er ikke bundet til ét byggesystem, som det her beskrives, men kan generelt anvendes til samling af betonelementer, hvor der ønskes overført momenter i samlingerne.

Samlingen er overordentlig enkel, idet den etableres ved, at pladeelementerne placeres med 100 mm afstand, og pladernes

hovedarmering rager 80 mm ind i fugen. Oven på denne hovedarmering placeres en tværgående fugearmering, og efter monteringen udstøbes fugen med stålfiberarmeret densitmørtel.

Der er udført i alt 18 bøjningsforsøg med bjælker, hvor hver bjælke består af 2 elementdele, der er sammenstøbt på midten med stålfiberarmeret densitmørtel.

Der er varieret på hovedarmeringens placering, således at den vandrette afstand mellem de armeringsstænger, der stødes, i det ene tilfælde er størst mulig, og i det andet tilfælde er mindst mulig. Der er varieret på hovedarmeringens indstøbningsdybde (fra 40 til 80 mm) i fugemørtelen, og endelig er den tværgående fugearmering placeret enten over eller under hovedarmeringen.

Resultatet af bjælkeforsøgene viser, at samlinger med hovedarmeringens indstøbningsdybde på 60 mm eller mere optræder som overordentlig plastiske og med fuld udnyttelse af hovedarmeringen. Samlingen kan udføres med hovedarmeringen ud for hinanden eller forskudt i fugen, og de kan udføres med den tværgående fugearmering over eller under hovedarmeringen, uden det berører fugens styrke eller dens plastiske virkemåde.

På baggrund af de udførte bjælkeforsøg er udvalgt en endelig udformning af samlingerne. De består af en 100 mm fuge med en KS 550 S pladearmering, $d = 8$ mm, per 100 mm ragende 80 mm ind i fugen. Armeringsjernene fra pladedelene placeres ud for hinanden. Fugearmeringen består af 2 stk. KS 550 S, $d = 6$ mm, placeret oven på hovedarmeringen. De efterfølgende plade- og brandforsøg er udført med denne samlingsudformning, idet der dog er taget hensyn til de tolerancer, der skal kunne accepteres ved en praktisk anvendelse af samlingerne, ved at fugebredden i forsøgene er 116 mm, og hovedarmeringens indstøbningsdybde er 75 mm.

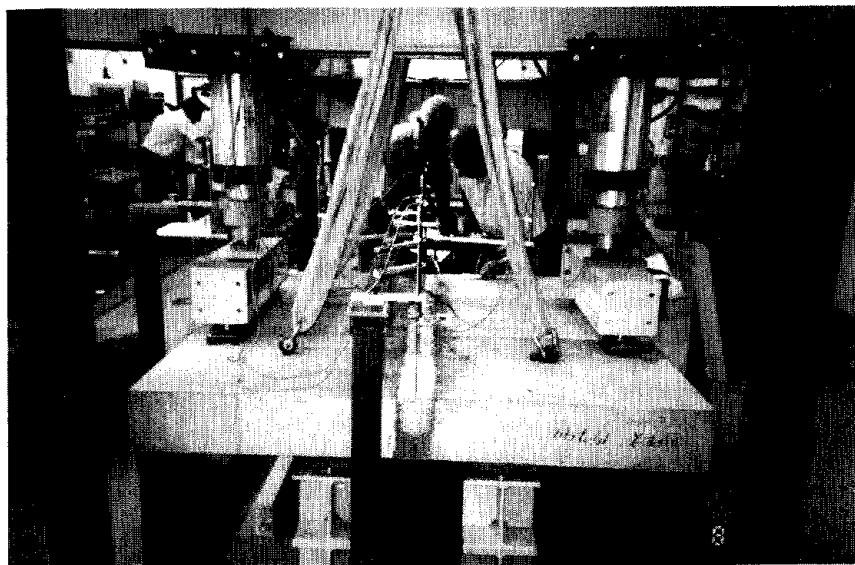
Der er udført 4 forskellige typer pladeforsøg, hvor hver type svarer til en situation i den færdige søjle-plade konstruktion. I alt er udført 15 pladeforsøg.

Type 1 er med positive hovedmomenter vinkelret på hinanden, og fugen placeret ved det ene hovedmoment.

Type 2 er med positive og negative hovedmomenter vinkelret på hinanden, og fugen placeret parallelt med det negative hovedmoment.

Type 3 er krydspunktet af 4 pladedele over en søjle.

Type 4 er en plade over en hjørnesøjle.



Belastnings- og understøtningsarrangement for pladetype 2A

Resultatet af pladeforsøgene viser, at der kan regnes med fuld styrke og plasticitet, uanset om der i en plade er positivt eller negativt moment på tværs af et positivt moment i en samling. Af symmetri Grunde gælder det samme for en samling med negativt moment, blot armeringen er placeret i pladernes overside.

Brandprøvningen bestod af i alt 8 bjælkeforsøg, hvoraf 6 forsøg er udført med brandpåvirkning, og 2 forsøg er udført uden brandpåvirkning, således at der fremkommer en referenceværdi for bæreevnen. Af de 6 bjælker, der er brandprøvet, er 3 med kort udtørningstid og brandpåvirket fra undersiden alene, 1 er med kort udtørningstid og brandpåvirket fra undersiden og fra siderne, og 2 er med lang udtørningstid og brandpåvirket fra undersiden.

Resultatet af brandforsøgene er, at alle de brandpåvirkede bjælker klarede en standardbrand på 60 min. med en belastning svarende til et moment i fugen på 9,1 kNm. Et af brandforsøgene blev fortsat, indtil brud indtraf som et plastisk bøjningsbrud efter 97 min. De øvrige brandforsøg blev afbrudt efter 60 min., og efter afkøling blev restbæreevnen prøvet.

Restbæreevnen viste ingen afhængighed af udtørningstid eller antal sider med brandpåvirkning. Bæreevnen målt til ca. 75% af bæreevnen før brand. Ved bestemmelse af restbæreevnen indtraf brud for alle bjælkerne ved forankringssvigt af hovedarmeringen i fugerne, d.v.s. brandpåvirkningen påvirker forankringsevnen.

Ved bjælker med kort udtørringstid forekom afskalninger i bjælkernes underside, mens der ikke var afskalninger i bjælkerne med lang udtørringstid.

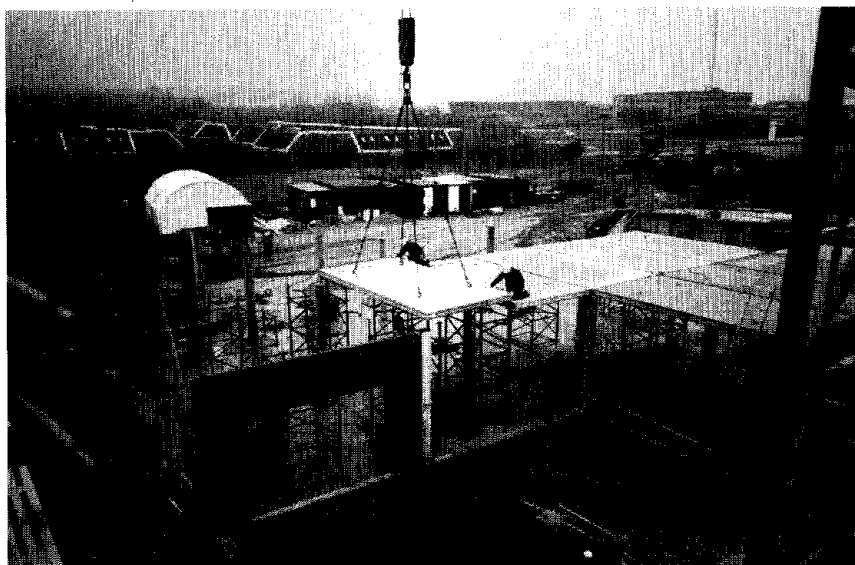
Alt i alt har forsøgene vist, at den undersøgte samlingstype kan forankre armeringen fuldt ud, således at samlingen er plastisk, og tværsnittets bæreevne kan beregnes efter de sædvanlige beregningsmetoder for armeret beton. Samlingen kan uden yderligere foranstaltninger indgå i en BS 60 konstruktion.

Endelig viser den praktiske udførelse af prøvelegemerne, at den anvendte stålfiberarmerede densitmørtel er let at arbejde med ved den her anvendte recept og fugeudformning.

5. Projektering og gennemførelse

Det nye byggesystem er blevet afprøvet i forbindelse med opførelsen af 8. byggeafsnit ved Aalborg Universitet. På grund af den stramme tidsplan for gennemførelsen af byggeriet viste det sig hurtigt nødvendigt at projektere parallelt med udviklingen af det nye byggesystem. For at have en "ventil", såfremt det avancerede eksperiment ikke skulle leve op til forventningerne, anvendte vi helt det samme modul som de tidligere AAU-byggerier og havde derved mulighed for at gå tilbage til den tidligere anvendte byggemetode, såfremt den nyudviklede teknik skulle give uventede problemer. Men det gik godt. Byggeriet blev færdigprojekteret og udbudt i fagdelt, offentlig licitation. Højgaard & Schultz A/S blev billigst på råhusentreprisen og fik overdraget at gennemføre det nye byggesystem. Det accepterede tilbud på råhuset svarede til de udarbejdede overslag, hvilket igen vil sige, at det nyudviklede konstruktive system prismæssigt er på niveau med det tidligere anvendte princip.

På trods af en hård og langvarig vinter 95/96 bliver byggeriet afleveret og ibrugtaget som planlagt i september måned 1996.



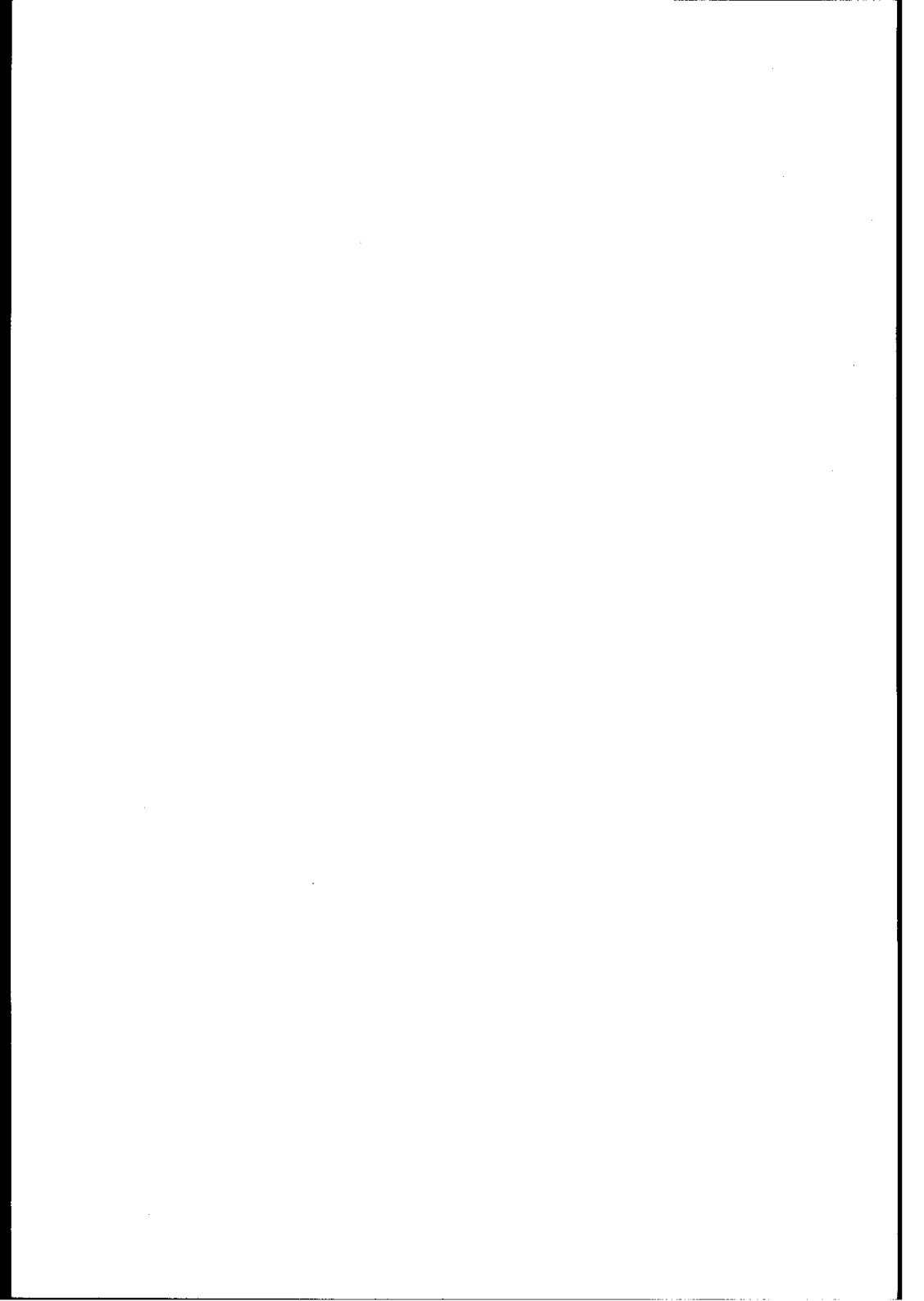
Endnu et betonelement hejses på plads oven på søjlerne, inden samlingen udstøbes.

BETONELEMENT-FORENINGEN
Nørre Voldgade 106
Postboks 28
1002 København K

Brandpåvirkede betonkonstruktioners bæreevne

af

Svend Röttig



Brandpåvirkede betonkonstruktioners bæreevne

Bygningsreglementet (BR95) indeholder et antal eksempler på betonkonstruktioner, som uden yderligere beregning kan regnes at være bæredygtige under brandpåvirkning. Eksemplerne i BR95 er ændret i forhold til den tilsvarende eksempelsamling i det tidligere reglement. På grund af revisionen af bygningsreglementet er det i stor udstrækning blevet nødvendigt at foretage en egentlig dokumentation af bæreevnen under brand (DS 409, lastkomb. 4) i lighed med de øvrige kolde lastkombinationer. DTI har, på foranledning af Betonelement-Foreningen, fundet det nødvendigt, at der udarbejdes et beregningsgrundlag, der fremover kan betragtes som værende gyldigt ved eftervisning af brandmæssig modstandsevne. Dette grundlag er beskrevet i omstående rapport udarbejdet af DTI Byggeri.



DTI

Brandpåvirkede betonkonstruktioners bæreevne

Udført af:
Erik Steen Pedersen
Helle Spange
Betoncentret, DTI Byggeri

Taastrup, den 12. juli 1996

Indholdsfortegnelse**Side**

2	Beregningsmodel	62
2.1	Konstruktionstyper	62
2.2	Temperaturer	62
2.3	Spændinger	62
2.3.1	Termiske tøjninger	63
2.3.2	Transient tøjning	63
2.3.3	Krybetøjninger	63
2.3.4	Arbejdskurve for beton	63
2.3.5	Arbejdskurve for armeringsstål	64
2.3.6	Snitkræfter	64
2.3.7	Beregningsprocedure	68
3	Materialeegenskaber	69
3.1	Beton	69
3.2	Armering	70
4	Sikkerheder	70
5	Beregning af vægelement	71
5.1	Brandbelastning	71
5.2	Materialer	71
5.3	Konstruktion	71
5.4	Statisk last	71
5.5	Resultater	72
6	Følsomhedsanalyse	73
6.1	Betontyper	73
6.2	Tværsnitsgeometri/Armeringsarrangement	74
6.3	Understøtningsforhold	75
6.4	Vurdering af følsomhedsanalyse	76
6.4.1	Betontype	76
6.4.2	Tværsnitsgeometri/Armeringsarrangement	76
6.4.3	Understøtningsforhold	76
7	Brandtekniske eksempler	77
8	Konklusion	78
9	Litteratur	79

Bilag 1 - 10

1 Indledning

Bygningsreglementet (BR95) indeholder et antal eksempler på betonkonstruktioner, som uden yderligere beregning kan regnes at være bæredygtige under brandpåvirkning. Eksemplerne i BR95 er ændret i forhold til den tilsvarende eksempelsamling i det tidligere reglement. Der er således for flere typisk forekommende betonkonstruktioner blevet tilføjet en maksimal søjlelængde.

På grund af revisionen af bygningsreglementet er det i stor udstrækning blevet nødvendigt at foretage en egentlig dokumentation af bæreevnen under brand (DS 409, lastkomb. 4) i lighed med de øvrige kolde lastkombinationer.

DS 411 udtaler i kap. 9.2, at der under brand skal tages hensyn til:

- materialeegenskabernes temperaturafhængighed
- temperaturforårsagede deformationer.

Der gives ingen vejledning i bestemmelsen af de temperaturforårsagede deformationer. Med hensyn til materialeegenskaber under brandpåvirkning, udtaler DS 411 sig om, hvorledes betons og armeringsståls styrke reduceres med stigende temperatur. Der gives ikke information om, hvorledes materialernes stivhed ændres.

Da beregningsmæssig eftervisning af søjlers og vægges bæreevne under brand kræver kendskab til både materialernes stivhed og længdeudvidelseskoefficienter, er grundlaget i DS 411 altså ikke dækkende.

DTI har, på foranledning af Betonelement-Foreningen, fundet det nødvendigt, at der udarbejdes et beregningsgrundlag, der fremover kan betragtes som værende gyldigt ved eftervisning af brandmæssig modstandsevne. Nærværende rapport er udarbejdet af DTI Byggeri i samarbejde med Kristian Hertz, der har deltaget i udarbejdelsen af brandafsnittet til den europæiske betonnorm ENV 1992-1-2.

Rapporten indeholder:

- en beregningsmodel, som tager højde for betonens og armeringens egenskaber som funktion af temperaturen
- materialeegenskaber for 3 beton-sammensætninger
- en følsomhedsanalyse, som kortlægger indflydelsen af variationer i betonsammensætning, understøtningsforhold og tværsnitsgeometri på vægges bæreevne under brand
- en række praktiske eksempler, bl.a. svarende til de "brandtekniske eksempler" i BR95.

Nærværende rapport ligger til grund for de beregningsmetoder, som er indbygget i det af DTI udviklede beregningsprogram FIRE-2D.

2 Beregningsmodel

2.1 Konstruktionstyper

Beregningsmodellen omfatter beregning af bjælke- og søjletværsnit udsat for en- eller flersidet brandpåvirkning. Tværsnittene kan have en vilkårlig polygonal geometri. Der foretages en simulering af såvel temperaturer som spændinger under brandforløbet.

2.2 Temperaturer

Temperaturfeltet over tværsnittet, herunder variationen i tiden, bestemmes vha. en numerisk løsning af varmeledningsligningen. Denne løsning afhænger af de termiske randbetingelser og af betonens varmeledningsevne og varmefylde som funktion af tid eller temperatur. Det forudsættes at dæklaget er intakt.

De termiske randbetingelser gives i ENV 1991-2-2 [4]. Denne angiver hvilke forløb af temperaturer og transmissionskoefficienter, som kan forudsættes under brandpåvirkning efter CEN-normerne.

Betonens varmeledningsevne og varmefylde bestemmes for de aktuelle betoner bl.a med støtte i Appendix 1 i ENV 1992-1-2 [5] og i Hertz [2] og [3].

2.3 Spændinger

Spændingerne vinkelret på tværsnittets plan bestemmes. Disse spændinger afhænger af:

- snitkræfter hidrørende fra ydre laste
- termiske tøjninger
- transiente tøjninger
- krybetøjninger
- betonens arbejdskurve som funktion af temperaturen
- armeringens arbejdskurve som funktion af temperaturen.

Den brandpåvirkede konstruktions bæreevne mht forskydning, forankring etc, kan ifølge ENV 1992-1-2 [5] bestemmes som for kolde konstruktioner, når blot der tages hensyn til, at styrkerne reduceres under brandpåvirkning. I denne rapport bestemmes alene bæreevner med hensyn til bøjning og normalkraft, mens forskydningsbæreevne, forankring etc. ikke behandles.

2.3.1 Termiske tøjninger

Temperaturudvidelseskoeficienten for beton og armeringsstål fastsættes med støtte i Anderberg [6] og Hertz [1] og [2].

2.3.2 Transient tøjning

Forsøg viser, at temperaturbevægelserne i beton afhænger af spændingsniveauet. Dette kan iht. Hertz [1] beskrives ved et transient tøjningsbidrag givet ved:

$$\delta \varepsilon_{trans} = -2.35 \cdot \frac{\sigma}{f_{cc20}} \cdot \delta \varepsilon_{th}$$

Dette tøjningsbidrag fås ved ændringen af den termiske tøjning $\delta \varepsilon_{th}$, når spændingen er σ og f_{cc20} er trykstyrken ved 20°C.

2.3.3 Krybetøjninger

Der ses bort fra krybning i betonen, idet tøjningsbidragene herfra anses for at være negligeable indenfor 2 timers brandpåvirkning (jvf. ENV 1992-1-2 [5] afsnit 4.4.3).

I følge Anderberg [6] begynder krybning at have betydning for varmtvalset stål ved 400°C og for kolddeformeret stål ved 250°C. I nærværende beregningsgrundlag ses bort fra krybning i armering.

2.3.4 Arbejdskurve for beton

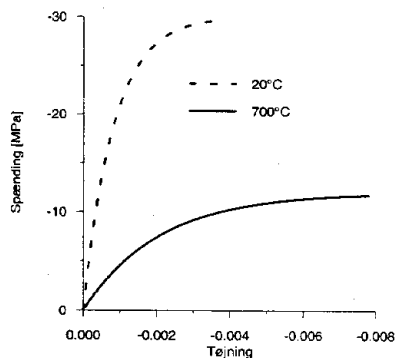
Betonens arbejdskurve ændres som funktion af temperaturen. Som udgangspunkt anvendes en arbejdskurve, der ved 20°C kan beskrives iht. Hertz [1] som:

$$\sigma_c = f_{cc20} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_{c0}}{f_{cc20}} \cdot \varepsilon}\right)$$

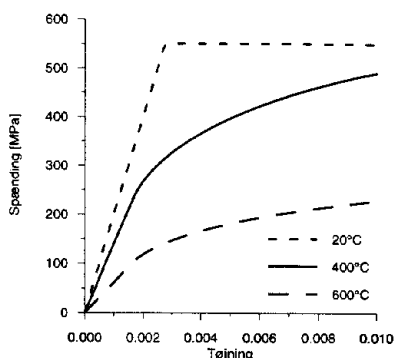
hvor f_{cc20} er trykstyrken ved 20°C og E_{c0} er begyndelses E-modulet ved 20°C.

Med den valgte arbejdskurve aftager E-modulet lineært mellem begyndelsesværdien og nul, når spændingen vokser fra nul til trykstyrken. Samme princip anvendes i DS411 ved beregning af bjælkesøjler efter metode I.

Afhængigt af temperaturen transformeres arbejdskurven, som gælder ved 20°C over i en ny iht. [1]. Et punkt (ε, σ) på arbejdskurven svarende til 20°C afbildes i $(\varepsilon/\xi_c, \sigma \cdot \xi_c)$ hvor ξ_c er reduktionsfaktoren for trykstyrken af den varmepåvirkede beton. Denne reduktionsfaktor er afhængig af betonsammensætningen. Figur 1 viser et eksempel på betonens arbejdskurve under brand.



Figur 1 Betonarbejdskurve som funktion af temperaturen.



Figur 2 Armeringsarbejdskurve som funktion af temperaturen.

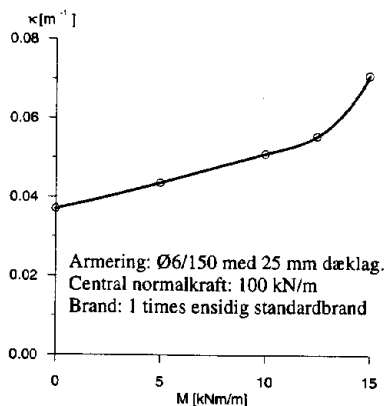
2.3.5 Arbejdskurve for armeringsstål

Arbejdskurver kan fastlægges ud fra ENV 1992-1-2 Annex A [5]. Figur 2 viser et eksempel på stålets arbejdskurve under brand.

2.3.6 Snitkræfter

Snitkræfterne består af en normalkraft (P_z) og to momentkomponenter (M_x og M_y). Ved søjlekonstruktioner skal medtages et tillægsmoment svarende til $P_z \cdot$ udbøjningen. Ud fra beregningsgrundlaget i nærværende rapport kan der etableres en sammenhæng mellem moment og krumning for et brandpåvirket tværsnit. Figur 3 viser denne sammenhæng for et vægtværsnit hvis karakteristika er nærmere beskrevet i afsnit 5.

Kurven i figur 3 viser hvor stor en krumning der fås efter en times brandpåvirkning når tværsnittet i hele perioden er udsat for et givet moment samt en tryknormalkraft på 100 kN/m.



Figur 3 Sammenhæng mellem moment og krumning i 150 mm tyk væg.

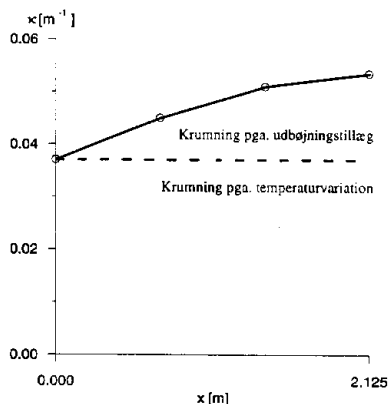
Udbøjningskurven for en søjle kan bestemmes ved løsning af differensligninger. For en søjle med de angivne tværsnitsdata og en søjlelængde på 4.25m kan udbøjningskurven bestemmes som vist i tabel 1.

ordinat [m]	0	0.708	1.417	2.125	
u_0 [m]	0	0.0626	0.1022	0.1157	gæt på udbøjning
M [kNm]	0	6.26	10.22	11.57	moment-fordeling
κ [m ⁻¹]	0.037	0.0450	0.0510	0.0535	krumningsfordeling vha. fig. 3
u_1 [m]	0	0.0612	0.1000	0.1132	ny udbøjning

Tabel 1 Bestemmelse af udbøjningskurve for tværsnittet i figur 3. Søjlelængden er 4.25m.

Da u_0 svarer til u_1 er søjlen i ligevægt med denne udbøjningsform.

Jvf. tabel 1 fås under brandpåvirkning en krumningsfordeling langs søjlen som vist i figur 4. Af figuren fremgår at der fås et krumningsbidrag fra temperaturvariationen over tværsnittet som er stort i forhold til den krumningstilvækst som fås pga udbøjningstillægget.



Figur 4 Krumningsfordeling langs søjlen
jvf. tabel 1.

Ved praktiske beregninger er det hensigtsmæssigt kun at operere på det hårdest påvirkede tværsnit. Ofte bestemmes udbøjningskurven på grundlag af krumningen i ét tværsnit sammenholdt med en antagelse om krumningens fordeling langs konstruktionselementet. Sædvanligvis anvendes et udbøjningstillæg af typen:

$$u_m = \frac{1}{K} \cdot \kappa_m \cdot l^2$$

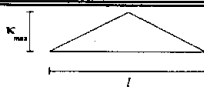
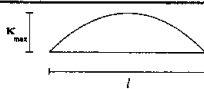
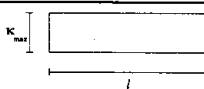
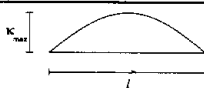
hvor u_m er det udbøjningstillæg der opbygges over strækningen l under antagelse af en given krumningsfordeling. Tabel 2 viser sammenhængen mellem værdien K og diverse krumningsfordelinger.

Ud fra krumningsfordelingen i figur 4 kan faktoren i det foreliggende tilfælde bestemmes idet:

$$u_m = \frac{1}{K} \cdot \kappa_m \cdot l^2 \Leftrightarrow K = \frac{1}{u_m} \cdot \kappa_m \cdot l^2 = \frac{1}{0.1157} \cdot 0.0535 \cdot 4.25^2 = 8.35$$

u_m og κ_m fremgår af tabel 1. Denne værdi på 8.35 er baseret på et konkret eksempel. Generelt anbefales det at anvende værdien 8.0 idet denne altid vil være på den sikre side for såvel temperatur-variation over tværsnittet som for de andre krumningsfordelinger.

Faktoren 8.0 er altså sikker og ikke væsentlig lavere end den "korrekte" værdi for ovenstående typiske vægeksempel.

Krumningsfordeling		K
Trekant		12
Parabolsk		$\frac{48}{5}$
Ensformig		8
Sinus		π^2

Tabel 2 Sammenhæng mellem værdien *K* og krumningsfordeling.

2.3.7 Beregningsprocedure

Det tidsmæssige forløb indbygges i beregningen ved at opdele brandperioden i delintervaller. Indenfor hvert delinterval antages materialeegenskaberne at være konstante. Det bemærkes, at de transiente tøjninger er afhængige af spændingsniveauet og, at det derfor er akkumulerede værdier, som indgår i beregningen.

Af ovennævnte fremgår, at hovedparten af de i beregningen indgående egenskaber afhænger af temperaturen. I et punkt af konstruktionen kan de totale tøjninger til et givet tidspunkt udtrykkes som:

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{ther} + \epsilon_{trans} + \epsilon_{defo}$$

Når det antages, at plane tværsnit forbliver plane, kan tøjningsbidraget fra deformation, i et punkt (x,y) , bestemmes som

$$\epsilon_{defo}(x,y) = \epsilon_0 + \kappa_x \cdot y - \kappa_y \cdot x$$

hvor

ϵ_0	tøjningen i (0,0)
κ_x	krumning om x-aksen
κ_y	krumning om y-aksen

Afhængigt af tøjningsplanens beliggenhed kan snitkræfterne udtrykkes som

$$N = - \int_{beton} \sigma_{beton}(\epsilon_{total}) \cdot dA - \int_{arm} \sigma_{arm}(\epsilon_{total}) \cdot dA$$

$$M_y = - \int_{beton} \sigma_{beton}(\epsilon_{total}) \cdot x \cdot dA - \int_{arm} \sigma_{arm}(\epsilon_{total}) \cdot x \cdot dA$$

$$M_x = - \int_{beton} \sigma_{beton}(\epsilon_{total}) \cdot y \cdot dA - \int_{arm} \sigma_{arm}(\epsilon_{total}) \cdot y \cdot dA$$

I hvert tidsinterval bestemmes nu tøjningsplanens beliggenhed således, at snitkræfterne holder ligevægt med den ydre last inklusive evt. udbøjningstillæg.

3 Materialeegenskaber

3.1 Beton

Til brug for beregninger udført efter metoden i afsnit 2 er der opstillet materialeegenskaber svarende til 3 forskellige betontyper. De 3 typer er i brandmæssig henseende tænkt at være:

- Beton1: En dårlig beton svarende til normgrundlaget i ENV 1992-1-2 [5].
Tilslag af kvarts, flint, sandsten.
- Beton2: En middelbeton baseret på aktuelt fundne egenskaber.
Tilslag af danske sømaterialer, granit, kalksten.
- Beton3: En beton med lette tilslag som ekspanderet ler, ildfaste sten.

For hver af betonerne er fastlagt et forløb af styrkereduktionsfaktoren ξ_c (se afsnit 2.3.4) og varmeledningstallet som funktion af temperaturen. Disse er optegnede i figurerne 5 og 6.

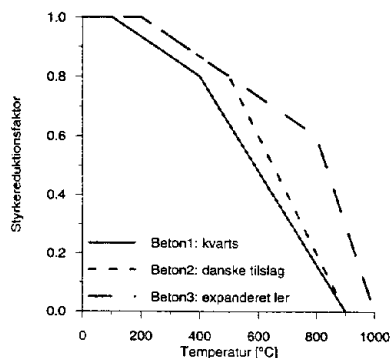
For alle tre betontyper sættes:

$$\begin{aligned}\text{Varmefylde} &= 1.0 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \\ \text{Længdeudvidelseskoefficient} &= 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\end{aligned}$$

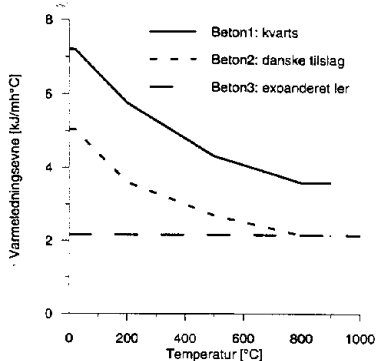
I beregningseksemplerne er endvidere anvendt følgende styrketal for alle tre betontyper:

$$\begin{aligned}\text{Trykstyrke} &= 30 \text{ MPa} \\ \text{Begyndelseselasticitetsmodul} &= 36000 \text{ MPa}\end{aligned}$$

For Beton1 og Beton2 sættes densiteten til 2300 kg/m^3 , mens densiteten for Beton3 regnes at være 1200 kg/m^3 .



Figur 5 Styrkereduktion som funktion af temperatur og tilslag.



Figur 6 Varmeledningsevne som funktion af temperatur og tilslag

3.2 Armering

I beregningseksemplerne anvendes armeringsstål med en flydespænding på 550 MPa og et E-modul på 200000 MPa ved 20°C. Arbejdskurven bestemmes iht. ENV 1992-1-2 [5] figur A.6 for varmtvalset stål.

I øvrigt sættes:

Varmefylde	=	0.48 kJ/kg °C
Varmeledningsevne	=	170 kJ/mh °C
Længdeudvidelseskoefficient	=	$1.1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

4 Sikkerheder

I henhold til DS409 og DS411 regnes med partialkoefficienten 1.0 på både last- og modstandssiden. Endvidere indgår bidrag fra vind og vandret masselast ikke i lastpåvirkningen.

5 Beregning af vægelement

Der er foretaget en beregning af et vægelement med en tykkelse på 150 mm.

5.1 Brandbelastning

Vægelementet udsættes for en ensidig brandpåvirkning i 1 time. For vægge og søjler vil en usymmetrisk brandbelastning ofte være en større belastning end en symmetrisk brand. Dette skyldes, at udbøjningerne og dermed momenttillægget fra den lodrette last bliver større.

De termiske randbetingelser er defineret i ENV 1991-2-2 [4]. Herfra vælges en standardbrand samt transmissionskoefficienter for konvektion og stråling.

5.2 Materialer

Der anvendes den i afsnit 3 benævnte Beton2 samt den beskrevne armering.

5.3 Konstruktion

Vægelementet er armeret i begge sider med Ø6 pr 150 mm. Dæklaget er 25 mm og væggen er 150 mm tyk og har en søjlelængde på 4.25 m. Ved en søjlelængde på 4.5 m bliver søjlen ustabil under brandforløbet.

5.4 Statisk last

Vægelementet udsættes for en centralt virkende lodret nedadrettet last på 100 kN pr løbende meter væg. Denne last anses for at være et typisk lastniveau for bærende vægge i industrihaller. Der ses bort fra egenvægten.

5.5 Resultater

Der er foretaget en beregning, som forløber over 2 timer. Til tiden 0.0 time påsættes den ydre statiske last, og konstruktionen hensættes herved i anvendelsestilstanden. Til tiden 1.0 time "tændes" standardbranden og denne forløber indtil tiden 2.0 time.

Bilag 1 viser forløbet af temperaturen i betonen og i de to armeringslag.

Bilag 2 viser temperatur-fordelingen over vægtykkelsen efter en times brandpåvirkning.

Bilag 3 og 4 viser forløbet af spændinger i henholdsvis beton og armering.

På grund af brandpåvirkningen udvider betonen sig i brandsiden. Dette får elementet til at krumme og bøje ud mod brandsiden. Herved bliver den lodrette last påført med en excentricitet. Elementet udsættes altså for en påvirkning sammensat af:

- en egenspændingstilstand på grund af temperaturforskelle indenfor tværsnittet
- ydre last inklusive momentillæg på grund af udbøjningen.

I bilag 5 er optegnet betonspændingerne efter 0.28 timers brand (dvs. til tiden 1.28 time). På grund af varmeudvidelsen og den heraf afledte krumning fås trykspændinger i begge sider af elementet. Herved revner hele det centrale område samtidigt med, at begge armeringslag bliver trækpåvirkede. Efterhånden, som temperaturen stiger, krummer elementet mere og mere (større og større udbøjning, se bilag 6). Bilag 4 viser, at spændingen i armeringen i brandsiden reduceres i perioden fra 0.28 time til 0.89 time efter start af brand. Dette skyldes, at ovennævnte egenspændinger reduceres idet:

- armeringen udvider sig på grund af temperaturstigningen
- armeringens stivhed reduceres på grund af temperaturstigningen
- betonens stivhed reduceres på grund af temperaturstigningen

Efter 0.89 timers brandpåvirkning fås så stort udbøjningstillæg til momentet, at trykzonen i brandsiden elimineres. Herved bliver konstruktionen langt slappere, hvilket ses i bilag 6. Samtidigt vokser spændingerne kraftigt i armeringen (se bilag 4).

Udbøjningen ses at blive ca. 12 cm efter en times brandpåvirkning. På dette tidspunkt haves en betonspændingsfordeling som vist i bilag 7 med et maksimum på 17.5 MPa. Jvf. bilag 2 har det trykpåvirkede areal en temperatur under 100°C. Dette betyder iht. figur 5, at betonens mekaniske egenskaber er upåvirkede af branden og derfor har en styrke på 30 MPa.

Af bilag 2 fremgår at armeringens temperatur er ca. 400°C. Ved denne temperatur er stålets E-modul faldet til 70%, proportionalitetsgrænsen er faldet til 42% mens

flydespændingen er upåvirket (se figur 2). Af bilag 4 fremgår at armeringen i brandsiden efter en times brand har en spænding på ca. 210 MPa. Denne spænding er mindre end såvel aktuel flydespænding (550 MPa) som aktuel proportionalitetsspænding ($0.42 \cdot 550 \text{ MPa} = 231 \text{ MPa}$). Når E-modulet reduceres pga. den høje temperatur fås større elastiske tøjninger i armeringen, hvilket resulterer i større udbøjninger. Forskellen i temperaturudvidelse mellem den kolde betontrykzone og den opvarmede armering giver yderligere bidrag til udbøjningen. Når udbøjningen medfører så store tillægsmomenter at snitkræfterne ikke kan optages af tværsnittet, fås et svigt. Det er altså armeringens opførsel, som er dimensionsgivende.

6 Følsomhedsanalyse

For at kortlægge betydningen af variationer i de indgående parametre er foretaget en række beregninger af vægelementet beskrevet i afsnit 5. Vægelementet er beregnet med varierende forudsætninger som beskrevet i de følgende afsnit 6.1-6.3.

Resultatet er tilladelig maksimal søjlelængde, det vil sige den største søjlelængde (element-højde), som kan anvendes under den påsatte last, uden der sker brud under brandforløbet. Søjlelængden er bestemt med en beregningsnøjagtighed på 25 cm.

6.1 Betontyper

Vægelementet er beregnet med materiale-egenskaber svarende til de 3 beton-typer beskrevet i afsnit 3. For hver beton-type er foretaget 2 beregninger svarende til, at der haves en udførelsesexcentricitet på 25 mm mod henholdsvis den varme og den kolde side.

	Excentricitet 25 mm mod kold side	Excentricitet 25 mm mod varm side
Beton1	4.75 m	5.25 m
Beton2	5.25 m	5.75 m
Beton3	4.50 m	5.25 m

Tabel 2 Maksimal søjlelængde. Vægtykkelse: 150 mm. Armering: Ks550 Ø6/75 mm. Dæklag: 40 mm. Last: 100 kN/m.

Det ses, at de største maksimale søjlelængder opnås, når lasten er placeret tættest på den varme side. Dette skyldes, at udførelsesexcentriciteten herved reducerer den excentricitet, som opstår på grund af elementets krumning under brandpåvirkningen.

Efter en times brandpåvirkning er kun betonen i tværsnittets kolde side påvirket af spændinger. De mekaniske egenskaber er altså ens for alle betontyperne og derfor beror forskellene i maksimale søjlelængder på, at betonerne har forskellige termiske egenskaber, som medfører forskelle i armeringens temperatur. Bilagene 8, 9 og 10 viser temperaturforløbene i de 3 forskellige beton-typer. Beton3 med den laveste varmeledningsevne ses at give de højeste temperaturer. Dette skyldes den lave densitet, hvilket medfører, at materialet nemt opvarmes dvs. lav rumfangsbaseret varmfylde.

6.2 Tværsnitsgeometri/Armeringsarrangement

Der er foretaget beregninger, som fastlægger betydningen af:

- dæklagets størrelse
- armeringsmængde
- vægtykkelse

I alle tilfælde er en last på 100 kN/m placeret med en udførelsesexcentricitet på 25 mm i retning mod den kolde side. Dette er jævnfør afsnit 6.1 den farligste placering. Der anvendes betontypen Beton2.

	Ø6/150 mm	Ø6/75 mm	Ø10/100 mm
15 mm dæklag	3.25 m	3.75 m	
25 mm dæklag	3.75 m	4.50 m	
40 mm dæklag	4.25 m	5.25 m	6.75 m
central armering	3.75 m	4.75 m	

Tabel 3 Maksimal søjlelængde. Vægtykkelse: 150 mm. Armering: Ks550. Beton2.
Last: 100 kN/m. Excentricitet: 25 mm mod kold side.

I flg. DS411 kan der normalt ses bort fra afskalkningsfare, når dæklaget er mindre end 40 mm.

Når dæklaget øges fra 15 mm til 40 mm fås øget maksimal søjlelængde. Dette skyldes, at armeringen i brandsiden varmes mindre op ved større dæklag. Ved central armering bliver den indre momentarm dog så lav, at den maksimale søjlelængde er mindre end

ved 40 mm dæklag. En forøgelse af armeringsmængden giver selvfølgelig øgede søjlelængder.

Der er foretaget en beregning, som viser effekten af en øget vægtykkelse. Armeringen er Ø6 pr. 150 mm med 40 mm dæklag.

	Tykkelse 150 mm	Tykkelse 200 mm
Maksimal søjlelængde	4.25 m	6.25 m

Tabel 4 Maksimal søjlelængde. Armering: Ks550 Ø6/150 mm. Dæklag: 40 mm. Beton2. Last: 100 kN/m. Excentricitet: 25 mm mod kold side.

6.3 Understøtningsforhold

For væg- og søjlekonstruktioner er placeringen af den aksiale last af stor betydning for bæreevnen. Når en væg opvarmes ensidigt, vil den krumme. Denne krumning medfører, at der sker vinkeldrejninger ved vederlagene. Såfremt de tilstødende konstruktionsdele ikke får samme vinkeldrejninger, vil lastens angrebepunkt flytte sig mod væggen varme side. Denne placering kan bestemmes ud fra en betingelse om, at vederlagstrykket skal kunne overføres til væggen gennem en trykzone. Udstrækningen af denne fastlægges svarende til den temperaturafhængige trykstyrke, som haves i det pågældende område. Dette vil sædvanligvis give bæreevner under brandpåvirkning, som er højere, end hvis lasten regnes at forblive i sin oprindelige position. Ved at foretage beregninger med lasten placeret i disse to situationer er følsomheden overfor denne effekt vurderet. Det er forudsat, at lasten bevæger sig proportionalt med tiden mellem udgangspositionen og slutsituationen. Armeringen er Ø6 pr. 150 mm med 40 mm dæklag.

	Excentricitet 25 mm mod kold side	Variabel excentricitet
Maksimal søjlelængde	4.25 m	5.50 m

Tabel 5 Maksimal søjlelængde. Vægtykkelse: 150 mm. Armering: Ks550 Ø6/150 mm. Dæklag: 40 mm. Beton2. Last: 100 kN/m.

6.4 Vurdering af følsomhedsanalyse

6.4.1 Betontype

Forskelle i bæreevne ved forskellige betontyper med samme mekaniske egenskaber ved 20°C beror som nævnt i afsnit 6.1 kun på forskelle i de termiske egenskaber. Dette skyldes, at betontrykzonens temperatur er under 200°C og de mekaniske egenskaber er herved upåvirkede af branden (se fig. 5). Det er altså armeringens opførsel under brand, som er dimensionsgivende. Ved andre belastningsformer (f.eks. større lastexcentricitet) vil brud i betonen kunne være dimensionsgivende, og herved vil bæreevneforskellene mellem de enkelte betontyper være større.

Det er forudsat i følsomhedsanalysen, at betonen med expanderet ler har samme styrke- og stivhedsegenskaber i kold tilstand som de øvrige betoner. I praksis vil dette ikke være tilfældet, og sammenholdt med de (overraskende) ringe termiske egenskaber vurderes betonen med expanderet ler, til trods for den mindre styrkereduktion (se fig. 5), at være uhensigtsmæssig.

Når betontypen er ukendt, bør materialeegenskaberne svarende til betontypen med kvarts, flint, sandsten anvendes. Disse egenskaber er ringe både med hensyn til styrkereduktion og varmeledningsevne og repræsenterer den farligste situation svarende til normgrundlaget.

6.4.2 Tværsnitsgeometri/Armeringsarrangement

Med den anvendte lastexcentricitet er armeringens opførsel dimensionsgivende. Armeringens stivhed og styrke falder med voksende temperatur (se fig. 2). Et øget dæklag vil derfor forbedre armeringens egenskaber, men samtidigt reduceres den indre moment-arm. For en given konstruktion vil det optimale dæklag kunne bestemmes (f.eks. 40 mm for Ø6/150 i tabel 3), men samtidigt skal konstruktionen også kunne optage de kolde laste. Hvis en konstruktions kolde bæreevne er stor i forhold til bæreevnen under brand, kan denne forskel reduceres ved at gøre dæklaget større. Herved øges brandbæreevnen samtidigt med, at den kolde bæreevne reduceres.

Hvis brud i betonen er dimensionsgivende, kan der vælges en større trykstyrke. En forøgelse af tværnittets betonmål vil selvfølgelig kunne eliminere svigt i såvel beton som armering.

6.4.3 Understøtningsforhold

Følsomhedsanalysen viser, at der kan opnås en væsentlig forøgelse af den tilladelige søjlelængde ved at lade den aksiale last flytte sig ind imod brandsiden pga. temperaturdeformationer.

Man bør sikre, at samlingsdetaljen er udført på en sådan måde, at kraftoverførslen kan finde sted som forudsat i beregningen. Det er altså hensigtsmæssigt, at der ikke er en form for lejekonstruktion eller lignende, som sørger for at lasten påføres centralt, uafhængigt af vinkeldrejningerne i samlingen.

7 Brandtekniske eksempler

På det foreliggende grundlag er der udført en række beregningseksempler. Eksemplerne svarer med hensyn til tværsnitsgeometri i vid udstrækning til de "Brandtekniske eksempler" i BR95. Betonen er med danske tilslag (Beton2) og armeringen er Ks550. Af tabel 6 fremgår de øvrige parametre samt bæreevnerne i kold og varm tilstand for givne søjlelængder. Kold bæreevne skal sammenlignes med regningsmæssige laste mens bæreevnen ved brand skal sammenlignes med karakteristiske laste jvf. afsnit 4.

Tværsnit	Arm.	Dæk- lag [mm]	Last excentricitet [mm]	Brand	Søjle- længde [m]	Søjle- længde BR95 ^a [m]	Regn. kold bæreevne	Bæreevne ved brand
120 mm væg	Ø6/150	25	25	BS60	2.75	3.0	475 kN/m	100 kN/m
150 mm væg	Ø6/75	40	25	BS60	5.25	-	445 kN/m	100 kN/m
150 mm væg	Ø10/100	40	25	BS60	6.75	-	305 kN/m	100 kN/m
150 mm væg	Ø6/75	25	25	BS120	3.25	3.8	830 kN/m	100 kN/m
150 mm væg	Ø6/75	40	25	BS120	4.0	3.8	645 kN/m	100 kN/m
180 mm væg	Ø6/75	40	25	BS120	5.0	-	870 kN/m	100 kN/m
300x300 mm søjle	8 Ø25	40	100	BS120	4.25	3.8 ^b	962 kN	500 kN
240x240 mm søjle	8 Ø20	40	80	BS60	4.5	3.0 ^b	454 kN	340 kN

Tabel 6 Praktiske eksempler

^{a)} Maksimal højde uden yderligere dokumentation.

^{b)} Under visse hensyn til udnyttelse.

Lastene regnes at forblive i startpositionen under brandforløbet. Brandpåvirkningen er 1-sidet for vægge og 4-sidet for søjler. Lastexcentriciteten for vægge er i retning mod den kolde side.

Eksemplerne i tabel 6 viser maksimale søjlelængder som er såvel større som mindre end de højder der af BR95 opgives at være tilladelige uden yderligere dokumentation.

8 Konklusion

Nærværende beregningsgrundlag tager hensyn til aktuelt forekommende:

- last
- armeringsmængde
- dæklag

Det er altså muligt for en given konstruktion at bestemme samhørende værdier for last og maksimal søjlelængde.

Ved at øge dæklag og armeringsmængde, i forhold til hvad der er nødvendigt for de "kolde" lastkombinationer, er det muligt at opnå bæredygtige, brandpåvirkede konstruktioner med normalt forekommende højder.

9 Litteratur

- [1] Hertz, Kristian: Analyses of Prestressed Concrete Structures Exposed to Fire. Report no. 174, Institute of Building Design, Technical University of Denmark .
- [2] Hertz, Kristian: Betonkonstruktioners brandtekniske egenskaber. Rapport nr. 140, Institutet for Husbygning, DTH, 1980.
- [3] Hertz, Kristian: Simple Temperature Calculations of Fire Exposed Concrete Constructions. Report no. 159, Institute of Building Design, Technical University of Denmark .
- [4] ENV 1991-2-2 Eurocode No. 1. Projekteringsgrundlag og last på bygværker. Del 2-2: Last på bygværker, Brandlast 1. Udgave marts 1995, DS.
- [5] ENV 1992-1-2 Eurocode No. 2.Design of Concrete Structures. Part 1-2: Structural Fire Design (November 1995).
- [6] Anderberg, Yngve: Behaviour of Steel at High Temperatures. RILEM-COMMITEE 44-PHT, February 1983.



Bilag 1 - 10

Client:

Ref. nr.:

Project: vaeg1

Date: 06/24/96

Name:

Initials :

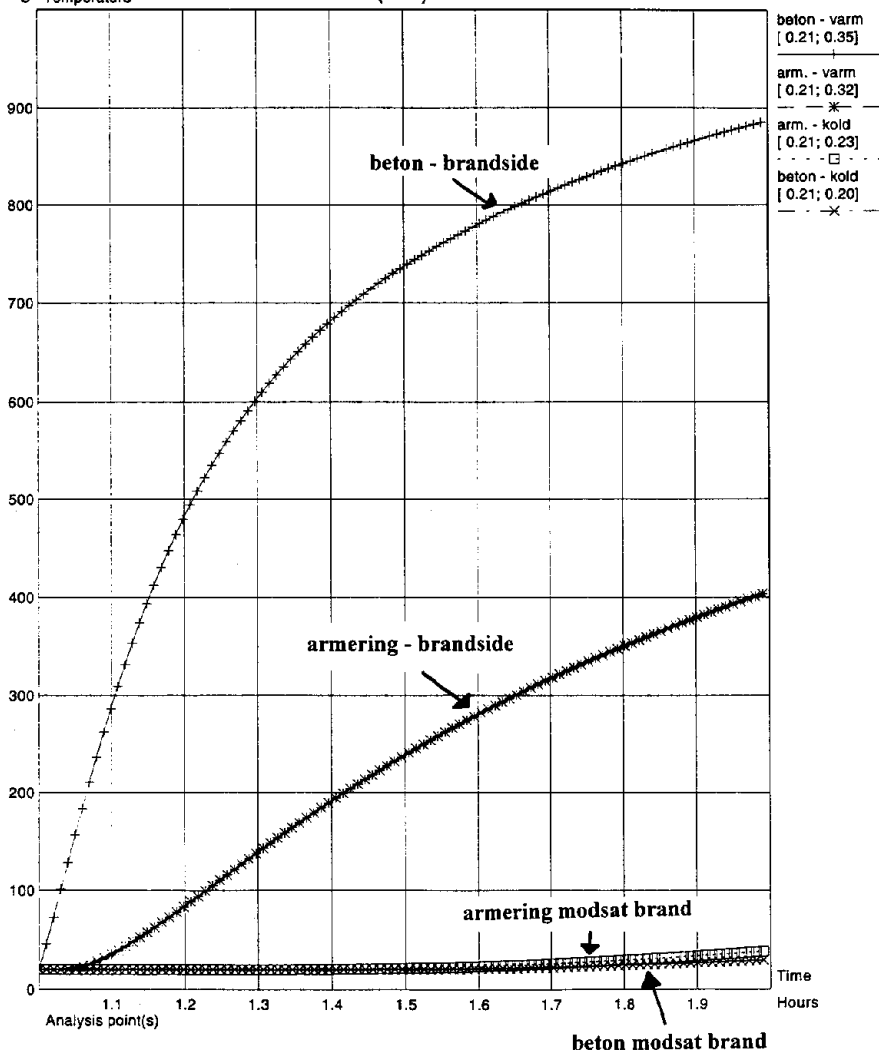
Id. nr. : VE-AA0578

Time: 13:54

Bilag 1

Temperature Analysis
(Fire)

°C Temperature



Client:

Ref. nr.:

Project: vaeg1

Date: 06/24/96

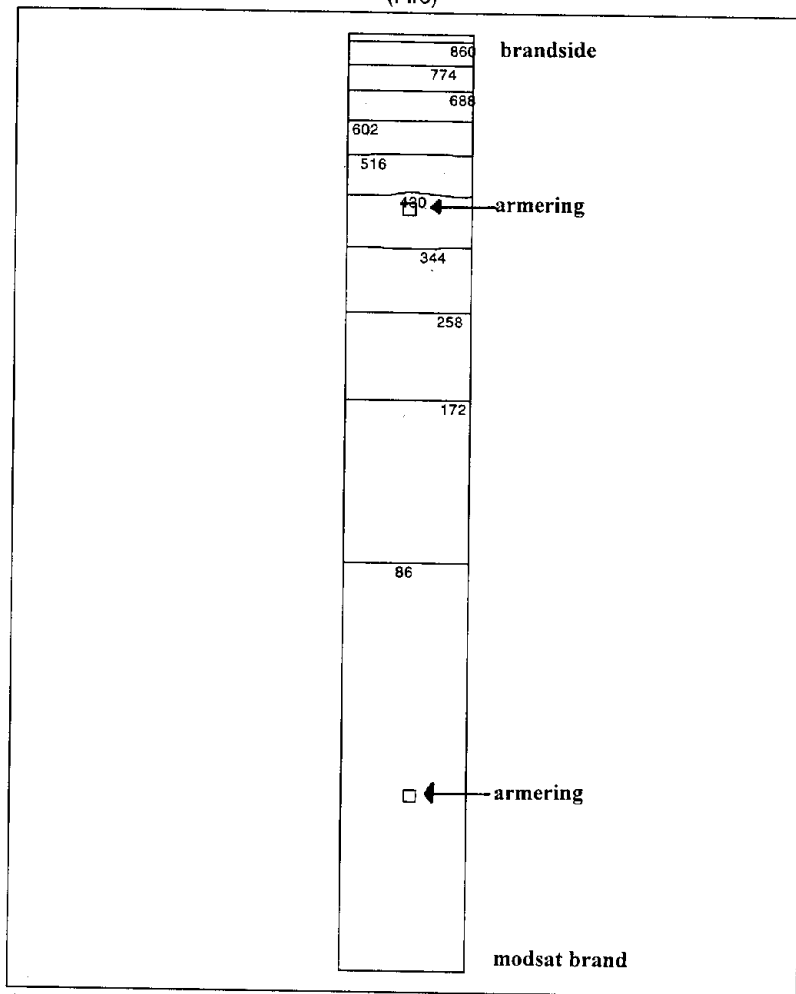
Name:

Initials :

Id. nr. : VE-AA0578

Time: 13:39

Bilag 2

Temperature Analysis
(Fire)

DATA:

Time	2.00
Min	29.91
Max	886.88

vaeg

Min	29.91
Max	886.88

Arm.varm

Min	405.25
Max	406.86

Arm.kold

Min	38.65
Max	38.77

Client:

Ref. nr.:

Project: vaeg1

Date: 06/24/96

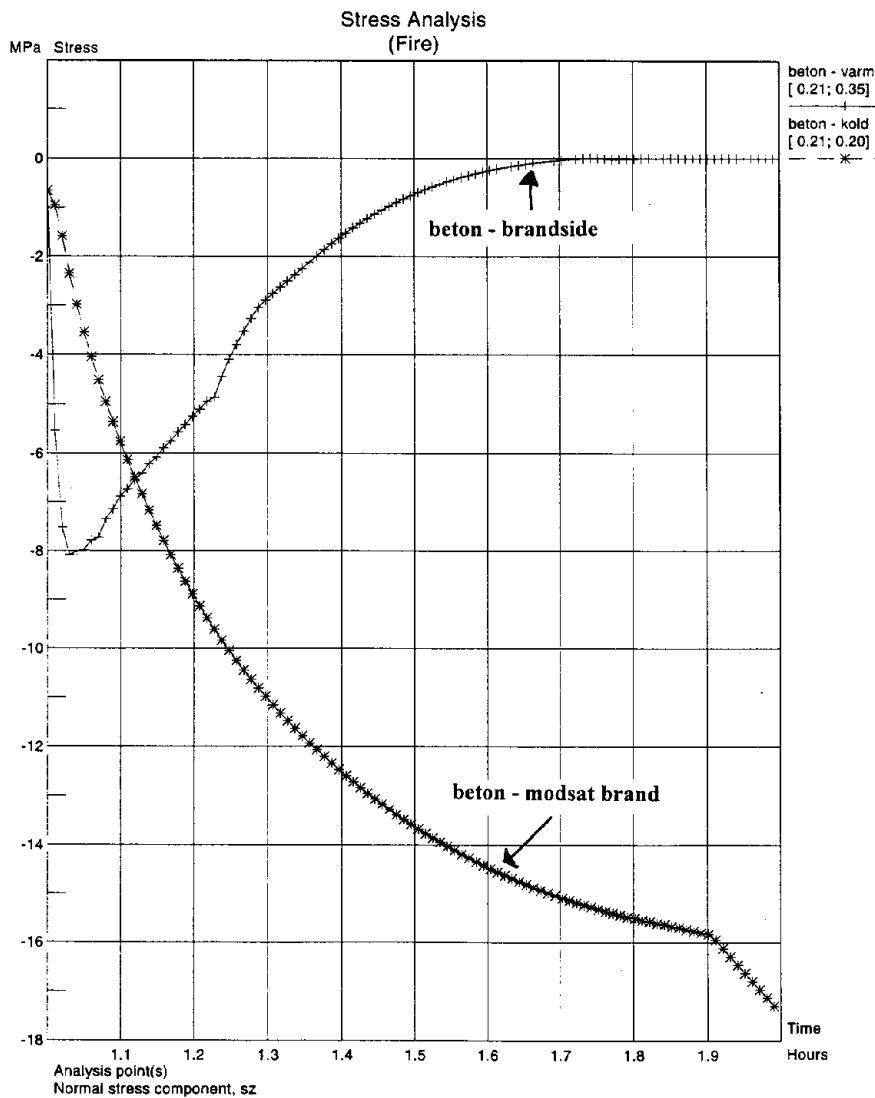
Name:

Initials :

Id. nr. : VE-AA0578

Time: 13:40

Bilag 3



Client:

Ref. nr.:

Project: vaeg1

Date: 06/24/96

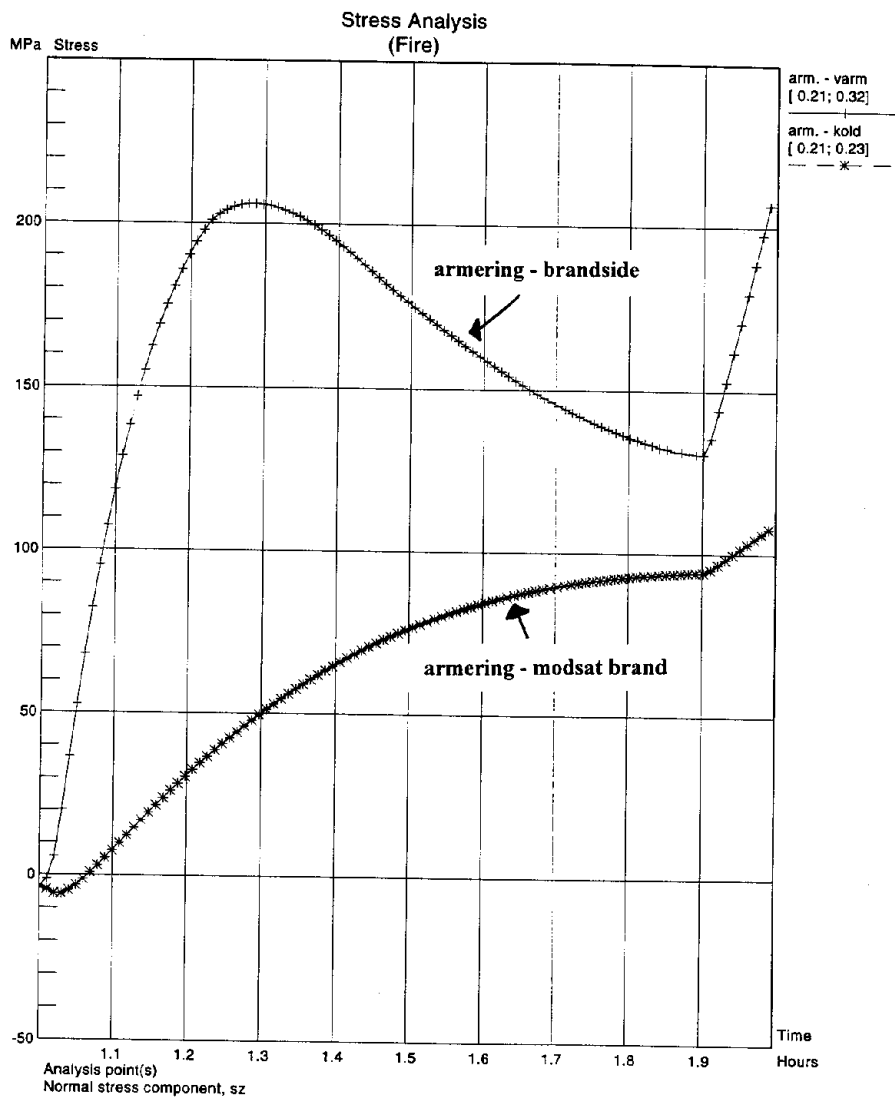
Name:

Initials :

Id. nr. : VE-AA0578

Time: 13:41

Bilag 4



Client:

Ref. nr.:

Project: vaeg1

Date: 06/24/96

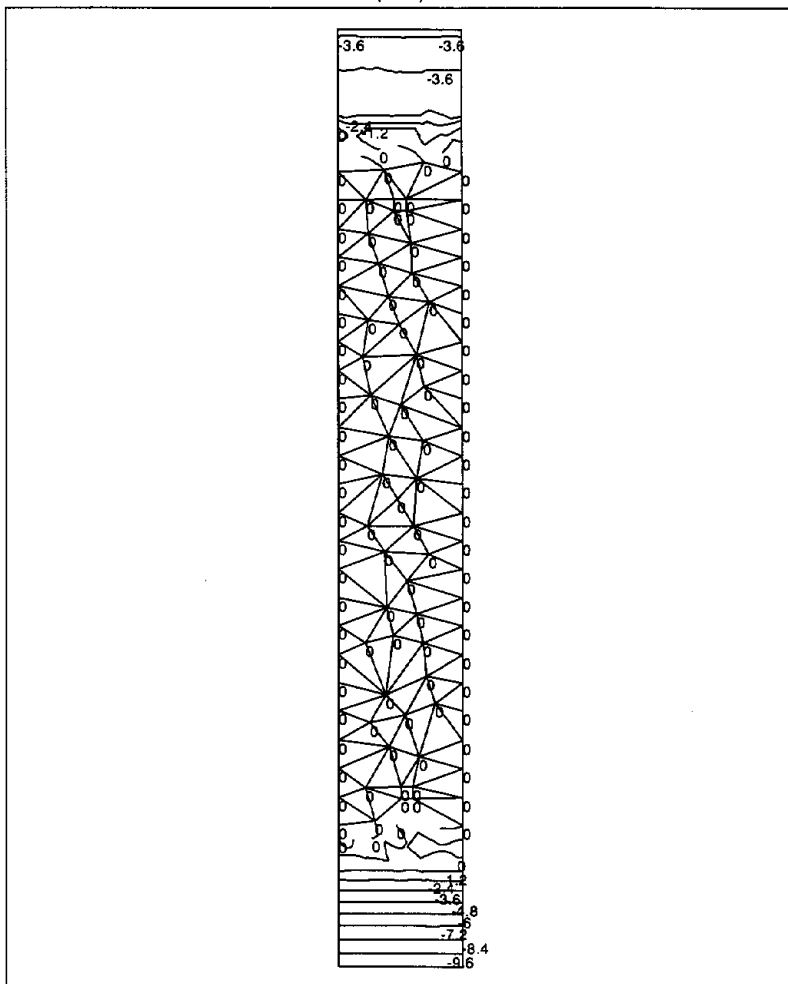
Name:

Initials :

Id. nr. : VE-AA0578

Time: 13:51

Bilag 5

Stress Analysis
(Fire)

DATA:

Time	1.28
Min	-10.69
Max	0.37

vaeg

Min	-10.69
Max	0.37

Arm.varm

Min	..
Max	..

Arm.kold

Min	..
Max	..

Isocurve

Normal stress component, σ_z

Client:

Ref. nr.:

Project: vaeg1

Date: 06/24/96

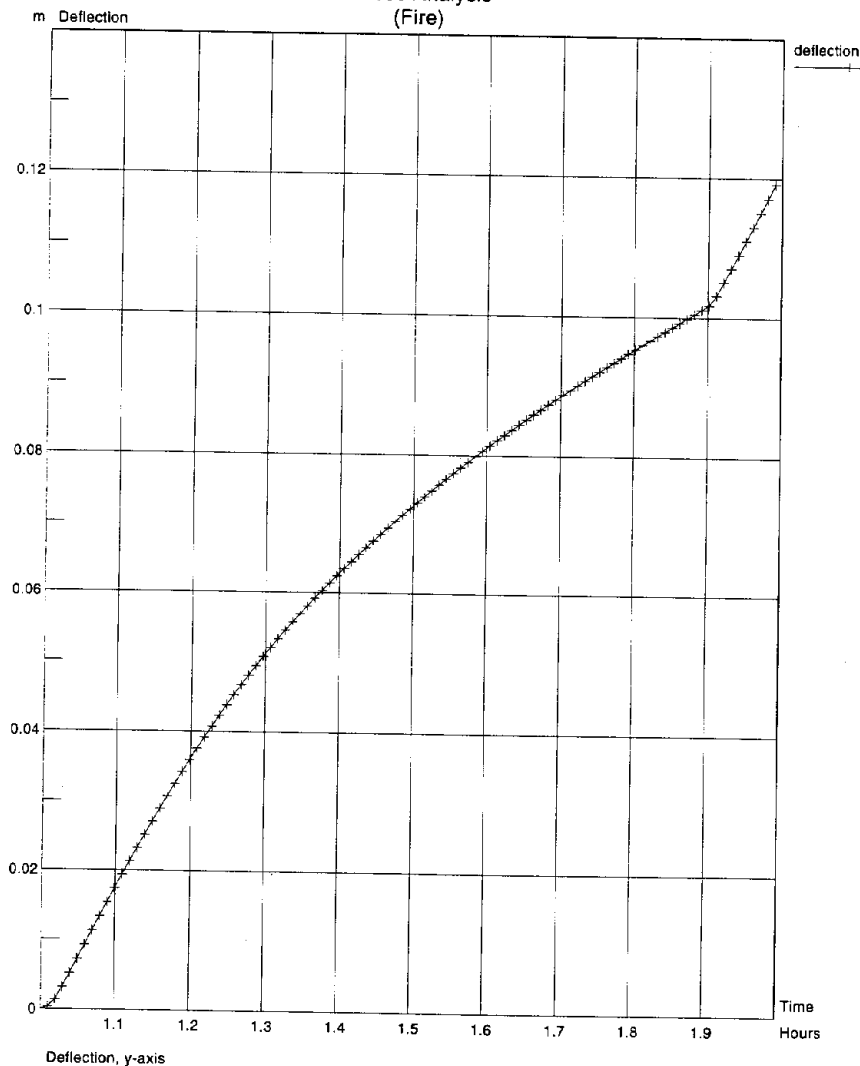
Name:

Initials :

Id. nr. : VE-AA0576

Time: 13:21

Bilag 6

Stress Analysis
(Fire)

Client:

Ref. nr.:

Project: vaeg1

Date: 06/24/96

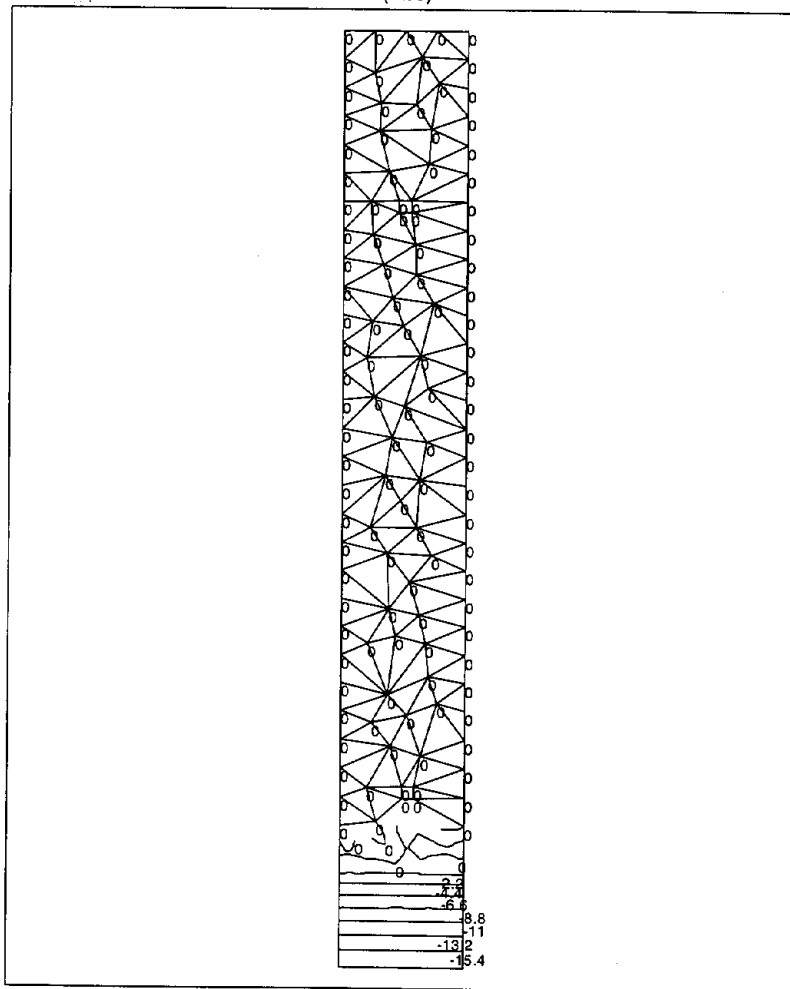
Name:

Initials :

Id. nr. : VE-AA0578

Time: 13:43

Bilag 7

Stress Analysis
(Fire)

DATA:

Time 2.00

Min -17.46

Max 0.28

vaeg

Min -17.46

Max 0.28

Arm.varm

Min **

Max **

Arm.kold

Min **

Max **

Isocurve

Normal stress component, sz

Client:

Ref. nr.:

Project: vaeg2

Date: 07/12/96

Name:

Initials :

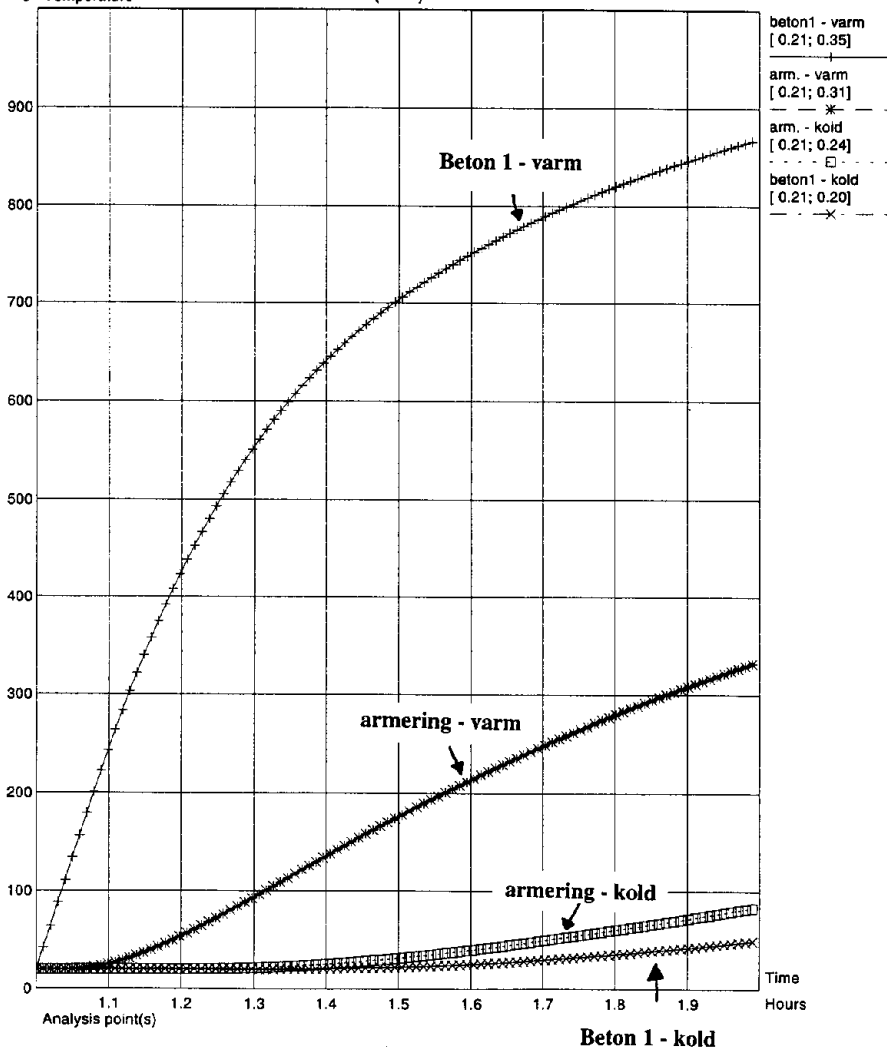
Id. nr. : VE-AA0746

Time: 12:13

Bilag 8

Temperature Analysis
(Fire)

°C Temperature



Client:

Ref. nr.:

Project: væg3

Date: 07/12/96

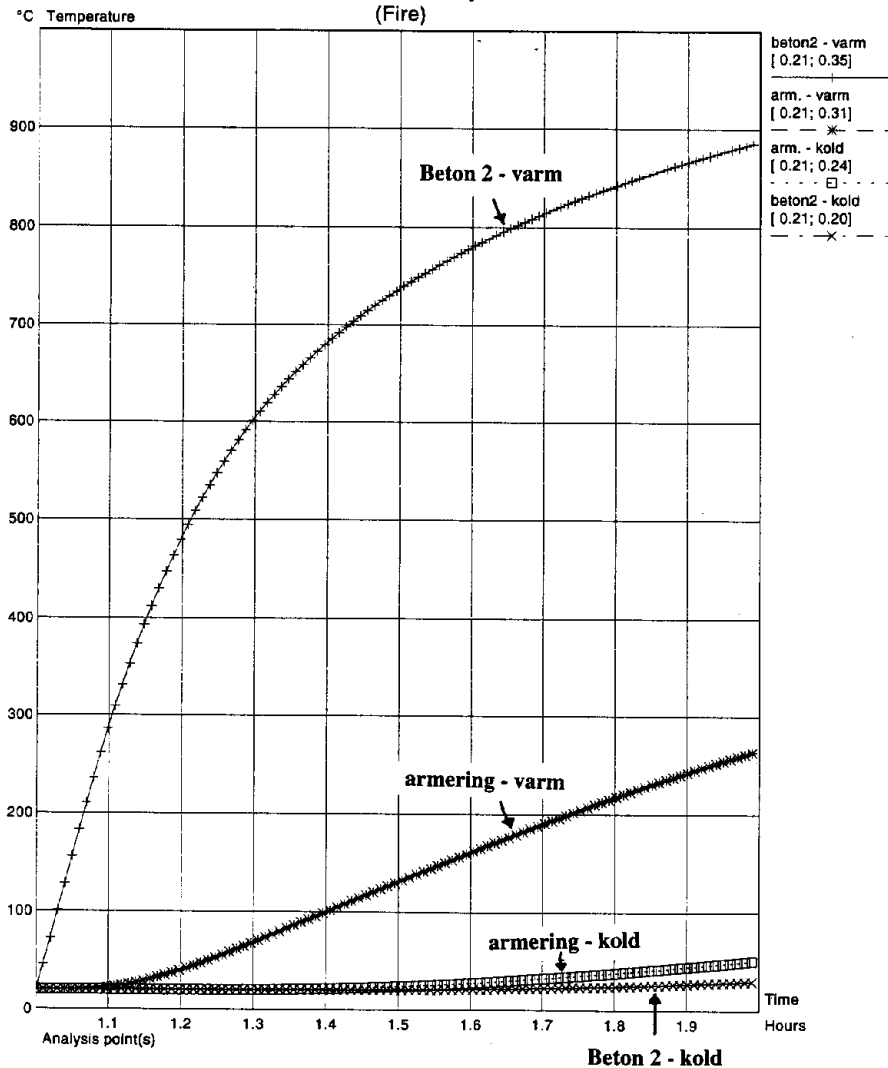
Name:

Initials :

Id. nr. : VE-AA0749

Time: 12:15

Bilag 9

Temperature Analysis
(Fire)

Client:

Ref. nr.:

Project: vaeg4

Date: 07/11/96

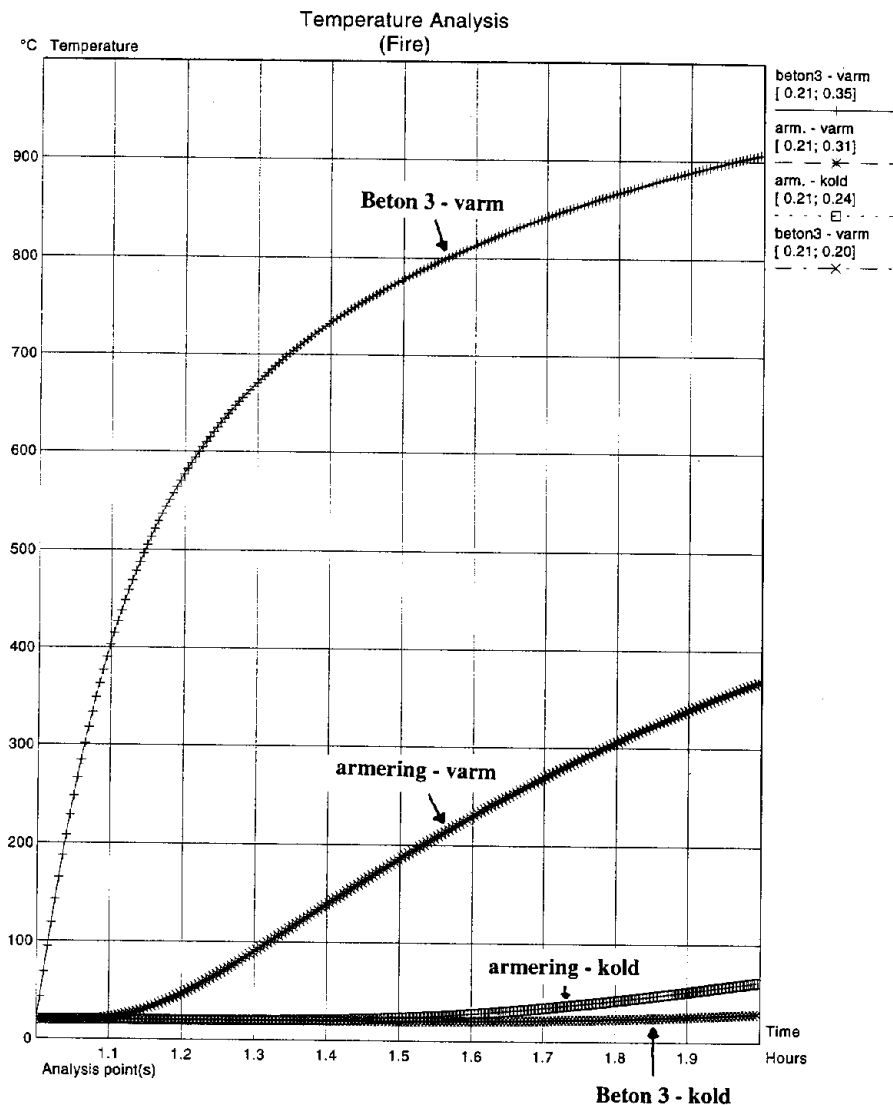
Name:

Initials :

Id. nr. : VE-AA0751

Time: 13:00

Bilag 10



DTI Betoncentret
Gregersensvej
Postboks 141
DK-2630 Taastrup

Kalibrering af måleudstyr i betonelement-, betonvare- og
fabriksbetonproduktion

af

Chr. Munch-Petersen
Civilingeniør, centerchef

Juni 1996

Q:\IA\CHP96\ARTIKLER\960618.ART

Indholdsfortegnelse

side

1. Forord	95
2. Sammenfatning	96
2.1 Behandlet udstyr og fremgangsmåde	96
2.2 Stålmålebånd	99
2.3 Covermeter	100
2.4 Prell-hammer	101
2.5 Trådspændingsmåler	102
2.6 Termometer	102
2.7 Analysevægt	102
2.8 Laboratorievægt	103
2.9 Trykpresse	103
2.10 Måleværktøj - muffediameter	104
2.11 Måleværktøj - spidsendediameter	104
2.12 Skydelære	105
2.13 Stålvinkel, retskinne, bladmal	106
2.14 Pressurmeter	106
2.15 Oversigt over udstyr og usikkerhedsgrænser	108

Kalibrering af måleudstyr i betonelement-, betonvare- og fabriksbetonproduktion

1. Forord

Dette indlæg på Dansk Betondag den 12. september 1996 i Aalborg er resultatet af mange menneskers samarbejde.

Indlægget beskriver de resultater, der er blevet opnået i et brancheprojekt med deltagelse af følgende parter:

- Betonelement-Foreningen
- Dansk Fabriksbetonforening
- Dansk Beton Industriforening
- Dansk Teknologisk Institut - Betoncentret.

Disse 4 parter har både delt finansiering og bemanning af projektet. Projektrapporten, som kan erhverves hos DTI, Betoncentret, er skrevet af akademieingeniørerne Gitte Olsen og Søren Skovsende, men der har derudover i projektperioden deltaget så mange personer i arbejdsgruppen fra branchen, at der ikke er plads til at nævne alle her - for slet ikke at tale om risikoen for at glemme en. Derfor ingen nævnt, ingen glemt.

En styre/følgegruppe vurderede løbende projektets resultater og gav projektet de nødvendige skub, der ændrede kursen i den korrekte retning.

Denne styre/følgegruppe var:

- Sven Röttig, Betonelement-Foreningen
- Knud Hansen, Dansk Fabriksbetonforening
- Gunnar Hansen, Betonelement-Foreningen
- Esben Thygesen, Dansk Beton Industriforening
- Christian Munch-Petersen, DTI Byggeri.

Projektet er dokumenteret i to publikationer:

- 1) En projekt rapport indeholdende usikkerhedsbudgetter for en række måleinstrumenter.
- 2) En kortfattet manual, der redegør for resultaterne.

Projektet er at betragte som et normforberedende projekt, fordi resultatet er planlagt at blive implementeret i normer og standarder i det omfang, normsystemet finder resultaterne relevante.

Det vil i praksis foregå ved, at projektets resultater bliver en integreret del af den revision, der p.t. pågår af DS423 og DS405 serien, samt de ikke-standardiserede prøvningsmetoder i DS411 og BBB.

Projekter af denne type må forventes at blive almindelige i de næste 10 år, fordi det europæiske normarbejde vil kræve evaluering og implementering af snesevis af nye standarder.

2. Sammenfatning

2.1 Behandlet udstyr og fremgangsmåde

Analyserne omfatter følgende udstyr udvalgt af de tre brancheforeninger:

- Stålmålebånd
- Covermeter
- Prell-hammer
- Trådspændingsmåler
- Termometer
- Analysevægt
- Laboratorievægt
- Trykpresse
- Måleværktøj - muffediameter
- Måleværktøj - spidsendediameter
- Skydelære
- Stålvinkel, retskinne, bladmal
- Pressurmeter

Fremgangsmåden ved gennemførelse af projektet er som følger:

- Fremskaffelse af almindeligt anvendte kalibreringsinstruktioner for det valgte udstyr.
- Vurdering af, hvorledes udstyret anvendes ved brug.
- Listning af mulige usikkerhedskomponenter, herunder vurdering af størrelse og forventet fordeling.
- Beregning af usikkerhed ved kalibrering og brug af udstyret.

Usikkerhedsbudgetterne er opstillet ud fra rekommandationerne for angivelse af måleusikkerhed, opstillet af Det Internationale Bureau for Mål og Vægt (BIPM). Rekommandationerne svarer til DS/INF 94, Retningslinier for fastlæggelse af måleusikkerhed, 1. udgave.

Som resultat af analyserne er der i dette afsnit angivet en usikkerhedsgrænse (U) ved brug af hvert af de analyserede udstyr. Usikkerhedsgrænsen er angivet dels med baggrund i de forudsætninger, som er angivet her i

sammenfatningen, dels de vurderinger, som fremgår af det tilhørende afsnit om usikkerhedsbudgetter for de forskellige udstyr, afsnit 3-15.

Dette afsnit (2.1-2.15) kan læses selvstændigt til at opnå et overblik over, hvilken usikkerhed, der optræder ved brug af det udvalgte udstyr. Hvis der ønskes indblik i størrelsen af de enkelte usikkerhedskomponenter kan dette fås ved at læse i de mere detaljerede beregninger i afsnit 3-15.

Kort fortalt foregår beregningen således:

1) Størrelsen af de forskellige usikkerhedskomponenter vurderes

De forskellige forhold, der kan have indflydelse på måleværdien, opstilles. For hver af disse usikkerhedskomponenter skønnes den størst mulige værdi.

2) De forskellige usikkerhedskomponenter reduceres

Det skønnes, hvor sandsynligt det er, at værdien bliver af en bestemt størrelse. Den enkelte usikkerhedskomponent reduceres afhængigt af fordelingsformen. Hvis fx enhver værdi er lige sandsynlig, vil usikkerhedskomponenten være såkaldt "rektangulært" fordelt og blive reduceret til 58%.

De hyppigst anvendte reduktionsformer er:

Fordelingstype	Reduktionsfaktor	Usikkerhedsbidraget medtages med
Normalfordeling	2	50% af værdien
Rektangulær fordeling	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	58% af værdien
Trekantfordeling	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	41% af værdien
U-fordeling	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	71% af værdien

3) De forskellige usikkerhedskomponenter adderes

Usikkerhedskomponenterne adderes til den samlede usikkerhed, men da usikkerhederne næppe alle vil optræde med den største værdi på samme tid, adderes de geometrisk.

4) Usikkerhedsgrænsen udregnes

Usikkerhedsgrænsen angives altid med en tilhørende k-faktor, som angiver det tilhørende konfidensinterval, og som multipliceres på de sammenlagte usikkerhedskomponenter. Med $k=2$ vil usikkerheden ved måling ikke overskride den angivne usikkerhedsgrænse i 95% af tilfældene. (Forudsætningen for disse antagelser er dog, at usikkerheden kan regnes normalfordelt, men den reelle fordeling vil normalt være ukendt.)

I de tilfælde, hvor usikkerhedsgrænsen består af faste (f) og variable (v) bidrag, vil de iht. praksis blive opstillet på formen $U = f + x \cdot v$. Såfremt f og v ikke er korrelerede, hvilket er tilfældet for de i dette projekt

behandlede kalibrerings- og brugsmetoder, er det tilladt at addere disse geometrisk for en given værdi af x .

Ovenstående beregningsmetode kan anvendes for det meste udstyr, men der kan forekomme afvigelser, fx hvis nogle af usikkerhedskomponenterne er indbyrdes afhængige (korrelerede).

Beregningsprincipperne er resumeret i kapitel 16.

For målemetoder, hvor måleresultatet opnås igennem en formel eller en opstillet kalibreringskurve, er beregningerne mere komplicerede, idet formeludtrykket da må differentieres med henblik på de forskellige usikkerhedskomponenter.

Beregningerne må gennemføres for to situationer: Først for kalibreringen af udstyret op mod certificeret udstyr og dernæst for den daglige brug af udstyret. Mange af usikkerhedskomponenterne vil optræde både i kalibreringssituationen og i brugssituationen. Det er vurderet uhensigtsmæssigt at skelne imellem begreberne i de to situationer, idet årsagen til usikkerhedskomponenten er den samme. Da kalibreringen normalt strækker sig over et kort tidsrum i forhold til brugen, og de fleste har tendens til at være mere omhyggelige ved kalibreringen, vil variationerne normalt være størst i brugssituationen.

Usikkerhedsbidrag stammende fra drift af referenceudstyr er negligeret, da det forudsættes, at udstyret behandles og opbevares skånsomt samt rekalibreres hyppigt.

Målingens repeterbarhed er en af de mindst håndgribelige usikkerhedskomponenter og udtrykker den usikkerhed, der ikke er dækket ved de øvrige usikkerheder, fx den variation der vil optræde, hvis man lader andre personer udføre kalibreringen/målingen. I yderste konsekvens vil man kunne vælge at sætte alle andre usikkerhedsbidrag, der lader sig bestemme statistisk til 0 (nul) og sætte repeterbarheden tilsvarende højt. Dette vil dog fratage beregningerne den bonus det er, at usikkerhederne adderes geometrisk og ikke aritmetisk. Repeterbarheden kan evt. fastlægges ved forsøg på den enkelte fabrik og vil dermed sandsynligvis kunne reduceres i forhold til den estimerede "branchegældende".

Alle usikkerhedskomponenterne er kategoriseret ved et bogstav (A, B, C). Usikkerhedskomponenter af type A er de mest underbyggede, mens usikkerhedskomponenter af type C er de mindst underbyggede. Eksempler på usikkerhedskomponenter af type A er komponenter, hvis størrelse har kunnet vurderes ud fra certifikater eller aflæsningsnøjagtighed observeret på udstyr. Eksempler på usikkerhedskomponenter af type B er komponenter, hvis størrelse har kunnet vurderes ud fra småforsøg, erfaringstal, geometriske betragtninger eller anden form for beregning. Usikkerhedskomponenter af type C er komponenter fastlagt ved skøn.

For noget af udstyret er det accepteret, at en fejlvisning af brugsudstyret fundet i kalibreringssituationen mod det certificerede udstyr medtages som usikkerhedsbidrag.

Der bør dog principielt korrigeres for en sådan fejlvisning ved anvendelse af korrektionstabeller. I de tilfælde, hvor fejlvisning indgår som en usikkerhedskomponent, er der foretaget en beregning af usikkerhedsgrænsen både med og uden denne fejlvisning.

Ingen af de gennemførte beregninger bygger på flergangsbestemmelser til fastlæggelse af en værdi. Nogle fabrikker anvender dette i kalibreringssituationen og også i nogle brugsmålesituationer. Flergangsbestemmelser er i princippet en lille forsøgs-serie og kan anvendes til at mindske usikkerhedskomponenten, idet der opnås en mere præcis information om den "sande værdi". Ved mindst 10 bestemmelser kan usikkerhedskomponenten beregnes som standardafvigelsen i måleserien divideret med kvadratroden af antallet af målinger.

Virksomheder, der ønsker at bygge sine kalibreringer og målinger på andre principper end de forudsatte, kan udføre beregninger af deres egne usikkerhedsgrænser ud fra de aktuelle forudsætninger efter den fremgangsmåde, der er vist i denne rapport.

De opstillede usikkerhedsgrænser er gældende for den foretagne måling, men der er ikke taget højde for, om målingen er repræsentativ for den egenskab, som ønskes fastlagt. For eksempel gælder usikkerhedsgrænsen for målingen af muffediameter usikkerheden ved bestemmelsen af afstanden imellem 2 udvalgte punkter overfor hinanden uden at tage hensyn til, om afstanden imellem de to punkter er et udtryk for muffens gennemsnitlige diameter.

2.2 Stålmålebånd

Usikkerhedsgræsen ved måling med stålmålebånd kan angives til:

$U = \pm (1,2 \text{ mm} + L \cdot 0,09 \text{ mm/m})$ ($k = 2$) for $L = 0,0-2,4 \text{ m}$
 $U = \pm (1,2 \text{ mm} + L \cdot 0,09 \text{ mm/m})$ ($k = 2$) for $L = 2,5-14,3 \text{ m}$
 $U = \pm (1,6 \text{ mm} + L \cdot 0,09 \text{ mm/m})$ ($k = 2$) for $L = 14,4-19,2 \text{ m}$
 $U = \pm (2,6 \text{ mm} + L \cdot 0,09 \text{ mm/m})$ ($k = 2$) for $L > 19,2 \text{ m}$

Det er forudsat, at brugsmålebåndet og det certificerede målebånd begge er længere end det længste betonelement, der skal måles.

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Brugsmålebåndet kalibreres op imod et referencemålebånd. Referencemålebåndet kalibreres eksternt. Begge målebånd er af stål. Kalibreringen sker tæt ved 20°C. Ved kalibreringen er begge målebånd placeret på plant underlag og påført en trækraft på 50 N via kalibrerede dynamometre.

Begge målebånd har en stregkvalitet, der gør, at aflæsning kan ske med en nøjagtighed på $\pm 0,2 \text{ mm}$ eller bedre.

Nulpunktet er veldefineret på referencemålebåndet, mens der er skubbehage på brugsmålebåndet. Brugsmålebåndet godkendes kun, hvis afvigelserne i forhold til referencemålebåndet er mindre end:

$\pm 0,3 \text{ mm}$ i området $0,0-2,4 \text{ m}$
 $\pm 0,5 \text{ mm}$ i området $2,5-14,3 \text{ m}$
 $\pm 1,0 \text{ mm}$ i området $14,4-19,2 \text{ m}$

$\pm 2,0 \text{ mm}$ i området $> 19,2 \text{ m}$

Hvis der i stedet anvendes en korrektionstabel ved brugsmålingen kan usikkerhedsgrænsen sættes til $\pm (0,8 \text{ mm} + L \cdot 0,09 \text{ mm/m})$.

I brugssituationen foregår der ikke målinger, hvor målebåndet er uunderstøttet, og brugsmålebånd og betonelement har samme temperatur ved målingen. Ved måling fra mindre veldefinerede kanter på betonelementet anvendes stålvingler m.m. til at angive målepunkterne.

Hvis nulpunktet på brugsmålebåndet ikke er defineret ved en skubbehage eller der ikke kan forekomme "slæk" eller bøjning i skubbehagen, fås følgende usikkerhedsgrænser:

$U = \pm (1,0 \text{ mm} + L \cdot 0,09 \text{ mm/m})$ ($k = 2$) for $L = 0,0-2,4 \text{ m}$

$U = \pm (1,1 \text{ mm} + L \cdot 0,09 \text{ mm/m})$ ($k = 2$) for $L = 2,5-14,3 \text{ m}$

$U = \pm (1,5 \text{ mm} + L \cdot 0,09 \text{ mm/m})$ ($k = 2$) for $L = 14,4-19,2 \text{ m}$

$U = \pm (2,5 \text{ mm} + L \cdot 0,09 \text{ mm/m})$ ($k = 2$) for $L > 19,2 \text{ m}$

Der er ikke noget krav fra normer, standarder eller lignende til nøjagtigheden på længdebestemmelsen. I "Tolerancer for betonelementers hovedmål" er tolerancerne angivet til $\pm 5 \text{ mm}$ ved elementer på $0,0-2,4 \text{ m}$ og $\pm 30 \text{ mm}$ for elementer på $14,4-19,2 \text{ mm}$.

Beregningen er baseret på et eksternt kalibreringscertifikat, der angiver $U = \pm (0,020 \text{ mm} + L \cdot 0,004 \text{ mm/m})$. Et andet eksternt certifikat angiver $\pm (0,015 \text{ mm} + L \cdot 0,020 \text{ mm/m})$. Beregning med denne certifikatværdi resulterer i samme usikkerhedsgrænse ved brug.

2.3 Covermeter

Usikkerhedsgrænsen ved måling med covermeter kan angives til:

$U = \pm 1,0 \text{ mm}$ ($k = 2$)

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Covermeteret kalibreres mod armering placeret under en ueftergivelig mellemlægsklods, som ikke indeholder metallisk/magnetisk materiale. "Klods-en" er flere gange større end måleskoen på covermeteret, og armeringen stikker mindst 100 mm ud i hver ende af "klods-en". Dæklaget er defineret som mellemlægsklodsens tykkelse.

Det "korrekte" dæklag måles i selve måleopstillingen med skydelære, der er kalibreret med en usikkerhed på $\pm 0,025 \text{ mm}$ og en aflæsningsnøjagtighed på $\pm 0,025 \text{ mm}$.

Kalibreringen sker ved temperaturer tæt på 20°C .

Covermeteret kan aflæses med nøjagtighed på $\pm \frac{1}{4} \text{ mm}$.

Kalibreringen sker ved samme typer armering (materiale, dimension), som anvendes i betonelementerne, og der udarbejdes en kalibreringstabel for hver type.

Der måles kun ved simple armeringsføringer, eller der kalibreres også ved aktuelle, komplicerede armeringsføringer. Der måles kun på flader støbt mod glat forskalling og kun ved dæklag op til 40 mm og/eller kun på beton, der ikke indeholder store mængder silica ($< 7\%$) jernholdigt tilslag.

Der er ikke noget krav fra normer, standarder eller lignende til nøjagtigheden af bestemmelsen af armeringens dækkende betonlag.

British Standard BS1881: Part 204: 1988 angiver en sandsynlig nøjagtighed i brugssituationen på $\pm 2,0$ mm for kalibrerede covermetre.

2.4 Prell-hammer

Da prell-hammeren anvendes til at give et udtryk for en betontrykstyrke via en kalibreringskurve er der tale om en indirekte målemetode.

Den egentlige usikkerhedsgrænse kan derfor først bestemmes, når den aktuelle kalibreringskurve er fastlagt ved forsøg.

I dette projekt er der beregnet et tænkt eksempel, hvor kalibreringskurven er en ret linie imellem to punkter. Punkt 1 er defineret som en rekylværdi på 25, der svarer til en trykstyrke på 15 MPa. Punkt 2 er defineret som en rekylværdi på 42, der svarer til trykstyrke på 45 MPa.

Ud fra dette eksempel kan usikkerheden ved måling med prell-hammer angives til:

$$U = \pm 6 \text{ MPa } (k=2)$$

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Der udarbejdes en kalibreringskurve for prell-hammeren, som viser sammenhængen imellem rekylværdien og trykstyrken.

Kalibreringskurven optegnes på baggrund af rekylværdier målt på støbte betonterninger, der efterfølgende trykkes til brud i trykprøvemaskine.

Terningerne måler $150 \cdot 150$ mm på trykfladerne. Terningerne opmåles med en skydelære, der er kalibreret. Terningen fastholdes ved måling af rekylværdien. Rekylværdien bestemmes både ved vandret og lodret måling, og der optegnes en kalibreringskurve for hver.

Ved vandret måling fastholdes terningen i trykprøvemaskinen med et tryk på 5,5 tons. Ved lodret måling fastholdes terningen, der er placeret på et hårdt, ikke-eftergiveligt underlag, med 400 kg lodder. Trykprøvemaskinen er kalibreret og opfylder kravene til klasse 2. Rekylværdien beregnes som gennemsnittet af otte aflæsninger. Aflæsningerne kan foretages med en nøjagtighed på $\pm 1/4$ værdi.

Terningerne opbevares indtil forsøget under forhold, der svarer til betonelementernes og bestemmelsen af kalibreringskurven sker ved en modenhed svarende til den modenhed, elementerne normalt har ved bestemmelse af afføringsstyrken.

Der er ikke krav i normer, standarder eller lignende til nøjagtigheden af bestemmelse af trykstyrke ved anvendelse af prell-hammer.

2.5 Trådspændingsmåler

Usikkerhedsgrensen ved måling med trådspændingsmåler kan angives til:

$U = \pm (0,2 + F \cdot 0,06) \text{ kN}$ ($k = 2$), hvor F indsættes i kN ved $F < 100 \text{ kN}$.

$U = \pm (1,2 + F \cdot 0,06) \text{ kN}$ ($k = 2$), hvor F indsættes i kN ved $F > 100 \text{ kN}$.

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Trådspændingsmåleren kalibreres eksternt.

Kraften kan aflæses direkte uden omsætningstabeller.

Trådspændingsmåleren kan aflæses med en nøjagtighed på 0,1 kN i området 0-100 kN og på 1 kN i området 100-150 kN.

Trådspændingsmåleren er kalibreret på aktuelle trådtyper (materiale, antal tråde, dimensioner)

Der er ikke krav i normer, standarder eller lignende til nøjagtigheden af bestemmelse af opspændingskraft.

2.6 Termometer

Usikkerhedsgrensen ved måling af temperatur kan angives til:

$U = \pm 0,7^\circ \text{ C}$ ($k=2$) ved måling af vandtemperatur i lagringskar

$U = \pm 1,3^\circ \text{ C}$ ($k=2$) ved måling af betontemperatur

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Termometret (visertermometer) kalibreres mod et referencetermometer (kviksølvtermometer) ved sammenlignende måling i vandbad. Der accepteres en forskel i visning på henholdsvis max. $\frac{1}{4}^\circ \text{ C}$ og max. 1° C for termometer til måling af henholdsvis vandtemperatur og betontemperatur. Hvis der i stedet anvendes korrektionstabel kan usikkerhedsgrensen sættes til $\pm 0,6^\circ \text{ C}$ for begge termometre.

Referencetermometret kan aflæses med en nøjagtighed på $\pm 0,05^\circ \text{ C}$, og brugstermometret kan aflæses med en nøjagtighed på $\pm 0,25^\circ \text{ C}$.

Der er ikke krav i normer, standarder eller lignende til nøjagtigheden af temperaturbestemmelse. DS 423.21 angiver en tolerancegrænse for den tilstræbte temperatur i lagringskar på $\pm 2^\circ \text{ C}$. DS 423.11 angiver krav til nøjagtigheden af termometer til bestemmelse af betontemperatur på $\pm 2^\circ \text{ C}$.

2.7 Analysevægt

Usikkerhedsgrensen ved vejning på "analysevægt" (lille laboratorievægt, max. 6 kg) kan angives til:

$U = \pm (0,15 \text{ g} + m \cdot 0,048 \text{ g/kg})$ ($k = 2$), hvor m er belastningen i kg.

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Vægten kalibreres med lodder med en samlet usikkerhed på max. $\pm 0,015 \text{ g}$ pr. kg (svarer til OIML-klasse F_2 - dog kun gældende for en samlet vægt af lodder på mindst 100 g). Vægtens deling er 0,1 g. Ved kalibreringen accepteres en fejlvisning på 0,1% i forhold til loddernes vægt. Hvis der i stedet anvendes korrektionstabel kan usikkerhedsgrensen sættes til $\pm (0,14 \text{ g} + m \cdot 1,16 \text{ g/kg})$. Både ved brug og kalibrering sker aflæsning kun, når sidste

ciffer er helt i ro. Vægten anvendes til vejning af tilslag i prøvestørrelse over 100 g.

DS 423.11 angiver ved bestemmelse af fugtindhold i tilslag et krav til bestemmelsen af prøvens masse på 0,1%.

2.8 Laboratorievægt

Usikkerhedsgrænsen ved vejning på "laboratorievægt" (stor laboratorievægt, max. 30 kg) kan angives til:

$$U = \pm (28 \text{ g} + m \cdot 0,65 \text{ g/kg}) \quad (k = 2), \text{ hvor } m \text{ er belastningen i kg.}$$

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Vægten kalibreres med lodder med en samlet usikkerhed på max. $\pm 0,015 \text{ g/kg}$ (svarer til OIML-klasse F_2 - dog kun gældende for en samlet vægt af lodder på mindst 100 g). Vægtens deling er 10 gram. Ved kalibreringen accepteres en fejlvisning i forhold til loddernes vægt på $\pm 10 \text{ gram}$. Hvis der i stedet anvendes korrektionstabel kan usikkerhedsgrænsen sættes til $\pm (25 \text{ g} + m \cdot 0,65 \text{ g/kg})$. Både ved brug og kalibrering sker aflæsning kun, når sidste ciffer er helt i ro. Vægten anvendes til vejning af beton i prøvestørrelse på ca. 10-20 kg.

DS 423.16 angiver ved måling af frisk betons densitet, at vægten skal have en nøjagtighed på 0,2%. Kravet skal således sammenholdes ved usikkerhedsgrænsen ved kalibrering, som er $\pm (6 \text{ g} + m \cdot 0,065 \text{ g/kg})$.

2.9 Trykpresse

Usikkerhedsgrænsen for bestemmelse af brudkraft og brudspænding kan angives til:

$$U = \pm 0,046 \text{ kN/kN} \quad (k=2) \text{ for } \varnothing 150 \text{ mm betoncylinder} \\ \pm 0,048 \text{ kN/kN} \quad (k=2) \text{ for } \varnothing 100 \text{ mm betoncylinder}$$

Usikkerhedsgrænsen er dog ikke fastlagt præcist i den positive retning.

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Trykpressen kalibreres eksternt og har relative fejlvisninger mindre end 2%.

Temperaturen omkring trykpressen ændrer sig ikke nævneværdigt. Trykprøvnin-gen sker iht. DS 423.23, dog med anvendelse af cylinderformens nominelle diameter ved beregningen af brudspændingen.

2.10 Måleværktøj - muffediameter

Usikkerhedsgrænsen ved måling af muffediameter i IG-rør med måleur monteret i stativ kan angives til:

$$U = \pm (197 \text{ } \mu\text{m} + n_{\text{mikro}} \cdot 4,6 \text{ } \mu\text{m} + D \cdot 37,0 \text{ } \mu\text{m/m}) \quad (k=2), \text{ hvor } n_{\text{mikro}} \text{ er antallet af forlængere på mikrometerskruen og } D \text{ er diameteren af muffen i meter.}$$

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Muffestang kalibreres mod mikrometerspærmål. Måleur monteret i stativ kalibreres mod muffestang. Mikrometerspærmålet kan aflæses med en nøjagtighed på $\pm 1/200$ mm, og måleuret kan aflæses med en nøjagtighed på $\pm 1/20$ mm. Muffestang, mikrometerspærmål og måleværktøj (måleur monteret i stativ) er lavet af stål.

Kalibreringen sker ved temperatur tæt på 20°C . Ved brugsmålingen har betonrør og måleværktøj samme temperatur, og måleværktøjet skilles ikke ad imellem kalibrering og brug. Der accepteres en forskel i visning på $\pm 0,1$ mm mellem måleur og muffestang.

Såfremt der korrigeres for fejlvisningen i brugssituationen er usikkerhedsgrænsen:

$$U = \pm (159 \mu\text{m} + n_{\text{mikro}} \cdot 4,6 \mu\text{m} + D \cdot 37,0 \mu\text{m/m}) \quad (k=2).$$

De deklarerede tolerancer for muffediameter, der er oplyst, ligger i intervallet fra $\pm 0,8$ mm for $\varnothing 300$ til $\pm 1,3$ mm for $\varnothing 1600$.

2.11 Måleværktøj - spidsendediameter

Usikkerhedsgrænsen ved måling af spidsendediameter, IG-rør med måleur monteret i stativ kan angives til:

$$U = \pm (179 \mu\text{m} + n_{\text{mikro}} \cdot 4,6 \mu\text{m} + D \cdot 235 \mu\text{m/m}) \quad (k=2), \text{ hvor } n_{\text{mikro}} \text{ er antallet af forlængere på mikrometerskruen og } D \text{ er diameteren af spidsenden i meter.}$$

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Spidsstangen kalibreres med mikrometerspærmål. Måleur monteret i stativ kalibreres mod spidsstang. Mikrometerspærmålet kan aflæses med en nøjagtighed på $\pm 1/200$ mm, og måleuret kan aflæses med en nøjagtighed på $\pm 1/20$ mm.

Spidsstang, mikrometerspærmål og måleværktøj (måleur monteret i stativ) er lavet af stål.

Kalibreringen sker ved temperatur tæt på 20°C . Ved brugsmålingen har betonrør og måleværktøj samme temperatur, og måleværktøjet skilles ikke ad imellem kalibrering og brug. Der accepteres en forskel i visning på $\pm 0,1$ mm mellem måleur og spidsstang.

Såfremt der korrigeres for fejlvisningen i brugssituationen er usikkerhedsgrænsen:

$$U = \pm (136 \mu\text{m} + n_{\text{mikro}} \cdot 4,6 \mu\text{m} + D \cdot 235 \mu\text{m/m}) \quad (k=2),$$

De deklarerede tolerancer for spidsendediameter, der er oplyst ligger i intervallet fra $\pm 0,65$ mm for $\varnothing 300$ og $\pm 1,35$ mm for $\varnothing 1600$.

2.12 Skydelære

Usikkerhedsgrænsen ved måling af diameter og højde på betoncylinder med skydelære, kan angives til:

$$U = \pm (82,5 \mu\text{m} + L \cdot 58,8 \mu\text{m/m}) \quad (k=2), \text{ hvor } L \text{ indsættes i meter.}$$

Usikkerhedsgrensen ved måling af sætmålskeglens øvre og nedre indvendige diameter med skydelære, kan angives til:

$U = \pm (58,8 \mu\text{m} + L \cdot 44,6 \mu\text{m/m})$ ($k=2$), hvor L indsættes i meter.

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Skydelæren kalibreres eksternt.

Skydelæren har en opløsning på 1/20 mm og en målelængde på 500 mm.

DS 423-serien følges.

Diameter og højde på en betoncylinder skal i henhold til DS 423.20 ligge indenfor $\pm 1,0\%$ af målene $\varnothing 100$, $\varnothing 150$, $\varnothing 200$, $\varnothing 300$; dvs intervallet fra $\pm 1,0$ mm til $\pm 3,0$ mm.

Sætmålskeglens øvre og nedre indvendige diameter skal i henhold til DS 423.12 ligge indenfor ± 2 mm.

2.13 Stålvinkel, retskinne, bladmål

Usikkerhedsgrensen ved måling af planhedsafvigelse på betoncylinders trykflader med stålvinkel og bladmål kan angives til :

$U = \pm 22 \mu\text{m}$ ($k=2$)

Usikkerhedsgrensen ved måling af rethedsaftigelse på cylinderflade med stålvinkel og bladmål kan angives til:

$U = \pm 56 \mu\text{m}$ ($k=2$), for $\varnothing 150$ mm betoncylinder

$U = \pm 39 \mu\text{m}$ ($k=2$), for $\varnothing 100$ mm betoncylinder

Usikkerhedsgrensen ved måling af vinklen mellem trykflade og cylinderflade med stålvinkel og måleklods kan angives til:

$U = \pm 58 \mu\text{m}$ ($k=2$), for $\varnothing 150$ mm betoncylinder

$U = \pm 43 \mu\text{m}$ ($k=2$), for $\varnothing 100$ mm betoncylinder

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Udstyret kalibreres eksternt. Stålvinklen (retskinne) har en usikkerhed på $\pm 0,01$ mm, og bladmålet har en usikkerhed på $\pm 0,002$ mm.

DS 423-serien følges.

Planhedsafvigelsen på en betoncylinder skal i henhold til DS 423.20 ligge indenfor $\pm 0,0005$ d med afrundning opad til nærmeste 0,05 eller 0,1 mm; dvs på hhv. $\pm 0,05$ mm og $\pm 0,075$ mm, når diameteren for betoncylinderen sættes til hhv. 100 mm og 150 mm.

Rethedsaftigelsen på en betoncylinder skal i henhold til DS 423.20 ligge indenfor $\pm 0,002$ d; dvs på hhv. $\pm 0,2$ mm og $\pm 0,3$ mm, når diameteren for betoncylinderen sættes til hhv. 100 mm og 150 mm.

Vinklen mellem trykflade og cylinderflade skal i henhold til DS 423.20 ligge indenfor $\pm 0,5^\circ$, svarende til $\pm 2,6$ mm for en cylinder med en højde på 300 mm, samt $\pm 1,7$ mm for en cylinder med en højde på 200 mm.

2.14 Pressurmeter

Ved gennemgang af usikkerhedsbudget for pressurmeter er anvendt en indirekte målemetode; dvs. en målemetode, i hvilken værdien af luftindholdet opnås ved måling af størrelser, som er funktioner af luftindholdet gennem matematiske formler. De omtalte størrelser er tryk og volumen og regneudtrykket kan udtrykkes som beskrevet i afsnit 15.2.3 ligning (1) og (2) vha. målemetodens princip Boyle-Mariottes Lov 2 gange og Daltons lov.

I dette projekt er der beregnet et kalibrerings- og brugseksempel, hvor kalibreringspunktet 5,0% og brugsmålepunktet 5,0% er afprøvet.

Ud fra dette eksempel kan usikkerhedsgrænsen ved måling af luftindhold med pressurmeter angives til:

$U = - 0,40\%$ ($k = 2$) ved 5,0% luftindhold

Ovenstående er givet ud fra følgende forudsætninger:

Boyle-Mariottes lov og Daltons lov anvendes.

Processen forudsættes at foregå isotermisk dvs. ved konstant og ensartet temperatur.

Kalibrerings- og målesituationseksemplerne er beregnet efter størrelserne:

P_t , hPa	Tryk i trykkammeret
P_a , hPa	Tryk målt efter åbning af ventil
V_t , ml	Volumen af trykkammer
V_o , ml	Beholderens totale volumen
ρ_v , kg/m ³	Densitet af aftappet vand
M , g	Massen af aftappet vand
V_{oz} , ml	En fast opmålt eller antaget værdi for beholderens volumen

Ved beregning af eksemplet i afsnit 15 er størrelserne fastlagt som angivet i skemaet:

Størrelser	Kalibreringspunkt 5%	Brugsmålepunkt 5%
P_k , hPa	1000	1000
P_m , hPa	529,4	529,4
V_k , ml	450	450
V_o , ml	8000	8000
ρ , kg/m ³	1000	-
M , g	400	-
V_{of} , ml	8000	-

Det forudsættes, at temperaturniveauet både ved kalibrering og brug er 20° C, men at temperaturforskelle mellem vand, pressurmeter og omgivelser i kalibreringssituationen er ± 4° C og at temperaturforskelle mellem beton, pressurmeter og omgivelser i brugssituationen er ± 20° C.

Nedenstående kan konkluderes ud fra de analyser, der er foretaget i afsnit 15, skema 1, hvor pressurmeterspandens volumen, kalibrerings- og brugsmålepunktet samt temperaturniveau og temperaturforskelle varieres:

- Volumen af pressurmeterbeholderen i intervallet 5000-9000 milliliter har ikke indflydelse på usikkerhedsgrænsen.
- Usikkerhedsgrænsen i brugssituationen bliver større, jo højere luftindhold der aflæses på manometeret, såfremt kalibreringspunktet og brugsmålepunktet er identiske.
- Usikkerhedsgrænsen i brugssituationen bliver større, hvis pressurmeteret anvendes ved højere luftindhold, end det er kalibreret ved.
- Temperaturniveauet i brugssituationen har ingen nævneværdig indflydelse på usikkerhedsgrænsen. Det er alene temperaturforskelle mellem beton, pressurmeter og omgivelser, som har betydning.

2.15 Oversigt over udstyr og usikkerhedsgrenser

Udstyr	Indregnet, accepteret fejlværdi ved kalibrering 1)	Usikkerhedsgrense (k=2) ved kalibrering	Usikkerhedsgrense (k=2) ved brug
Stålmålebånd	± 0,3 mm, L = 0,0-2,4 m ± 0,5 mm, L = 2,5-14,3 m ± 1,0 mm, L = 14,4-19,2 m ± 2,0 mm, L > 19,2 m	± (0,54 mm + L · 0,024 mm/m) ± (0,70 mm + L · 0,024 mm/m) ± (1,2 mm + L · 0,024 mm/m) ± (2,4 mm + L · 0,024 mm/m)	± (1,2 mm + L · 0,09 mm/m) ± (1,2 mm + L · 0,09 mm/m) ± (1,6 mm + L · 0,09 mm/m) ± (2,6 mm + L · 0,09 mm/m)
Covermeter	Korr. tabel udarbejdes	± 0,53 mm	± 1,0 mm
Prell-hammer	Korr. tabel udarbejdes	Ikke beregnet	± 6 MPa
Trådspændingsmåler	Korr. tabel udarbejdes	Kalibreres eksternt	± (0,2 kN + F · 0,06 kN/kN), F < 100 ± (1,2 kN + F · 0,06 kN/kN), F > 100
Termometer	± 0,5° C / ± 1,0° C	± 0,6° C / ± 1,2° C	± 0,7° C / ± 1,3° C
Analysevægt	± 1 g/kg	± (0,088 g + m · 1,16 kg/kg)	± (0,14 g + m · 1,16 g/kg)
Laboratorievægt	± 10 g	± (16 g + m · 0,065 g/kg)	± (28 g + m · 0,65 g/kg)
Trykpresse	± 2% (klasse 2)	Kalibreres eksternt	± 0,046 kN/kN, Ø150 mm cyl. ± 0,048 kN/kN, Ø100 mm cyl.
Muffediameter	± 0,1 mm	± (139 µm + η_{muff} · 4,6 µm + D · 18,4 µm/m)	± (197 µm + η_{muff} · 4,6 µm + D · 37 µm/m)
Spidsendediameter	± 0,1 mm	± (151 µm + η_{spids} · 4,6 µm + D · 18,4 µm/m)	± (179 µm + η_{spids} · 4,6 µm + D · 235 µm/m)
Skydelære	Korr. tabel udarbejdes	Kalibreres eksternt	± (82,5 µm + L · 58,8 µm/m), betoncylinder ± (58,8 µm + L · 44,6 µm/m), sætmålskegle
Stålvinkel, retskinne Bladmål	Ingen	Kalibreres eksternt	± 22 µm planhedsafvigelse ± 39 µm Ø100 Rethedsafvigelse ± 56 µm Ø150 ± 43 µm Ø100 Vinklen mellem tryk- ± 58 µm Ø150 flade og cylinderflade
Pressurmeter	Ingen	± 0,26%, v/5% luft	± 0,40% v/5% luft

1) Afvigelse, som accepteres ved kalibrering, er medtaget som et usikkerhedsbidrag selvom det strider imod BIPM's principper. Afvigelser regnes rektangulært fordelt, selvom nogle kilder angiver, at de bør regnes U-formet eller endog medtages med den fulde værdi. I dette afsnit 2 er der for hvert udstyr angivet hvad usikkerhedsgrensen ved brug vil være, hvis der udarbejdes en korrektionstabel i stedet for at acceptere en afvigelse.

AEClaboratoriet
AEC Rådgivende Ingeniører A/S
Staktoften 20
DK-2950 Vedbæk
teleFON: 4566-1266
teleFAX: 4566-1466

Ervin Poulsen
Skovbrynet 8
Nødebo
DK-3480 Fredensborg
teleFON: 4848-5360
teleFAX: 4848-5390

Typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering
reparation · injicering · overfladebeskyttelse
en ny BPS-publikation under udarbejdelse

af
Ervin Poulsen

Juli 1996

Indholdsfortegnelse

Resumé	side 3
Baggrund	side 4
Anvendelse af typiske beskrivelsesafsnit for renovering	side 5
CEN's metoder og principper for betonrenovering	side 6
Renoveringsstrategier, 6	
<i>Værn mod indtrængning af aggressive stoffer, 6</i>	
<i>Fugtstyring, 7</i>	
<i>Erstatning af skadet beton, 7</i>	
<i>Forstærkning af skadede bygningedels, 8</i>	
<i>Injicering af revner, 8</i>	
<i>Forbedring af betons fysiske modstandsevne, 9</i>	
<i>Forbedring af betons kemiske modstandsevne, 9</i>	
<i>Passivering af armering, 9</i>	
<i>Øgning af betons elektriske modstand (resistivitet), 10</i>	
<i>Katodisk styring, 10</i>	
<i>Katodisk beskyttelse, 11</i>	
<i>Anodisk styring, 11</i>	
Arbejdstilsynets krav	side 12
Planlægning, 12	
Fjernelse af beton og ophugning af revner, 12	
Anvendelse af kodenummererede materialer, 13	
<i>Materialevalg, 13</i>	
<i>Injiceringsarbejde, 14</i>	
<i>Malearbejde, 14</i>	
Forudsætninger for anvendelse af BPS-publikationen	side 14
Renoveringsstrategi, 14	
<i>Miljøets betydning for renovering, 15</i>	
<i>Revner, 15</i>	
<i>Valg af materialer, systemer og udførelse, 16</i>	
Diskussion og konklusion	side 17
Betonrenovering ctr. nye betonkonstruktioner, 17	
Beskrivelsesafsnit ctr. norm for betonrenovering, 17	
Litteratur om betonrenovering	side 18
Litteratur om arbejdsmiljø ved betonrenovering	side 19

Typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering

**reparation · injicering · overfladebeskyttelse
en ny BPS-publikation under udarbejdelse**

Resumé

For tiden er en BPS-arbejdsgruppe med økonomisk støtte fra Projekt Renovering ved at færdiggøre en publikation om typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering. Danmark har ingen normer eller Dansk Standard for betonrenovering. Der er derfor tale om et pionerarbejde, og det har naturligvis medført, at der er blevet rejst en række spørgsmål om sikkerhed for reparerede betonkonstruktioner, som er videreført til Dansk Standards planlægningsudvalg for beton, PLU 8.

Til renovering af armerede betonkonstruktioner er der på markedet mange typer reparationsmaterialer. BPS-arbejdsgruppen har ikke taget stilling til de enkelte renoveringsmaterialer, men har derimod søgt at opbygge et system af krav, hvor den projekterende éntydigt og operationelt kan træffe et valg, og hvor den udførende kan vælge en handelsvare, som opfylder de stillede krav.

Det er en god gammel regel, at man ikke kan stille krav til egenskaber hos eller karakteristika for materialer uden at disse egenskaber og karakteristika er definerede. Desuden skal der findes prøvningsmetoder til at afprøve materialer og udført renovering, således at man kan konstatere om de stillede krav er blevet opfyldt. Prøvningsmetoder alene er imidlertid ikke tilstrækkeligt til at vurdere, om de stillede krav er opfyldt med en passende sikkerhed. Dertil kræves accept- og forkastelseskriterier. Alt dette har BPS-arbejdsgruppen søgt at få med i den nye publikation om typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering. Derimod har BPS-arbejdsgruppen ikke taget stilling til, hvad der bør (skal) ske, når de stillede krav til renovering ikke er blevet opfyldt.

Der findes i dag et stort antal materialer til renovering af betonkonstruktioner. De fleste af disse er ikke alene baseret på portlandcement. Polymermodificerede og polymerbundne materialer til fx reparation, injicering og overfladebeskyttelse har på en række områder vist sig bedre egnet end de traditionelle materialer til renovering af betonkonstruktioner.

For de nye renoveringsmaterialer er det ikke alene de mekaniske egenskaber og holdbarheden, som tæller. Også de arbejdsmiljømæssige karakteristika har betydning for valg af renoveringsmaterialer. Her er det ikke betonnormen der bestemmer, men Arbejdstilsynets krav og bestemmelser, som de er udformet i bekendtgørelser og cirkulærer. Dette har BPS-arbejdsgruppen også medtaget.

Baggrund

Dansk Betonforening havde i marts 1994 en temadag om renovering af betonkonstruktioner med deltagelse af repræsentanter for blandt andet myndigheder, bygherrer, rådgivere, entreprenører og materialeleverandører. Temaet var: »Skal vi have en basisbeskrivelse for betonrenovering?«. Der var stor tilslutning på mødet til grundidéen, nemlig at få ensartede regler for betonrenovering, og der blev nedsat en initiativgruppe, som skulle søge at få idéen realiseret.

Forskellige muligheder blev undersøgt, hvoraf den mest realistiske blev ført ud i livet. Boligministeriets Projekt Renovering så dagens lys i 1995, og BPS-centret søgte dér midler til at udarbejde typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering, stort set med initiativgruppen som BPS-arbejdsgruppe.

BPS-centret opnåede støtte til at udarbejde typiske beskrivelsesafsnit for de tre renoveringsteknikker: Reparation, injicering og overfladebeskyttelse af betonkonstruktioner. Belægninger og membraner på gulve og terrændæk er ikke medtaget under »overfladeneskyttelse«. Det bliver forhåbentlig en god begyndelse, som senere vil fortsætte med andre renoverings- og forstærkningsteknikker.

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering arbejder som sædvanligt med en arbejdsgruppe, hvis arbejder løbende sendes ud til høring hos et høringsudvalg. BPS-arbejdsgruppen består af:

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| ■ Jens Martin Eiberg | BPS-centret, DTI Byggeri |
| ■ Carl de Fontenay | COWI |
| ■ Tommy Jacobsen | Betoncentret, DTI Byggeri |
| ■ Jørgen Schou | Fosroc |
| ■ Ervin Poulsen, faglig sekretær | AEClaboratoriet |
| Høringsdeltagerne har været: | |
| ■ Ole Viggo Andersen | Nellemann, Nielsen & Rauschenberger |
| ■ Jens Brandt | RAMBØLL |
| ■ John Zangenberg Hansen | DSB Bygning |
| ■ Bent Jørgensen | Condor Kemi |
| ■ Pernille Stage Keil | Direktoratet for Arbejdstilsynet |
| ■ Christian Munch-Petersen | Betoncentret, DTI Byggeri |
| ■ Dennis Nielsen | Rasmussen & Schiøtz Øst |
| ■ Poul Thejls Nielsen | Boligministeriet |
| ■ Flemming Petersen | Otto Christensen & Kaj Sørensen |
| ■ André Standland | Faxe Kalk |
| ■ Erik Stoltzner | Vejdirektoratet |
| ■ Bo Søgaard | Lemming & Eriksson |
| ■ Peter M. Thorup | Esben Kirkegaard |

Anvendelse af typiske beskrivelsesafsnit for renovering

Man må gøre sig klart, at dét vi får er BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering. Det er ikke en norm eller en standard for betonrenovering på den måde, som vi kender det fra betonnormen DS 411 og basisbetonbeskrivelsen BBB med normerede værdier for specificerede egenskaber og karakteristika for beton. Det er derimod, som titlen siger: Typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering. Det er derfor fortsat den projekterende, som fastsætter de nødvendige egenskaber, som de anvendte renoveringsmaterialer skal have og de karakteristika, der skal gælde for renoveringsarbejdets udførelse. Når disse projekteringsparametre er fastlagt (som hidtil) kan det forventes, at arbejds- og bygningsdelsbeskrivelser for betonrenovering nu bliver meget mere ens og genkendelige fra projekt til projekt. Det kan blive en betydelig lettelse for de projekterende, de udførende og tilsynet. Noget andet er så, at der er behov for at skrive normer for renovering af betonkonstruktioner, som en del andre lande allerede har det, fx Tyskland, ligesom der nu er forslag fremme for, at USA får det, jf. ACI 546R Concrete Repair Guide. Danmark har været foregangsland med hensyn til normer på betonrådet i begyndelsen af dette århundrede, men det er tilsyneladende ikke tilfældet på renoveringsområdet her i 1990'erne, men det kan jo komme, når tiden er inde!

BPS typiske beskrivelsesafsnit leveres på diskette. Den projekterende har derfor et godt grundlag at arbejde videre på. Det forudsættes (som altid), at BPS-publikationens indhold og tilhørende disketter kun anvendes af personer, der er teknisk sagkyndige inden for området: Renovering af betonkonstruktioner. Anvendelse af BPS-publikationen fritager ikke de implicerede i renovering af et betonbyggeri for deres sædvanlige ansvar. Det må naturligvis i hvert enkelt tilfælde vurderes, om et delafsnit i BPS typiske beskrivelsesafsnit er anvendelig til den brug, man agter at gøre af det. Dette svarer nøje til anvendelse af fx betonnormen DS 411.

Det er ved udarbejdelse af BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering tilstræbt, at den projekterende så vidt muligt skal vælge fra. Der er dog tilfælde, hvor den projekterende skal supplere kravformuleringen. BPS-arbejdsgruppen har for at lette dette udarbejdet noter til arbejds- og bygningsdelsbeskrivelse.

Som yderligere hjælp er der udarbejdet en introduktion, som beskriver de generelle principper og metoder for betonrenovering. Denne introduktion er af mere generel karakter, og indeholder også gennemgang af krav i forbindelse med de arbejdsmiljøforhold, som skal være overholdt ved betonrenovering.

I det følgende beskrives de forhold og forudsætninger, som det er søgt at tage hensyn til ved BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering. Beskrivelsen bygger på denne BPS-publikations introduktion.

CEN's metoder og principper for betonrenovering

Den europæiske Standardiseringsorganisation CEN nedsatte et udvalg, som fik til opgave at udarbejde standarder for »Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Construction Works«. En arbejdsgruppe har udarbejdet et forslag »General Principles for the Use of Products and Systems«, som netop (1996) har været til høring og er blevet accepteret. Forslaget indeholder 12 principper, hver med et antal metoder, der bygger på disse principper. Denne fremstilling bygger igen på tyske regler for renovering af betonkonstruktioner, jf. [1].

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering bygger på de principper, som danner grundlag for CEN's arbejde vedrørende reparation, forstærkning og overfladebeskyttelse, suppleret med BPS-gruppens og høringsudvalgets danske erfaringer. Det forventes, at CEN's metoder og principper vil danne grundlag for den fælleseuropæiske standard for reparation, forstærkning og beskyttelse af betonkonstruktioner. BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering udnytter dog kun de principper, som danner grundlag for de valgte renoveringsmetoder, nemlig reparation, injicering af revner og overfladebeskyttelse af betonkonstruktioner.

Her gengives en kort og generel indføring i CEN's metoder og principper for reparation, forstærkning og overfladebeskyttelse af betonkonstruktioner, baseret på introduktionen til BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering.

Renoveringsstrategier

Projektering af betonrenovering bør altid bygge på en strategi, således at skadeudviklingen standses enten før eller i forbindelse med renoveringen. Kun på den måde kan der opnås en holdbar renovering. For typiske skadetyper er sådanne strategier fx formuleret af CEN:

Værn mod indtrængning af aggressive stoffer

Skader kan være forårsaget af indtrængende, aggressive stoffer som fx kan være vand, luftarter og kemikalier. Indtrængning sker hurtigt gennem beton med højt *v/c*-forhold, ikke-komprimeret beton samt beton med defekter og revner. Yderligere indtrængning kan begrænses på forskellige måder, men ophobning af stoffer, der er skadelige for beton og/eller armering i en koncentration over visse kritiske værdier (tærskelværdier) skal i givet fald fjernes eller neutraliseres inden man etablerer beskyttelsen. Beskyttelse kan efter CEN skabes ved følgende metoder:

- Imprægnering, maling og membraner.
- Konstruktiv beskyttelse.
- Tætning af revner ved injicering, spartling etc.

Årsagerne til revnedannelse skal fastlægges inden reparation, idet *aktive revner*, fx fra korroderende armering, ikke blot kan tætnes ved injicering eller overmaling. Det er en nødvendig forudsætning, at årsagerne til aktive revner fjernes, hvis renoveringen skal være holdbar – de tilstrækkelige forudsætninger skabes derefter ved valg af renoveringsmaterialer og udførelsesmetoder.

Af ovennævnte metoder medtager BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering kun overfladebeskyttelse og injicering af revner. Konstruktiv beskyttelse er udeladt, da det er en renoveringsmetode, som er meget afhængig af den enkelte bygningsdel, skadetilstanden og miljøklassen.

Fugtstyring

En del skader på og ændringer af beton skyldes blandt andet betonens fugtighed i en sådan grad, at det er muligt at standse eller hæmme skadeudviklingen ved at styre betonens fugtighed. Nogle typiske skadeårsager, hvor betonens fugtighed (eller mangel på samme) er en styrende parameter er frostska-der, alkali-reaktion og carbonatisering.

Beton kan i almindelighed optage fugtighed fra omgivelserne i form af slagregn, kapillarsugning og fra funktionen (fx vandbeholder og svømmebassin). Fugtindhold, der på den sikre side afviger fra de kritiske værdier i beton, kan være vanskelig at opretholde i længden, da overfladebeskyttelse af beton sjældent er effektiv i hele betonens stipulerede levetid, selv med inspektion, prøvning og udskiftning. Styring af betons fugtindhold kan efter CEN etableres ved følgende metoder:

- Imprægnering, maling og membraner.
- Konstruktiv beskyttelse.
- Tætning af revner ved injicering, spartling etc.
- Udtørring ved opvarmning.
- Elektro-kemisk udtørring.

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering medtager af disse metoder kun overfladebeskyttelse og injicering af revner.

Erstatning af skadet beton

Beton, der har ophobet indtrængende, aggressive stoffer i kritisk koncentration og derfor har mistet sin rustbeskyttende virkning eller er smuldrende og har mistet sammenhæng kan fjernes og erstattes. Det samme er tilfældet med beton, som er skadet ved stød eller slid. Denne fjernelse kan fx ske ved lokal borthugning, eller ved at hele bygningsdele fjernes og erstattes ved genstøbning eller montering. Erstatning af fjernet beton kan efter CEN ske ved følgende metoder:

- Udlægning af mørtel.
- Genstøbning med beton.
- Sprøjtning med beton eller mørtel.

Der kan anvendes cementbundne, polymermodificerede eller polymerbundne mørtler og betoner til reparation. Ved styrkemæssig reparation skal den anvendte cement opfylde de krav, som stilles i DS 411 og DS 427. Ved anvendelse af polymerbunde reparationsmaterialer kan det være vanskeligt at opfylde de krav, som Arbejdstilsynet stiller til maksimalt kodenummer.

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering medtager disse metoder under reparation.

Forstærkning af skadede bygningsdele

Foruden reparation og beskyttelse kan også forstærkning af skadede betonkonstruktioner være aktuel, fx hvor armering og beton i kritiske tværsnit er skadet, og hvor der konstateres fejl i projektering eller udførelse. En eventuel ændring af den statiske model skal tages i regning, og det skal påses, at forstærkningen ikke kan medføre spændinger og revnedannelse i betonen, som kan øge skadeudviklingen efter renoveringen. Forstærkning kan efter CEN ske ved følgende metoder:

- Supplering af eksisterende armering.
- Dybler og ankre.
- Pålimet armering af fladstål, kulfiberbånd eller andet egnet materiale.
- Efterspænding med ekstern spændarmering (spændkabler).
- Injicering af revner for at genskabe trækstyrke.
- Forøgelse af tværsnit og nyttehøjde med mørtel eller beton (påstøbning).

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering medtager af disse metoder kun injicering af revner. Mange vil nok føle savnet af typiske beskrivelsesafsnit for forstærkning, idet dette emne synes at blive mere og mere aktuelt.

Som nævnt indledningsvis er der sket en prioritering inden for renoveringsmetoder og principper, og emnet forstærkning blev af BPS-arbejdsgruppen ikke fundet så betydningsfuldt som reparation, injicering og overfladebeskyttelse. Der er dog ingen tvivl om, at forstærkning står højt på listen, hvis der bliver mulighed for at videreføre det påbegyndte arbejde med BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering.

Injicering af revner

Injicering af revner kan foretages enten for at skabe tæthed eller for at genskabe betonens trækstyrke. Et materiale til injicering skal vælges således, at dets egenskaber er afpasset efter, om den pågældende revne er aktiv, passiv eller latent.

Her er det egenskaber som elasticitet, plasticitet og brudforlængelse, der tæller. Foruden de tekniske egenskaber skal de arbejdsmiljømæssige karakteristika (kodenummer) opfylde Arbejdstilsynets krav.

Hvor formålet er at genskabe betonens trækstyrke skal det dog overvejes, om supplerende konstruktiv forstærkning er påkrævet, idet betonnormen DS 411 kun i få tilfælde tillader udnyttelse af betonens trækstyrke for at opnå normmæssig sikkerhed (bæreevne).

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering medtager injicering af revner, men det er den projekterende, som tager beslutning om hensigten med injicering: Tætning af revnen eller genetablering af trækstyrke hen over revnen.

Forbedring af betons fysiske modstandsevne

Der kan være behov for at genskabe betons overfladestyrke, så en betonoverflade derefter bedre kan modstå mekanisk påvirkning som slid, stød mv. Dette emne er ikke medtaget i BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering.

Forbedring af betons kemiske modstandsevne

Der kan være behov for at øge betonoverfladers modstand mod angreb af syre, salte og andre organiske og uorganiske kemikalier, således at betonoverfladen derefter har forbedrede egenskaber til at modstå disse kemiske angreb. I disse tilfælde er der tale om særligt aggressive miljøer, som ikke dækkes af DS 411. Krav til sammensætning af beton som v/c -forhold, cementindhold, permeabilitet og sulfatresistens findes opstillet i den fælleseuropæiske standard prEN 206, hvor særligt aggressiv miljø (kemisk aggressivt miljø) er underopdelt i tre delmiljøer, jf. SBI-publikationen Beton 8 om »Valg af miljøklasse for betonkonstruktioner«.

Øgning af betons kemiske modstandsevne er ikke medtaget i BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering

Passivering af armering

Hvor armering korroderer som følge af depassivering, fx ved at armeringens dæklag er utilstrækkeligt (fx for tyndt, af porøs beton, bortslidt) eller omdannet (fx chloridholdig, carbonatiseret), skal armeringen passiveres for at standse eller forhindre korrosion. Armering kan dog korrodere ved vagabonderende strøm, selv om dæklaget ville være tilstrækkeligt under normale forhold. Passivering af armering kan efter CEN ske ved følgende metoder:

- Forøge dæklag med mørtel eller beton.
- Erstatning af carbonatiseret beton.
- Realkalisering af carbonatiseret beton ved naturlig diffusion.

- Realkalisering af carboniseret beton ved elektro-kemisk behandling.
- Erstatning af chloridholdig beton.
- Chloridudtrækning fra beton ved elektro-kemisk behandling.

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering medtager af disse metoder ikke renovering af betonkonstruktioner ved elektro-kemiske metoder.

Øgning af betons elektriske modstand (resistivitet)

Ved at øge betons resistivitet kan armerings korrosionshastighed nedsættes, dvs. den elektronstrøm, som foregår gennem beton mellem katode- og anodeområde ved korrosion af armering. Det kan ske ved en tilstrækkelig udtørring af betonen. Når betons resistivitet øges, vil strøm og dermed korrosionshastighed mindskes. Efter CEN kan betons resistivitet øges ved udtørring med følgende metoder:

- Ventileret beklædning og konstruktiv beskyttelse.
- Vandafvisende imprægnering og maling.

Sådanne indgreb kan dog kun virke over for indtrængning af fugt fra slagregn. Over for fugttilførsel fra jord og grundvand via kapillarsugning virker de ovenstående metoder ikke. Der vil kun kunne opnås udtørring af beton i en sådan grad, at betonens fugtindhold er i ligevægt med luftens fugtighed, dvs. ca. års-gennemsnittet for luftens fugtighed i den pågældende lokalitet.

Det er en forudsætning, at ovenstående indgreb ikke i kolde områder medfører kondensering af vanddamp, som derefter ved kapillarsugning kan tilføre betonen fugtighed. Udtørring af beton kan øge carboniseringshastigheden og derved skabe andre problemer.

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering medtager af ovenstående metoder kun beskrivelsesafsnit for overfladebeskyttelse og ikke beskrivelsesafsnit for ventileret beklædning og konstruktiv beskyttelse.

Katodisk styring

Det kan være muligt at skabe sådanne betingelser, at armeringens potentielle katodeområder ikke kan drive en anodereaktion, dvs., at korrosion ikke vil finde sted. Det kan ske ved at begrænse eller standse oxygentilførsel til alle potentielle katodeområder. Begrænsning af oxygen til armerings potentielle katodeområder kan efter CEN ske med følgende metoder:

- Vandmætning af betonen.
- Indkapsling af betonen med oxygentæt membran.

Det er en forudsætning, at armering i den pågældende bygningsdel er elektrisk isoleret fra (ikke i metallisk kontakt med) armering i andre bygningsdele med oxygenadgang. Det skal dog bemærkes, at indkapsling af armerede bygningsdele

med oxygentæt membran kun medfører katodisk styring, så længe membranen er effektiv, dvs. oxygentæt.

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering medtager ikke katodisk styring som en speciel metode. Den projekterende kan, fx ved metodevalget: »Indkapsling af betonen med oxygentæt membran«, anvende afsnittet om overfladebeskyttelse i BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering.

Katodisk beskyttelse

Det er muligt at påføre armering et negativt elektrisk felt, så ingen af armeringens potentielle anodearealer bliver i stand til at afgive elektroner ved anodereaktion, dvs. korrodere. Katodisk beskyttelse er brugbar over for chloridholdig, armeret beton, hvor korrosion endnu ikke har skabt så store skader, at beton skal fjernes, armering udskiftes eller bygningsdelen forstærkes. Katodisk beskyttelse kan efter CEN etableres med følgende to metoder:

- Aktiv katodisk beskyttelse, hvor armeringen påføres et negativt elektrisk felt med ydre strømkilde og betonens overflade påføres en anode, fx af titannet eller elektrisk ledende maling.
- Passiv katodisk beskyttelse, hvor armeringen forbindes med en offeranode, fx af magnesium, aluminium eller zink, i en elektrolyt med kontakt til armeringen. CEN påpeger, at visse typer spændarmering kan skades af katodisk beskyttelse, og katodisk beskyttelse kan derfor ikke anbefales til spændbeton. Der er en ukendt risiko for alkali-reaktion ved at anvende katodisk beskyttelse, hvor betonen indeholder alkalireaktivt tilslag. Der kan ske forsurening af betonen ved anoden, hvis dæklags aftræksstyrke derfor kan mindskes.

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering medtager ikke katodisk beskyttelse under henvisning til Dansk Betonforenings publikation nr. 38:92 »Anvisning i katodisk beskyttelse«.

Anodisk styring

Det er muligt at skabe sådanne betingelser for armeringens potentielle anodeområder, at anodereaktion (korrosion) ikke kan forekomme. Anodisk beskyttelse kan efter CEN etableres ved følgende metoder:

- Give armeringen en belægning, som indeholder aktive pigmenter, der virker som inhibitorer eller som offermaling (fx zink-rig maling).
- Påføre armeringen en elektrisk isolerende belægning (fx opløsningsmiddelfri epoxy), som kan hindre en anodereaktion (korrosion).
- Tilføre armeringens dækkende betonlag inhibitorer ved indstøbning, diffusion eller imprægnering.

CEN påpeger, at belægning på armering kun vil være effektiv, hvis armeringen er rensset tilstrækkeligt inden påføringen, belægningen slutter tæt og forbliver uskadt under armeringsarbejdet.

Påføring af korrosionsbeskyttelse på armeringsstænger kan ændre forankringsfaktoren ζ , jf. DS 2082. CEN påpeger desuden, at elektro-kemiske metoder ikke senere kan anvendes, hvis korrosionsbeskyttelsen er elektrisk isolerende, og der skulle opstå behov for anvendelse af elektro-kemiske metoder (dvs. katodisk beskyttelse og elektro-kemisk realkalisering eller chloridudtrækning).

Arbejdstilsynets krav

De arbejdsmetoder, materialer, stoffer og opløsningsmidler som kan anvendes i forbindelse med reparation, injicering og overfladebeskyttelse af betonkonstruktioner vil medføre arbejdsmiljøforhold, der skal følge arbejdsmiljølovgivningen i Danmark.

Planlægning

Projekterende og bygherre skal i forbindelse med planlægning og projektering af betonreovering tage hensyn til sikkerhed og sundhed ved arbejdets udførelse. Dette betyder blandt andet, at det i planlægningsfasen skal overvejes, hvordan reoveringsarbejdet mest hensigtsmæssigt kan udføres i henhold til arbejdsmiljølovgivningen. Herunder skal det fastlægges hvilke typer materialer, der kan vælges, og hvilke sikkerhedsforanstaltninger (åndedrætsværn, rækværk mv.) dette vil medføre samt hvilke velfærdsforanstaltninger, der er påkrævet.

Fjernelse af beton og ophugning af revner

Hvor betonreovering medfører fjernelse af beton og ophugning af revner, og hvor dette arbejde kan komme til at stå på over en længere tid, kan arbejdet medføre væsentlige gener for de ansatte i form af støj, vibrationer og støv.

Det er i denne sammenhæng et krav i arbejdsmiljøloven, at generne begrænses. Entreprenøren skal anvise de nødvendige, personlige værnemidler for de ansatte.

Entreprenøren skal overveje, om fjernelse af beton som alternativ til manuel hugning helt eller delvis fjernes ved hjælp af en betonsaks, med ekspanderende cement i indborede kanaler eller ved sprængning. Selv bortsprængning af beton kan ofte være forbundet med væsentligt færre gener for de ansatte og eventuelle beboere. Selve sprængningen tager meget kort tid, beboerne skal være advaret i tide, og de ansatte skal befinde sig langt fra sprængningsstedet. Det er dog en nødvendighed, at sprængninger planlægges og udføres af specialuddannet personale.

Anvendelse af kodenummererede materialer

Ifølge kodenumberbekendtgørelsen er det forbudt at anvende højt kodede materialer. Et kodenummer for et materiale består af to tal adskilt af en bindestreg, fx 0-4. Et kodenummereret materiales kodenummer skal være tydeligt anført på materialets emballage.

Tallet før bindestregen angiver de sikkerhedsforanstaltninger, der skal træffes mod indånding af dampe, der stammer fra materialets indhold af flygtige stoffer, herunder organiske opløsningsmidler. Jo større tal før bindestregen des større krav til åndedrætsværn. Der anvendes en talskala fra 00 til 5.

Tallet efter bindestregen angiver de sikkerhedsforanstaltninger, der skal træffes for at undgå at komme i skadelig berøring med det kodenummererede materiale, fx på hud, i øjne, ved spisning og indånding eller rygning. Jo større tal efter bindestregen des større krav til personlige værnemidler-arbejdstøj. Der anvendes en talskala fra 0 til 6.

Materialevalg

Ved valg af malevarer skal der vælges et så lavt kodet, teknisk egnet materiale som muligt. Hvis brugen af et lavtkodet materiale i forhold til et højere kodet materiale vil medføre ikke-uvæsentlige forskelle i materialeegenskaber eller udgifter, skal der foretages en samlet afvejning af de tekniske og økonomiske konsekvenser (fx holdbarhed og tid mellem genbehandling) over for sikkerheds- og sundhedsmæssige hensyn. Dette kan gøres ved fx at forespørge hos mindst to forskellige leverandører, om hvilke lavt og lavere kodede materialer, der kan opfylde de stillede tekniske krav i bygningsdelsbeskrivelsen. Hvis det ikke er muligt at anvende et lavtkodet materiale til en given betonrenovering, skal dette på forlangende kunne dokumenteres over for Arbejdstilsynet.

Ved et lavtkodet materiale forstås et materiale, der til udvendig renovering af udendørs beton (fx facader, altaner og broer) har et tal før bindestregen som højst er 3. For maling, membraner og belægninger gælder særlige forbud, se senere.

Reparationsarbejde

Cementbaserede reparationsmaterialer har et kodenummer, som mindst er 00-4, svarende til kodenummeret for portlandcement. De rene cementmørtler er efterhånden ikke i brug længere som reparationsmaterialer; dertil er holdbarheden og fx svindegenskaberne for dårlige. Derfor bliver cementmørtel modificeret med polymer til brug som reparationsmørtel. Derved forbedres holdbarheden og fx svindegenskaber. Der findes endog svindmodificerede reparationsmørtler. De nye og forbedrede reparationsmaterialers kodenumre kan også derved øges.

Injiceringsarbejde

Traditionelt bestod injiceringsmateriale af en pasta af portlandcement. Krav om at gøre noget ved mindre revner har imidlertid udviklet injiceringsmaterialer af polymer, dels stærke typer, hvor trækstyrken skal reableres over passive revner (typisk epoxy), dels hvor tæthed skal reableres af passive og svagt aktive revner, men hvor styrke ikke er aktuel (typisk polyurethan). Mikrofin cement (kodenummer 00-4) er nu et alternativ til injicering af mellemfine revner. En revne der er injiceret med en pasta af mikrofin cement er ikke diffusionstæt ved fugtvandring i beton og har derfor en fordel frem for de polymere materialer som epoxy og polyurethan til injicering af revner i beton med fugttransport.

Malearbejde

Maling af udendørs beton skal ske med lavtkodede malevarer, hvor højst tilladte tal før bindestregen i kodenummeret er 2. Grundning af udendørs beton skal ske med en lavtkodet grunder (primer), hvor det højst tilladte tal før bindestregen i kodenummeret er 3. Der er ingen krav til nummeret efter bindestregen.

Man skal være opmærksom på, at denne forskel mellem grunder og maling kan føre til følgende groteske situation: En betonoverflade imprægneres med en oligomer silan, hvis kodenummer er 3-1. Da der er tale om første behandling, opfattes materialet som en »grunder«, dvs., at tallet før bindestregen i kodenummeret højst må være 3, og anvendelse af oligomer silan er derfor acceptabel. Efter en del år skal betonoverfladen genbehandles, men det er da ikke muligt at anvende oligomer silan, fordi materialet nu opfattes som en »maling«, hvor tallet før bindestregen i kodenummeret højst må være 2. Dette er uholdbart!

Forudsætninger for anvendelse af BPS-publikationen

Det forudsættes overordnet, at brugeren af BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering har nødvendig indsigt i betonrenoveringens teori og teknik.

Renoveringsstrategi

Det er en nødvendig forudsætning for at kunne opnå en holdbar reparation, at der som led i projektering og udførelse anlægges følgende strategi:

- Den oprindelige årsag til manglende holdbarhed skal fastlægges. Årsagen bør fjernes før renoveringen udføres eller senest i forbindelse med renoveringen.
- Kan den oprindelige årsag ikke fjernes (fx anvendelse af chloridholdige tøsalte), skal fx reparation, forstærkning og overfladebeskyttelse projekteres til at kunne modstå disse påvirkninger og beskytte i renoveringens stipulerede levetid.
- Det skal vurderes, om valg af produkter og udførelsesmetoder til bygningsdeles

reparation, forstærkning og beskyttelse kan medføre uønskede bivirkninger, jf., at reducere af betons fugtighed vil øge carboniseringshastigheden, at påføring af vanddampdiffusionstæt overfladebeskyttelse (maling, membraner, polymerbundne mørtler) kan øge betonens fugtighed og dermed risikoen for frostskafer, samt at anvendelse af de elektro-kemiske metoder kan medføre risiko for brintskørhed hos visse armeringstyper og alkalireaktion i beton med alkalireaktivt tilslag.

- Ved planlægning af større borthugning af beton og fjernelse af armering, skal den projekterende ved beregning efter DS 411 »Norm for betonkonstruktioner« sikre, at den normmæssige brudsikkerhed vil være til stede såvel under som efter arbejdets udførelse.
- Projektering af betonrenovering, fx reparation, injicering, forstærkning og beskyttelse af betonkonstruktioner skal ske i overensstemmelse med Arbejdstilsynets bekendtgørelser nr. 301 og 302 af 13. maj 1993.
- Betonrenovering skal, afhængig af bygherrens ønsker, projekteres og udføres således, at stillede krav til æstetik og vedligeholdelse opfyldes.

Miljøets betydning for renovering

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering forudsætter, at miljøpåvirkning af bygningsdele, som skal renoveres, kan beskrives ved de fire miljøer, som anvendes i DS 411 »Norm for betonkonstruktioner«, dvs.

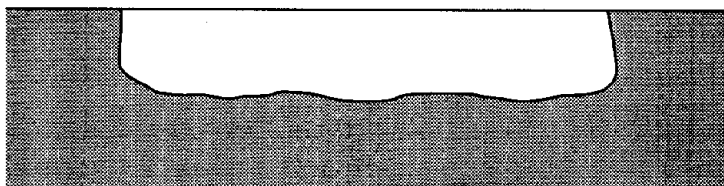
- *Passiv miljøklasse:* Tør ikke-aggressiv atmosfære, navnlig indendørs klima.
- *Moderat miljøklasse:* Fugtig ikke-aggressiv, udendørs såvel som indendørs atmosfære samt strømmende eller stillestående ferskvand.
- *Aggressiv miljøklasse:* Salt- og røgholdig atmosfære, havvand og brakvand.
- *Særligt aggressive miljøer:* Miljømæssige påvirkninger, fx kemisk aggressivitet, hvor DS 411 ikke foreskriver, hvilke forholdsregler der skal tages for at kunne sikre bygningsdelens bestandighed.

BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering omhandler ikke renovering af beton i særligt aggressive miljøer, eksempelvis skader som følge af kemisk aggressiv påvirkning.

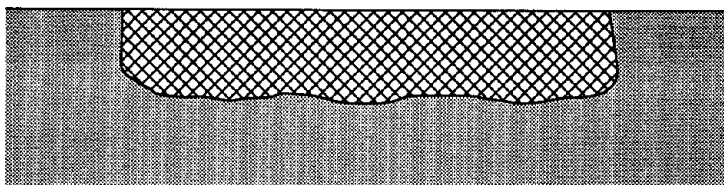
Revner

Revner er en typisk skade på betonkonstruktioner. Der kan være mange årsager til revnedannelse. Dette emne behandles dog ikke i BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering. I stedet henvises til litteraturen.

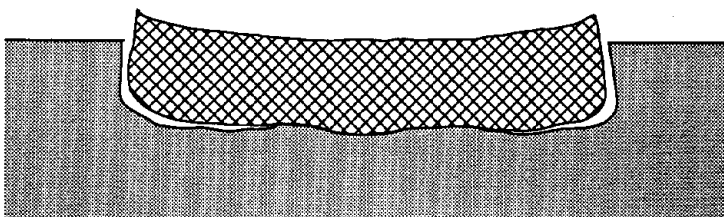
Revner kan opdeles efter fx revnevidde, dybde, intensitet og orientering, som alle har betydning for bygningsdeles betonrenovering. For tætning af revner



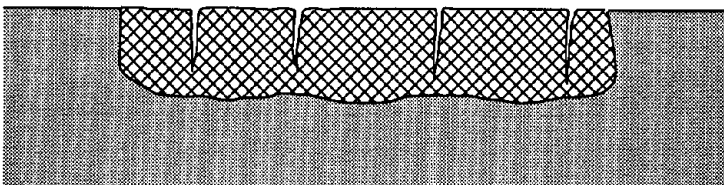
Skadet beton borthugges, brudfladen renses og primes



Reparationsmørtel udstøbes og efterbehandles



Revner ved svind, ringe aftræksstyrke og stor trækstyrke (»ostemad-effekt«)



Revner ved svind, stor aftræksstyrke og lille trækstyrke (»kokasse-effekt«)

Figur 1. En reparation, hvis materiale svinder ved udtørring, kan få forskellige revneformer. Revner kan svække reparationens vedhæftning til betonunderlaget eller skabe revner i reparationens overflade. Begge revneformer kan nedsætte reparationens holdbarhed, fx over for frost og ved indtrængning af aggressive stoffer. Svind er derfor en betydningsfuld parameter for reparationsmørtel – der findes derfor også en særlig svindkompenserende type reparationsmørtel.

er revneviddeændringer versus tid nok det fænomen, som har størst betydning for valg af materialer og systemer. Man opdeler således revner i følgende grupper:

- *Aktive revner*, dvs. revner hvor der foregår en revneviddeændring med tiden, som indikerer, at revneårsagen stadig er til stede. Eksempler på aktive revner kan fx findes som resultat af årsager som svind, temperatur, alkalireaktion, krybning og grundsætning.
- *Passive revner*, dvs. revner hvor revnevidden er konstant og derved indikerer, at revneårsagen er fjernet. Eksempler på passive revner kan fx findes som resultat af årsager som statiske revner fra egenlast og uden krybning samt tidligere aktive revner, hvor revneårsagen er fjernet.
- *Latente revner*, dvs. tidligere aktive revner, som er blevet passive revner, men hvor en ændring i lokalmiljøet kan skabe betingelser for, at revnerne igen kan ændres til aktive revner. Eksempler på latente revner kan fx findes ved alkali-reaktion, der er standset eller ikke kommet i gang på grund af mangel på fugt. Kan en renovering medføre øget fugtighed i betonen, er der betydelig risiko for, at alkalireaktionen bliver aktiv.

Valg af materialer, systemer og udførelse

Der findes et stort antal renoveringsprodukter og renoveringssystemer på det danske marked. Desuden er der mulighed for at vælge mellem mange teknikker til udførelse af reparation, injicering, forstærkning og beskyttelse. Ved valg af materialer, systemer og udførelse anbefales følgende retningslinier:

- Der skal foreligge dokumenteret oplysning (varedeklaration eller certificering) om relevante egenskaber, karakteristika og bivirkninger for de materialer, systemer og udførelser, som kan komme på tale.
- Det skal være dokumenteret, at valgte materialer og systemer er kompatible, dvs. kan samarbejde uden uønskede bivirkninger.
- Det skal være dokumenteret, at valgte materialer og systemer er kompatible med den beton og armering, som skal renoveres.
- Såfremt den valgte udførelse kan medføre defekter på den bygningsdels beton og/eller armering, som skal renoveres, skal disse defekter kunne fjernes i en sådan grad, at skadelig bivirkning ikke opstår.
- De valgte materialer skal under hensyntagen til den aktuelle miljøklasse og valgt udførelse være holdbar i den stipulerede levetid.
- De valgte materialer skal om nødvendigt kunne genbehandles og renoveres i den stipulerede levetid.
- Kodenummeret for valgte materialer skal være lavest muligt under hensyntagen til materialets nødvendige og tilstrækkelige egenskaber.

- Hvor der er mulighed for valg mellem flere typer materialer og systemer skal der tilstræbes et materiale/system, som alt andet lige giver en robust renovering, dvs. en renovering som ikke er følsom over for variation i udførelsesbetingelserne.

Bivirkninger ved reparation

Renovering kan medføre kraftige indgreb i en bærende betonkonstruktion. Det kan påvirke konstruktionens bæreevne, og det kan få betydning for renoveringen, hvad enten der er tale om reparation, injicering eller overfladebeskyttelse. Funktionskravet er, at den projekterede og udførte renovering skal være kompatibel med konstruktionen, dvs. ikke skabe bivirkninger, der vil kunne skade betonkonstruktionen eller dens renovering.

Reparation består normalt i udskiftning af betonkonstruktioners overfladelag, ofte af en størrelsesorden på 1-2 gange armeringens dæklag på det pågældende sted. Der kan også være tale om en mere omfattende udskiftning af beton ved reparation, og så er det klart, at det kan betyde spændingsomlejring og dermed indflydelse på konstruktionens bæreevne og dermed den normmæssige sikkerhed.

Reparation af betonkonstruktioner kan fx afstedkomme følgende ændringer (bivirkninger) i konstruktionen og dens reparation:

- »Tiltrække« spændinger i konstruktionen, hvis betonreparationen er stivere end den omgivende konstruktionsbeton, dvs. hvis reparationsmaterialets elasticitetskoefficient er markant større end konstruktionsbetonens. Der skal tages hensyn til de øgede spændinger i reparationsmaterialet.
- Skabe øget fugtighed i konstruktionsbetonen, hvis betonreparationen har større modstand mod vanddampdiffusion end den omgivende konstruktionsbeton, at der i konstruktionens beton er fugtvandring mod overfladen og at reparationen har en større udstrækning end en »lokalreparation«.
- Formindskelse af reparationens aftræksstyrke (vedhæftning), hvis betonreparationen har en fra konstruktionsbetonen afvigende temperaturudvidelseskoefficient eller svindtøjning, og reparationen ellers har en passende høj trækstyrke (»ostemads-effekten«).
- Revnedannelse i reparationen, hvis reparationsmaterialet har en fra konstruktionsbetonen afvigende temperaturudvidelseskoefficient eller svindtøjning og reparationen ellers har en passende god vedhæftning til konstruktionsbetonen (»kokasse-effekten«).
- Revnedannelse i den tilstødende beton som følge af skadelig alkalireaktion, hvis reparationsmaterialet har højt indhold af alkalimetallioner, og konstruktionsbetonen har været fremstillet med alkalireaktivt tilslag og lavalkaliment (alkalimetallioner diffunderer mod områder med mindre koncentration).

- Korrosionsdannelse på armeringsstængerne i reparationsområderne ved skabelse af mikro-korrosionselementer, fx hvis reparationsmaterialets porevæske er markant forskellig fra konstruktionsbetonens.

Klassificering af armeringsstænger

Reparation af betonkonstruktionsdele som følge af armeringskorrosion (chlorid, carbonatisering mv.) kan medføre, at armeringsstængerne eventuelt skal udskiftes fordi konstruktionsdelens bæreevne ikke er tilstrækkelig eller armeringsføringen ikke opfylder krav i betonnormen DS 411. Ved armeringskorrosion nedsættes både armeringens styrke og deformationsevne. Både styrke og deformationsevne af armering er krævet i betonnormen DS 411.

Før reparation bør man derfor klassificere armeringen. Det kan fx ske efter følgende retningslinier:

- **Kritisk armering.** Armeringsstænger som er afgørende for bygningsdelens bæreevne eller bygværkets stabilitet benævnes kritisk armering. Kritisk armering er typisk bygningsdeles hovedarmering og bøjler (tværarmering) ved overlappingsstød og forankring af hovedarmering.
- **Følsom armering.** Armeringsstænger som ikke er afgørende for bygningsdelens bæreevne, men som konstruktivt forløber således, at der kan forventes holdbarhedsskader, som vil sætte bygningsejeren i betydelige, men unødige vedligeholdssudgifter, benævnes følsom armering. Følsom armering er typisk armering med mindre dæklag end anført i betonnormen DS 411.
- **Ikke-klassificeret armering.** Armeringsstænger som hverken er kritiske eller følsomme benævnes ikke-klassificeret armering. En ikke-klassificeret armering er typisk armeringsstænger, der har virket i montagestadiet, og som derfor ikke er virksomme længere.

Kritisk armering som ikke opfylder krav i betonnormen DS 411, således at der ikke er den normmæssigt krævede sikkerhed, skal bringes i konditionsmæssig tilstand ved reparation. Bygningsejeren kan tillade, at følsom armering ikke bringes i overensstemmelse med krav i betonnormen DS 411. Projekterende og udførende teknikere kan tillade ikke-klassificeret armeringsstænger fjernet inden reparation.

Ovenstående klassificering af armering i en bygningsdel af beton er inspireret af flyindustrien, fx hos Rolls-Royce, hvor man klassificerer alle konstruktionsdele i en moderne flymotor (gas turbine) i »critical, sensitive and unclassified parts«. Flyingeniøren definerer »critical parts« som »those whose failure would hazard the aircraft« og »sensitive parts« som »those whose performance is essential to the economics of the aircraft operation«. De resterende konstruktionsdele betegnes som »unclassified«.

Diskussion og konklusion

Den kommende BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering er et godt skridt på vejen til en mere ensartet systematik på området renovering af betonkonstruktioner.

Betonrenovering contra nye betonkonstruktioner

Danmark var førende i udarbejdelse af normer for projektering og udførelse af betonkonstruktioner i dette århundredes begyndelse. Måske er den kommende BPS beskrivelsesafsnit for betonrenovering begyndelsen på en opvågning her ved århundredets afslutning. Nu skal man imidlertid være opmærksom på, at BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering er ufuldstændig, idet den kun omhandler reparation, injicering og overfladebeskyttelse, medens de nok så vigtige emner som forstærkning og elektro-kemisk renovering fortsat mangler. Der er altså lang vej igen, men man kan håbe på en hurtig opfølgning, således at BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering kan blive mere fuldstændig i en kommende udgave.

Beskrivelsesafsnit contra norm for betonrenovering

Selv om BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering kan komme til at betyde en stor hjælp for både projekterende og udførende, må man ikke glemme, at BPS typiske beskrivelsesafsnit for betonrenovering ikke er nogen norm, der fastsætter talværdier for eller funktionskrav til betonrenoveringens materialer og udførelse. De projekterende skal stadig fastsætte talværdier for renoveringsmaterialer og udførelse, selv om det ville være mere rationelt at normsætte funktionskrav med fastsættelse af (karakteristiske og regningsmæssige) talværdier for visse renoveringsmaterialer og udførelser, fx i de miljøklasser, som kendes fra betonnormen. Der synes at være lang vej til, at betonkonstruktioners vedligeholdelse og renovering kan nå det stadium, som betonnormen nu har været næsten 90 år om at nå (den første danske betonnorm er fra 1908).

Skal man lære af betonnormens gode eksempel skal der på ingeniørskolerne indføres undervisning i betonrenoveringens videnskabelige baggrund – svarende til det niveau, som vi kender fra betonens teknologi, statik og brudmekanik. Som situationen er på ingeniørskolerne i dag, kan det dog synes håbløst at indføre nye discipliner!

Litteratur om betonrenovering

Der findes efterhånden en righoldig litteratur om betonrenovering. Antallet af artikler om renovering af betonkonstruktioner er stadig voksende og efterhånden kommer der sammenfattende håndbøger om emnet. Her kan følgende nævnes:

- **Arne Jeppesen.** »Vedligeholdelse og istandsættelse af beton- og jernbetonkonstruktioner«. Alkaliudvalgets vejledning 2. Alkaliudvalget, SBI / Teknisk forlag, 1961. (149 sider).
- **T. P. O'Brien** (Chairman). »Repair of a Concrete Damaged by Reinforcement Corrosion«. Concrete Society, 1984. (32 sider).
- **American Concrete Institute.** »Structural Repair – Corrosion Damage and Control«. Publikation SCM-8(85), ACI Education Department, 1985. (232 sider).
- **Philip H. Perkins.** »Repair, Protection and Waterproofing of Concrete Structures«. E & FN Spon, 1986. (302 sider).
- **Sven G. Bergström, Göran Möller, Paus Samuelson.** »Betonghandbok, Reparation«. AB Svensk Byggtjänst, 1987. (249 sider).
- **Peter Pullar-Streicher.** »Corrosion Damaged Concrete, Assessment and Repair«. CIRIA, Butterworths, 1987. (99 sider).
- **B. S. Wyatt** (Chairman). »Cathodic Protection of Reinforced Concrete«. Concrete Society, 1989.
- **A. K. Tovey** (Chairman). »Assessment and repair of fire-damaged concrete structures«. Concrete Society, 1990. (77 sider).
- **K. G. C. Berkeley, S. Pathmanaban.** »Cathodic Protection of Reinforcement Steel in Concrete«. Butterworths, 1990. (158 sider).
- **E. A. Kay** (Convenor). »Patch Repair of Reinforced Concrete – subject to reinforcement corrosion«. Concrete Society, 1991.
- **Denison Campbell-Allen, Harold Roper.** »Concrete Structures: Materials, Maintenance and Repair«. Longman Scientific & Technical, 1991.
- **Geoff Mays** (Editor). »Durability of Concrete Structures, Investigation, Repair, Protection«. E & FN Spon, 1991. (288 sider).
- **American Concrete Institute.** »Concrete Repair Basics«. Publikation SCM-24(91), ACI Education Department, 1991. (375 sider).
- **Ted Kay.** »Assessment & Renovation of Concrete Structures«. Longman Scientific & Technical, 1992. (224 sider).
- **R. T. L. Allen** (Editor). »The Repair of Concrete Structures«. E & FN Spon, 1992. (224 sider).
- **Noel P. Mailvaganam.** »Repair and Protection of Concrete Structures«. CRC Press, 1992. (473 sider).

- **Marit Rønne, Øystein Vennesland, Audun Hofsføy, Magne Maage.** »Reparasjonshåndbok for betong«. Rapport STF70 A93010, SINTEF Konstruksjoner og Betong, 1993. (84 sider).
- **Poul Hansen, Jakob Böttzauw, Ervin Poulsen.** »Maling og membraner til betons overfladebeskyttelse«. Publikation R60-93, Dansk Teknologisk Institut. 1993. (209 sider).

Litteratur om arbejdsmiljø ved betonrenovering

Litteratur om arbejdsmiljø i forbindelse med renovering af bygningsdele af beton omfatter bekendtgørelser og meddelelser fra Arbejdstilsynet og Arbejdsministeriet. Udenlandsk litteratur om arbejdsmiljø er ikke relevant, selv om der burde gælde fælleseuropæiske regler. Blandt bestemmelser, relevant for betonrenovering, kan der nævnes følgende dokumenter:

- Arbejdsministeriets bekendtgørelse nr. 1017 af 15. december 1993 om »Indretning af byggepladser og lignende arbejdssteder efter lov om arbejdsmiljø«
- Arbejdsministeriets bekendtgørelse nr. 300 af 12. maj 1993 om »Foranstaltninger til forebyggelse af kræfttrikoen ved arbejde med stoffer og materialer mv.«.
- Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 302 af 13. maj 1993 om »Arbejde med kodenummererede produkter«
- Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 1996 af 26. marts 1985 om »Epoxyharpikser og isocyanater mv.«.
- Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 746 af 28. august 1992 om brug af personlige værnemidler«.
- Bekendtgørelse nr. 501 af 5. oktober 1978 om »Projekterende og rådgiveres pligter mv.«.
- Bekendtgørelse nr. 801 af 4. oktober 1993 om »Støjgrænser på arbejdspladsen«.
- At-meddelelse nr. 3.01.3/1988 om »Epoxyharpikser og isocyanater«.
- At-meddelelse nr. 4.2.1.1/1991 om »Sandblæsning«.
- At-meddelelse nr. 4.06.1/1995 om »Støj på arbejdspladsen«.
- At-meddelelse nr. 14.06.2/1985 om »Hånd-arm vibrationer«.
- At-meddelelse nr. 16/1990 om »Kvartsstøv på byggepladser«.

Øresundskonsortiet
Kastruplundgade 20-24
2770 Kastrup

Øresundskonsortiets Strategier

af

Peter Lundhus, Teknisk direktør

Juli 1996

Øresundskonsortiets Strategier

0. Summary

Øresundskonsortiet has prepared a concrete specification on materials and workmanship with the aim to ensure a service life of 100 years using well-known technology. Even though Design and Construct Contracts are implied Konsortiet wants to maintain control of the quality.

The material-part of the specification requires first class constituents. High-grade Portland cement and silica fume are allowed and for some constructions also flyash and blast furnace cement. Aggregates are required as high-grade and non Alkali-Silica-Reactive. European standards for constituents are used whenever possible.

The requirement to the mix design is primarily a water-cement ratio of maximum 0.40 or 0.45 (depending on the environmental action on the structural elements), which in combination with requirements to the cover of typical 50 or 75 mm ensure the durability.

The quality must be assured and documented by requirements to Quality Systems and Conformity Procedures.

In the workmanship-part of the specification the prime requirement is planning - partly formulated by requirements to Quality Control Procedures and partly by requiring a comprehensive programme of pre-testing and trial castings.

Great effort is taken to secure the Quality of the concrete during the casting and curing operations. Early-age cracking is limited by requiring a low risk of cracking evaluated by stress-calculations based on early-age properties of the concrete.

1. Background

Øresundskonsortiet has decided to follow a formulated strategy when preparing the concrete specification.

The strategy was useful when general discussions occurred during the formulation of the requirements.

The Concrete Strategy was decided in March 1994 and has only been changed in minor details since.

2. Strategy

Øresundskonsortiet wants to define and control the concrete quality.

The quality is defined by the requirements to production of concrete (Materials) including mix design and the requirements to the execution including curing (Workmanship).

The quality is controlled by requirements to inspection, testing and documentation as a part of a quality system in accordance with EN ISO 9001.

The requirements have been established by Konsortiet and their consultants. The requirements shall be based on well-known technology and they shall secure a service life of 100 years with proper maintenance, but without any major repair works.

The strategy is enforced by the preparation of a comprehensive concrete specification as a part of the tender documents.

Konsortiet wants an open competition between contractors, but it shall be ensured that the contractors do not compete on quality.

The specification shall leave as much freedom as possible to the contractors in the choice of concrete mix design, but thorough attention shall be given to the risk of failing to obtain the defined quality.

3. Basis for Specification

The specification are prepared, reviewed and approved based on the following principles and requirements.

3.1 Format of specification

The concrete specification consists of two parts belonging together:

- * Production of concrete (Materials)
- * Execution of concrete (Workmanship)

In each individual section requirements, inspections, testing and documentation are gathered for each individual subject.

The specification is written as a contract document in English.

3.2 Reference documents

The general reference document for the specification is Eurocode 2: "Design of concrete structures".

ENV 206: "Concrete performance, production, placing and compliance criteria" shall not be used as a reference document.

In general European Standards shall be used whenever possible. If it is not possible to refer to a European Standard, reference should be made to other international Standards or to Danish or Swedish Standards.

3.3 Definition of life time

100 years service life shall be ensured for all concrete structures. Easy

replaceable concrete components (e.g. crash barriers) can have a service life of only 50 years.

The service life is defined as the period within which full function is maintained.

Reinforcement corrosion is not allowed to start within the 100 years service life.

Maintenance shall be performed, but major repair-work or replacement shall be avoided. The structures shall be prepared for cathodic protection, but the service life shall be obtained without taking the cathodic protection into account.

3.4 *Definition of well-known technology*

According to main principle number 3 (see section 3.5) well-known technology shall be used.

Well-known technology is defined as technology well-tried with positive results under similar environmental conditions.

Konsortiet will rather use well-known technology with the above definition than use a new (and maybe unsafe) technology in order to try to save costs.

When preparing the specification questions about this principle arised. Which technologies are well-known and by whom. If the common and "well-known" technologies are regarded as unsafe by experts, it may be sensible to use a new but safe - according to experts - technology. This is called an **innovation**.

The main innovations in the specifications are:

- European constituents standards
- Defined Conformity procedures
- Stress calculations for early age cracking
- Service life calculations including the workmanship

3.5 *Formulation of requirements*

Main principles:

The strategy is based on the following main principles:

1. Design and Construct Contracts
2. 100 years service life
3. Application of well-known technology
4. Konsortiet wants to maintain the control of the quality, and the Owner wants the quality to be documented

Principal requirements to the concrete specification

The specification is formulated according to the following directions:

- a. Restrictions on the concrete mix design only to ensure the use of well-known technology.
- b. The concrete mix design chosen by the contractor is evaluated whenever possible through performance tests.

- c. Restrictions on the type of constituents and the corresponding detailed requirements are used to ensure the use of well-known technology and constituents of high quality.
- d. Specific requirements to the execution are used according to experience.
- e. The calculation methods and test methods are defined in any case (with appertaining conformity criteria) in order to demonstrate the quality.
- f. The four invitations for tenders must each contain a concrete specification, however 80-90% of the content is expected to be identical. Differences must be justified by the function of the structures.

In accordance with the strategy the concrete specification comprises requirements that ensure the use of highly classified and tested constituents.

The composition of concrete is controlled by a small number of detailed requirements and when possible by performance tests which give an evaluation of the concrete durability.

In addition a comprehensive pre-testing programme is required. One or more major realistic full scale trial castings shall be performed and the contractor shall state how his execution methods have influenced the mix design and selection of constituent materials. Performance tests are used to the extent that the test methods applied can divide concrete mixes in acceptable and not acceptable mixes or can reflect reality. Most of the methods are carried out as an accelerated version of reality, where measures such as increased temperatures, pressure or concentration are used to get a quick reply to a question that can only be answered by waiting for a 100 years.

As all the mechanisms that deteriorate concrete are not known in details and can not be formulated in exact mathematical terms, the acceleration factor can not be calculated correctly and it is not even possible to remain on the safe side. Durability calculations can therefore not be left to the contractor.

The conflict between the principal requirements concerning the use of well-known technology and few restrictions to the concrete mix design shall thus be reflected in the balance between the extend of performance tests and the limited number of detailed requirements.

4. Basis for Decisions

Based on the state of the art of concrete technology and experience from similar major concrete constructional works, a number of subjects were identified which have to be evaluated before writing the final version of the specification. For each of these subjects a technical note are prepared.

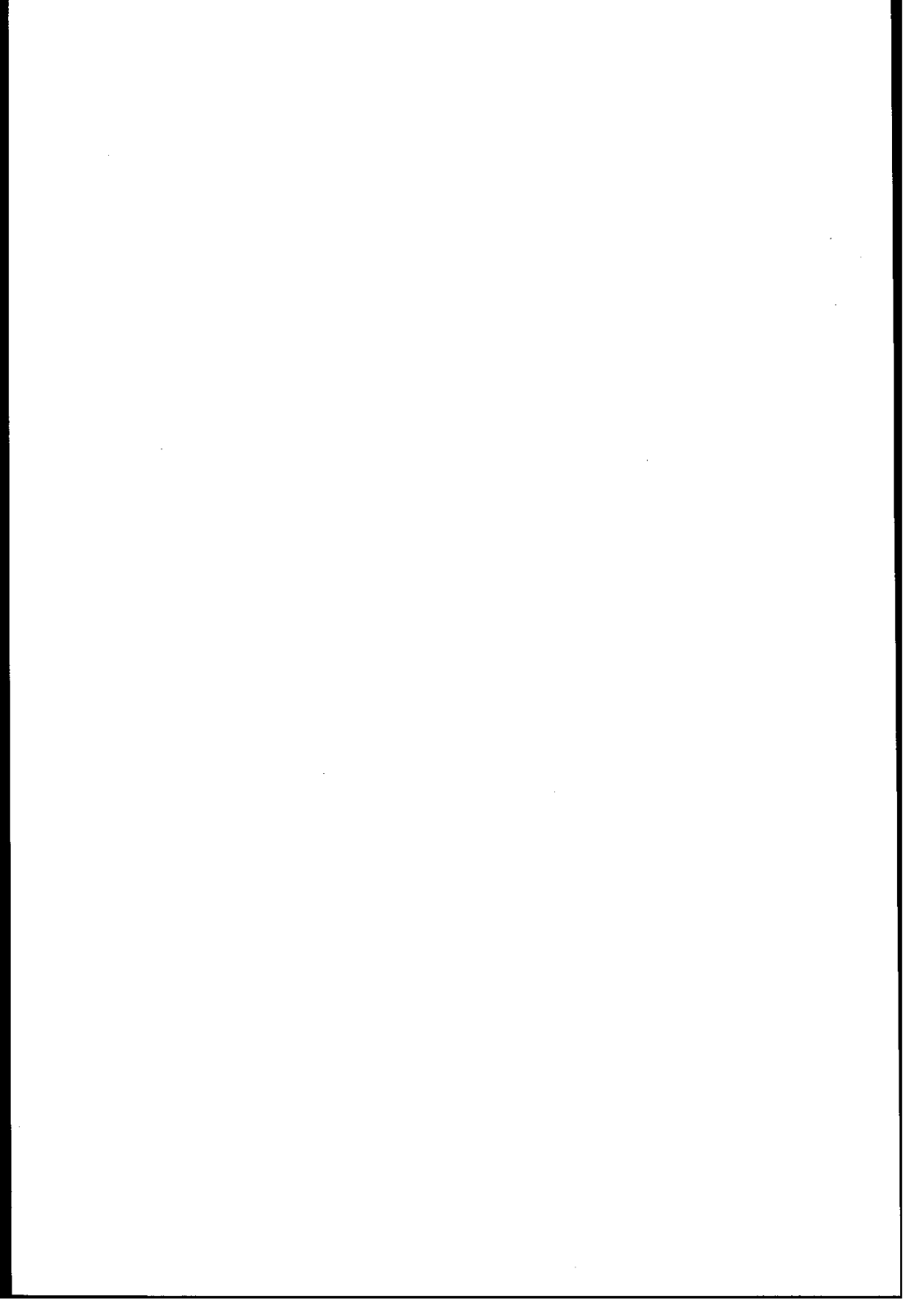
Each technical note comprise a state of the art of the subject concerned and a critical analysis of previously formulated requirements. All technical notes include a conclusion containing the recommended set of requirements.

It is important that the technical notes define the uncertainty in the formulation of the requirements, for example by making a division into

three groups: Well established requirements (e.g. compressive strength), requirements accepted by convention (e.g. scaled material from freeze/thaw testing) or requirements that are not well founded (e.g. micro cracks). It is a necessary acknowledgement that a specification may consist of requirements from all three groups.

Technical notes are prepared about the following subjects:

- Frost Resistance
- Temperature and stress requirements
- Protection against evaporation
- Conformity procedure
- Comparison of concrete requirements with similar requirements and properties for other structures
- Chloride penetration in concrete
- Alkali-silica-reactions
- Blastfurnace cement
- Casting methods
- Crack investigation
- Fire resistance



Vejdirektoratet
Broafdelingen
Niels Juels Gade 13
Postboks 1569
1020 København K

Limfjordstunnelen - 30 års sænketunnelerfaringer

af

akademiingeniør Jens Vejlby Thomsen, Vejdirektoratet
civilingeniør Poul Hededal, RAMBØLL

Juli 1996

Limfjordstunnelen - 30 års sænketunnelerfaringer

INDLEDNING

Sænketunnelteknikken havde premiere på verdensplan i 1894 i Boston, USA. Tunnelen, der i virkeligheden var en 2,7 m diameter afløbsledning fra havneområdet i Boston, blev udført i 15 m lange elementer i beton og tegl.

Den første trafikunnel bygget efter sænketunnelprincippet blev indviet i 1910 og var en jernbanetunnel under Detroit River mellem USA og Canada. Elementerne blev her udført som 80 m lange stålrør, 11 i alt.

Den første sænketunnel i Danmark var Limfjordstunnelen, der blev indviet i 1969. I 1988 blev Guldborgsundtunnelen mellem Lolland og Falster åbnet for trafik, og i disse år pågår arbejdet med Øresundstunnelen (Drogdøntunnelen), der ligeledes er bygget efter sænketunnelprincippet.

I det følgende beskrives den konstruktive opbygning, erfaringerne og de forskellige udførelsesmetoder, der er anvendt i forbindelse med ovennævnte 3 danske sænketunnelprojekter. Ved gennemgangen fokuseres specielt på tunnelernes konstruktive virkemåde, fugekonstruktioner og foranstaltninger til sikring mod vandindtrængning i tunnelerne.

LIMFJORDSTUNNELEN

Konstruktionsbeskrivelse

Limfjordstunnelen, der fører motorvej E45 under Limfjorden øst for Aalborg blev åbnet i maj 1969.

Tunnelanlægget har en samlet længde på 945 m, bestående af 207 m åben rampe mod nord, nordre portalbygning på 15 m, 510 m sænketunnel, 43 m in-situ støbt tunnel, søndre portalbygning på 14 m og 156 m åben rampe mod syd.

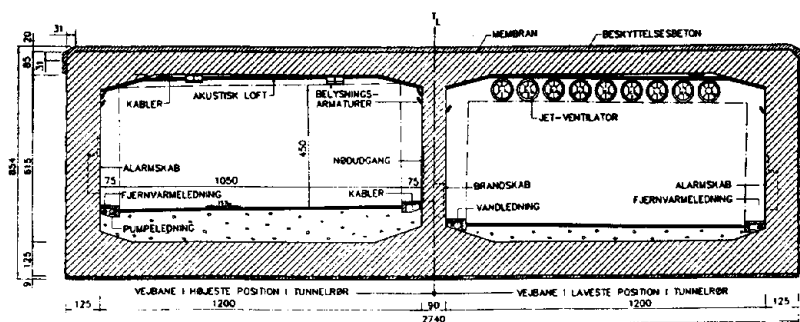
Selve tunnelen er en kontinuert slapt armeret betonkonstruktion med dilatationsfuger og lejer for optagelse af temperaturbevægelser ved søndre og nordre portalbygning.

Tunnelen dilaterer sammenhængende som en monolitisk konstruktion.

Tunneltværsnittet er med en midtervæg opdelt i 2 kasseformede rør, der hver bærer 3 vejbaner á 3,5 m og 2 fortove á 0,75 m. Tunneltværsnittets ydre dimensioner 27,4 x 8,4 m.

I bunden af tunnelen er udstøbt ballastbeton.

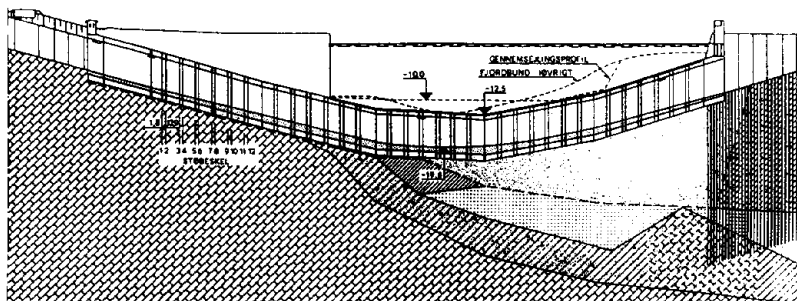
Udvendigt er tværsnittet tætnet med en 2 mm påklæbet butylgum-mimembran, der på tunnelens over- og underside er beskyttet med beton. Som klæber er anvendt cement og vand tilsat emulsion.



Figur 1. Typisk tunneltværsnit

Tunnelen er direkte funderet på et lag underskyllet sand af ca. 1 m's tykkelse. Under dette er skrivekridt på de sydligste ca. 240 m af tunnelen. Mod nord aftager skrivekridtaflejringsen ned til ca. 30 m under tunnelbunden ved nordre portalbygning og overlajres her af ca. 15 m moræner og ca. 15 m indpumpet sand.

Omkring tunnelen er indpumpet sand. I sejlløbet er oversiden af tunnelen beskyttet af en 150 mm armeret betonplade samt en stenkastning, der ligeledes beskytter sandtilfyldningen langs tunnelens sider.



Figur 2. Længdesnit

Sanketunnelen er opbygget af 5 elementer af ca. 102 m's længde. Elementerne er støbt i tørdok i ca. 13 m lange sektioner adskilte med 1,8 m brede åbninger, som blev udstøbt til sidst for at reducere virkningen af betonens hærdesvind. Vandrette ydre støbeskel er udført med fugebånd. Den 43 m in-situ støbte tunneldel blev udført i tør byggegrube.

Ved montage af sanketunnelelementerne blev tætningen af samlingen mellem to elementer etableret ved en gummipakning (GINA-pakning) mellem stålprofiler indstøbt i enderne på elementerne og med en membran fastgjort herpå. Samlingen blev udstøbt på stedet efter sammensvejsning af armeringen i de to elementer. Samlingen mellem sanketunneldelen og den in-situ støbte tunneldel blev udført på tilsvarende vis.

Erfaringer

Allerede kort tid efter, at Limfjordstunnelen blev taget i brug, blev der konstateret omfattende revnedannelser og vandgennemslivninger i tunnelens vægge og lofter.

Revnedannelserne og utæthederne blev primært konstateret omkring sammenstøbningsområder, der, som ovenfor beskrevet, optræder i ca. 2 m's bredde i tunnelens vægge, loft og bund for hver ca. 13 m i tunnelens længderetning. I ca. halvdelen (50-60 stk.) af støbeskellene i disse områder blev konstateret utætheder, og ved stort set samtlige støbeskel forekom udbredt revnedannelse.

Revneproblemerne forstærkes af, at tunneltværsnittet er underarmeret i længderetningen, og armeringen har derfor ingen god revnefordelende virkning. Dette medfører, at en forholdsvis stor del af tunnelens længdeændring vil foregå i de revnede områder, samt at revnerne, når tunnelen trækker sig sammen i kolde perioder, åbner sig, og nye revnedannelser vil indtræde omkring de primære revner. Tilsvarende vil en stor del af tunne-

lens bevægelse under opvarmning ske i de revnede områder, hvor revnerne vil blive presset sammen.

Tunnelens længdebevægelser og den periodevise påvirkning af tunneltværsnittet med en træknormalkraft var forventet og indgik i det samlede projekteringsgrundlag, men ved projekteringen af tunnelen blev den udvendige membran forudsat at være tæt og forblive med at være dette, og der blev derfor ikke truffet specielle foranstaltninger for yderligere at sikre vandtætheden af betonkonstruktionen.

Sammenfattende er vurderet, at den primære årsag til utæthederne og de deraf følgende skader har været, at den udvendige butylgummimembran er utæt. Sekundært skyldes skaderne, at konstruktionsbetonen er revnet, og derfor ikke har kunnet overtage tætningsfunktionen.

Efter at det gennem 1980'erne på forskellig vis uden held var forsøgt at afhjælpe lækageproblemet og nedbrydningen af tunnelen, igangsatte Vejdirektoratet i slutningen af 1980'erne et omfattende undersøgelses- og analysearbejde med henblik på at få fastlagt en holdbar og effektiv reparationsmetode. Efter at have gennemført tekniske, økonomiske, risikomæssige og trafikale vurderinger af en lang række reparationsmetoder blev det fundet, at problemerne bedst blev løst ved en længdesammenspænding af tunnelkonstruktionen og efterfølgende injektions- og betonreparationsarbejder. Disse arbejder blev igangsat i 1993 og forventes afsluttet i 1997-98.

GULDBORDSUNDTUNNELEN

Konstruktionsbeskrivelse

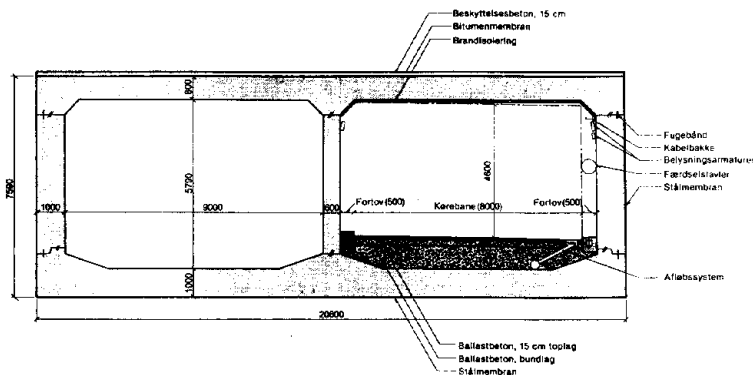
Tunnelanlægget ved Guldborgsund mellem Lolland og Falster blev åbnet knap 20 år efter Limfjordstunnelen - i juni 1988.

Den samlede længde af tunnel og ramper er ca. 1.200 m, hvoraf sænketunnelen udgør 460 m.

Guldborgsundtunnelen er ligesom Limfjordstunnelen projekteret af Christiani & Nielsen A/S efter grundlæggende identiske konstruktions- og udførelsesprincipper.

Tunnelen er udført som en kontinuert monolitisk konstruktion i slapt armeret beton.

Tunnelen består af 2 kasseformede rør hver med en indvendig bredde på 9,0 m og med 2 vejbaner samt 2 fortove. Tunneltværsnittets ydre dimensioner er 20,6 x 7,6 m.



Figur 3. Tværsnit

Tunnelen er direkte funderet på et sandlag, der er skyllet ind imellem tunnelens inderside og en uddybet rende i de eksisterende dynd- og kalkaflejringer. Ovenpå og langs siderne af tunnelen er tilfyldt med sand beskyttet af et stenlag.

Som nævnt er de konstruktions- og udførelsesprincipper, der anvendtes for Guldborgsundtunnelen, i al væsentlighed tilsvarende de principper, der blev anvendt for Limfjordstunnelen. Imidlertid blev det - baseret på erfaringerne fra blandt andet Limfjordstunnelen med svigtende tæthed af den beskyttende membran omkring tunnelen og indtrængende vand i støbeskel mellem segmenter - besluttet at

- 1) forsyne tunnelen med en anden membrantype end butylgummimembranen, som er anvendt på Limfjordstunnelen
- 2) anvende en alternativ udstøbningsprocedure for elementerne
- 3) optimere betonen med henblik på styrke og holdbarhed

ad 1)

Tunnelens bund og vægge er udvendigt beklædt med en membran af 6 mm stålplade og tunnelens overside er forsynet med en membran af bitumenplader beskyttet af et 150 mm tykt lag armeret beton

ad 2)

Tunnelen er opbygget af 2 elementer af 230 m's længde. Hvert af de 2 tunnelelementer blev opdelt i 15 støbeafsnit, alle 15,3 m lange. Der blev successivt udstøbt ét bundpladeafsnit, ét vægafsnit og ét toppladeafsnit hver uge i forlængelse af den foregående uges produktion. Udstøbningen af bundplade, vægge og topplade var indbyrdes forskudt en uge, således at vægafsnittet blev udstøbt ovenpå foregående uges bundpladeafsnit og toppladeafsnittet ovenpå foregående uges vægafsnit. Alle støbeskel blev forsynet med fugebånd.

ad 3)

Ved proportioneringen af betonen var speciel opmærksomhed omkring to overordnede holdbarhedsmæssige krav

- Forebyggelse mod store temperaturgradienter under betonens hærdning
- Lav permeabilitet og vandtæt beton

Montage af tunnelelementerne og tætning af elementsamlingen er udført på tilsvarende vis som for Limfjordstunnelen.

Erfaringer

Det samlede resultat af de nævnte foranstaltninger for at sikre konstruktionen mod vandindtrængning har senere vist sig gunstige, idet der endnu ikke er konstateret væsentlige problemer med indtrængende vand og utætheder i tunnelen. Det bemærkes dog, at der under udstøbningen af det første tunnelelement blev konstateret problemer med gennemgående revner forårsaget af temperaturforskelle imellem de enkelte støbeafsnit (primært mellem vægge og topplade), hvilket foranledigede, at der ved udstøbning af det andet tunnelelement blev indbygget såvel kølemuligheder som opvarmningsmuligheder i elementet til styring af betonens temperatur under hærdning. Revnedannelserne i elementerne blev efterfølgende støbning tætnet ved injektion.

De gode erfaringer med vandtætheden er sandsynligvis opnået primært på grund af den relativt dyre membranløsning snarere end på grund af den valgte udstøbningsmetode og fokuseringen på betonens egenskaber.

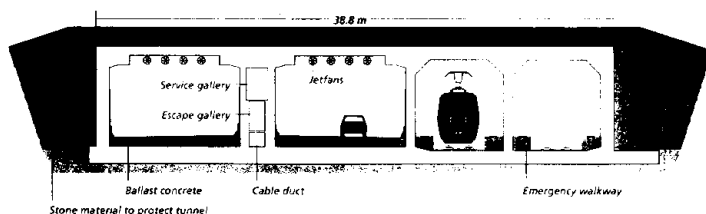
ØRESUNDSTUNNELEN (DROGDENTUNNELEN)

Konstruktionsbeskrivelse

Øresundstunnelen adskiller sig i såvel størrelse som i konstruktions- og udførelsesprincipper fra de to tidligere omtalte tunneler, Limfjordstunnelen og Guldborgsundtunnelen.

Tunnelanlægget vil, når det står færdig i år 2000, have en samlet længde på ca. 5 km, hvoraf 3.510 m udgøres af sænketunnelen.

Tunneltværsnittet består af 2 kasseformede rør for jernbanetrafik, 2 kasseformede rør for motorvejstrafik samt et rør med service- og flugtsvejsgallerier. Tunneltværsnittets ydre dimensioner er 38,8 x 8,6 m.



Figur 4. Tværsnit

Tunnelen opbygges af 20 elementer af 175 m's længde. Elementerne støbes i 8 segmenter hver på ca. 22 m's længde.

For at sikre mod vandindsvivninger er segmenterne indbyrdes forbundet med kontinuerte gummifugebånd indstøbt i kanten af hele tunneltværsnittet mellem segmenterne. Fugebåndene er forsynet med perforerede slanger, der giver mulighed for senere mørtelinjektion i tilfælde af vandgennemsvivninger omkring båndet. Tunnelsegmenterne kan bevæge sig indbyrdes i tunnelens længderetning, mens forskydningslåse sikrer, at segmenternes tværsnit ikke forskubbes i forhold til hinanden. Fugebåndene er mod vandsiden suppleret med en fugtekspanderende forsegling mellem segmenterne og yderst et ca. 40 x 40 mm neopreneprofil. Et neopreneprofil er også indstøbt på tunneltværsnittets indvendige overflade, hvor samlingen mellem segmenterne endvidere er afdækket med en galvaniseret stålplade.

Hvert segment støbes i én kontinuert støbeprocess på ca. 2.800 m³ omfattende både bund, vægge og loft, hvorved problemer med hærderevner i segmenterne minimeres. Tunnelen forsynes ikke med membran. Vandtætheden af konstruktionen baseres således alene på konstruktionsbetonen.

Segmenterne til et element støbes successivt - det ene mod det andet. Under transport og positionering af elementet sikres sammenhængen mellem segmenterne ved hjælp af en midlertidig længdesammenspænding af elementet.

Den primære tætning mellem tunnelelementerne sikres på tilsvarende måde som for Limfjordstunnelen og Guldborgsundtunnelen ved en GINA-pakning klemt mellem elementerne, hvorefter elementerne forbindes med et OMEGA-fugebånd boltet på hver side af fugen, der udgør den sekundære tætning. I modsætning til Limfjordstunnelen og Guldborgsundtunnelen forbliver tunnelelementerne indbyrdes bevægelige i tunnelens længderetning.

SAMMENLIGNING

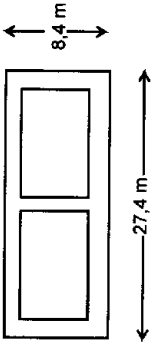
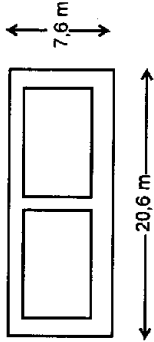
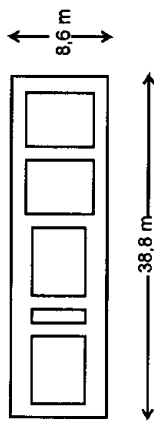
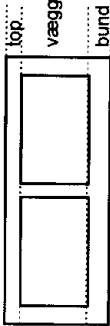
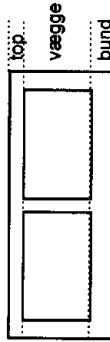
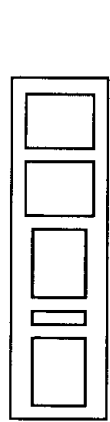
Som det fremgår er der for Øresundstunnelen anvendt et fundamentalt anderledes konstruktivt princip end for de to tidligere danske sænketunnelkonstruktioner. Mens der for Limfjordstunnelen og Guldborgsundtunnelen blev tilstræbt en monolitisk udformning af konstruktionen med ekspansionsmuligheder alene ved tunnelenderne, er Øresundstunnelen segmenteret i 160 dele, der indbyrdes kan dreje sig og dilatere i tunnelens længderetning. På grund af segmenternes relativt korte længde vil der ikke som ved de lange monolitiske tunnelkonstruktioner være problemer med revnedannelser forårsaget af tunnelens længdebewægelser.

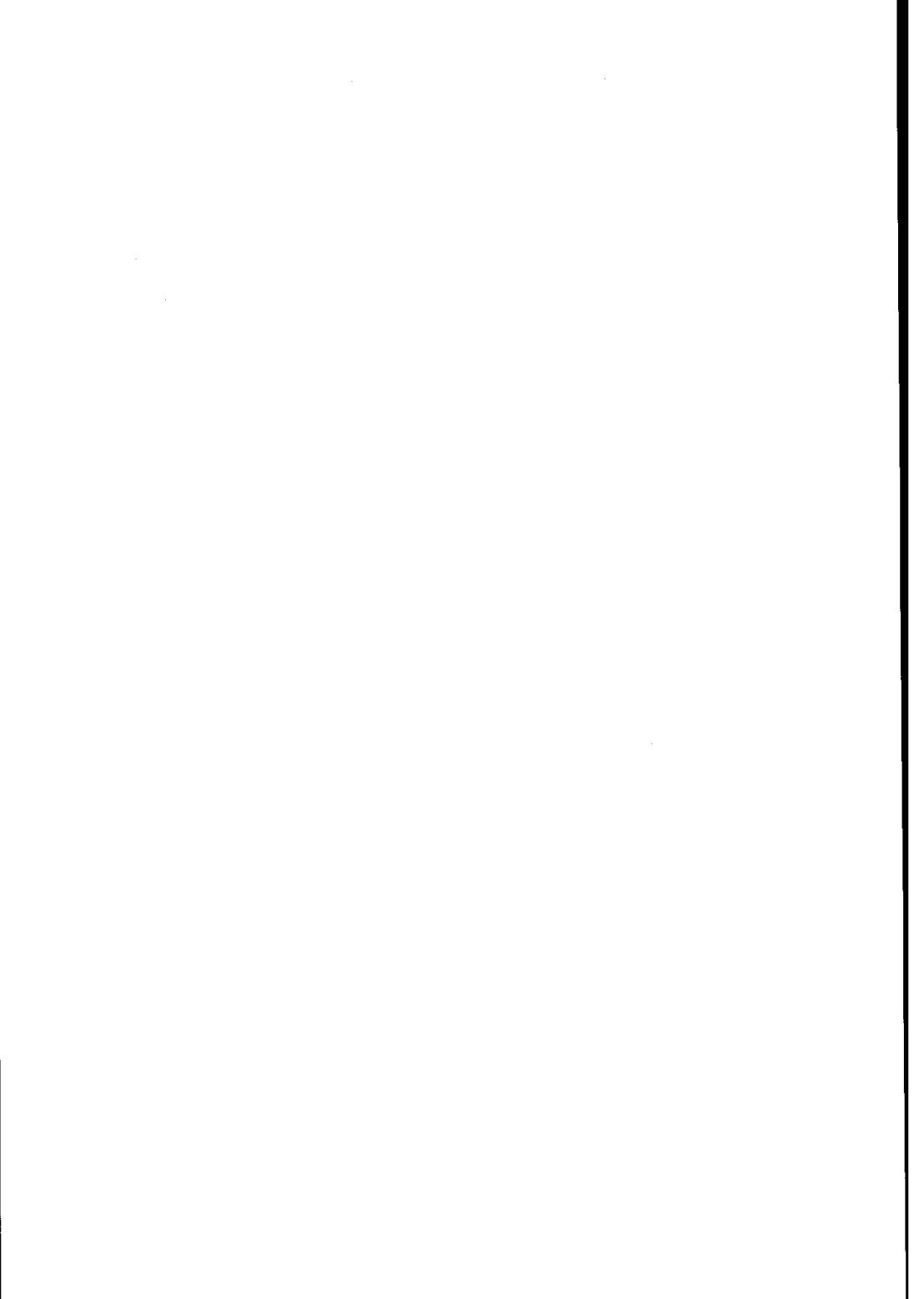
Også når det gælder foranstaltningerne til sikring af tunnelkonstruktionernes tæthed mod vandindtrængning bryder Øresundstunnelen med tidligere danske sænketunneltraditioner, idet tætheden baseres alene på konstruktionsbetonen. Eventuelle utætheder forventes at ville optræde omkring segmentsamlinger, hvor konstruktionen er forberedt til supplerende tætning.

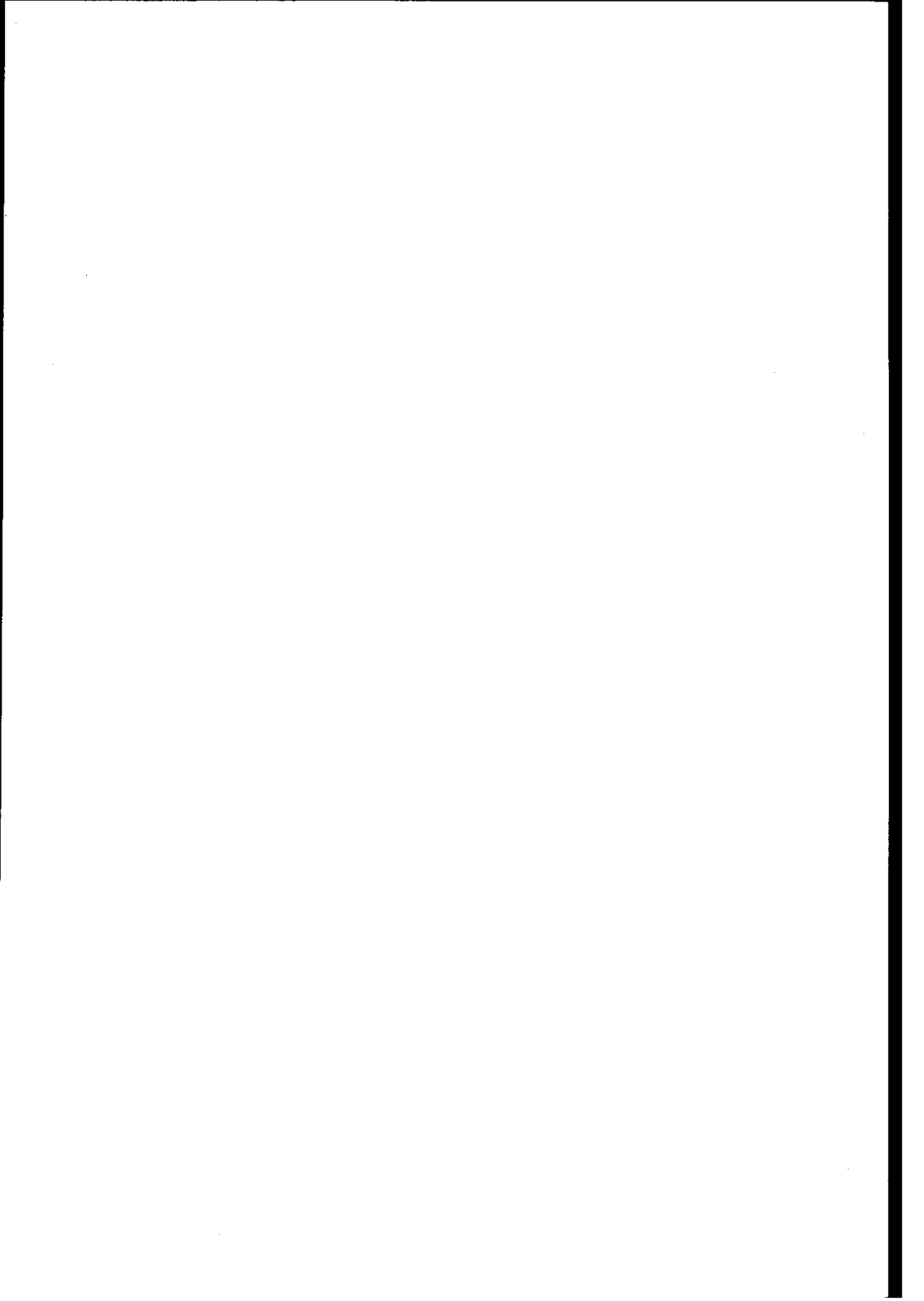
Når det gælder udstøbningen af tunnelkonstruktionen kan man notere sig tre forskellige metodevalg til imødegåelse af et kendt - og i alle tilfælde erkendt - problem ved støbning af massive betonkonstruktioner: Hærderevner og differenssvind. For Øresundstunnelen er der som det fremgår - ud fra hollandske erfaringer - forventning om, at man ved den valgte udstøbningsmetode vil løse dette problem tilfredsstillende.

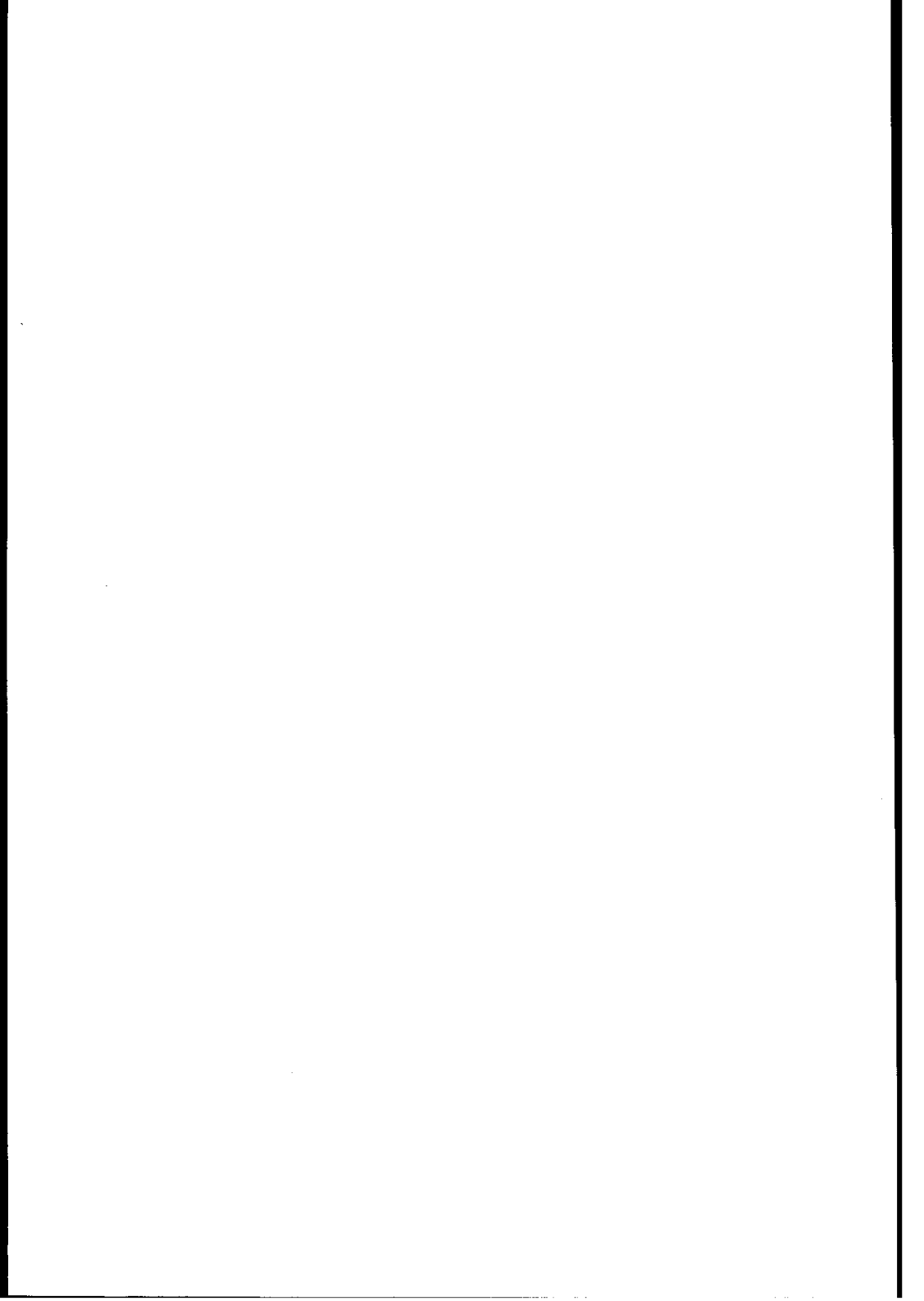
I omstående skema gives en overordnet oversigt over de væsentligste ligheder og forskelle mellem de 3 tunneler. Det fremgår af oversigten, samt af den foregående mere detaljerede gennemgang, at der foregår en stadig udvikling af konstruktionsmetoder, -materialer og -principper til at sikre, at konstruktionen beskyttes effektivt mod indtrængende vand og samtidig tillader tilstrækkelig bevægelsesmulighed til at imødegå tvangsspændinger og heraf følgende revnedannelser.

For de monolitiske tunneler er det typisk således, at vandtætheden af konstruktionen i al væsentlighed forventes etableret af en tæt og holdbar ydre membran omkring tunnelen. Såvel udstøbningsforhold som tunnelens temperaturbetingede bevægelser vil med stor sandsynlighed introducere trækspændinger og revnedannelser i konstruktionsbetonen. Erfaringer fra reparationen af Limfjordstunnelen viser, at det er muligt at imødegå trækspændinger og revnedannelser gennem en længdeforspænding af tunnelkonstruktionen, hvilket ved fremtidige tunnelprojekter bør give anledning til overvejelser om at indbygge længdeforspænding af tunneler og herigennem opnå større tæthed af konstruktionen som supplement til den ydre membran. Dette princip er allerede anvendt i enkelte japanske sænketunneler.

	LIMFJORDSTUNNELEN	GULDBORGSTUNNELEN	ØRESUNDSTUNNELEN
TVÆRSNIT			
ELEMENTLÆNGDE	102 m	230 m	175 m
ANTAL ELEMENTER	5 stk.	2 stk.	20 stk.
SEGMENTLÆNGDE	12,8 + 1,8 m	15,3 m	22 m
STØBNING AF SEGMENT			
VANDTÆTNING	Hele segmentet støbes i én proces		
GENERELT	Butylgummimembran + konstruktionsbeton (+ beskyttelsesbeton på topplade)	Stålmembran på vægge og bund/bitumenmembran og beskyttelsesbeton på topplade + konstruktionsbeton	Konstruktionsbeton
SEGMENTSAMLING	Butylgummimembran (+ beskyttelsesbeton på topplade)	Stålmembran på vægge og bund/bitumenmembran og beskyttelsesbeton på topplade	Injicerbart gummiugebånd + ekspanderende forsegling
ELEMENTSAMLING	GINA-pakning + membran og konstruktionsbeton	GINA-pakning + membran og konstruktionsbeton	GINA-pakning + OMEGA-ugebånd
KONSTRUKTIV SAMVIRKEN	Monolitisk	Monolitisk	Segmenteret







Dansk Betonforening's publikationer:

Publ.nr.	Titel	Løssalgspris
34:89	"Anvisning for genanvendelsesmaterialer i beton til passiv miljøklasse"	kr. 45
Uden nr.	Tillæg til nr. 34:89 (udg. 1995)	kr. 45
35:90	"Anvisning for efterbehandling af beton"	kr. 30
36:90	"Dansk Betondag 1990"	kr. 55
37:91	"Dansk Betondag 1991"	kr. 70
38:92	"Anvisning i katodisk beskyttelse"	kr. 45
39:92	"Dansk Betondag 1992"	kr. 70
40:93	"Dansk Betondag 1993"	kr. 60
41:94	"Dansk Betondag 1994"	kr. 60
42:95	"Dansk Betondag 1995"	kr. 70
43:95	"Praktisk anvendelse af fiberbeton" incl. diskette	kr. 45
44:95	"Armeringskorrosion i chloridpåvirket beton"	kr. 45
Uden nr.	Kontroljournaler 1988 - Blanketter m/vejl.	kr. 75
" "	"Concrete Across Borders 1994"	kr. 250
" "	"Nordic Concrete Development 1995"	kr. 50
" "	Abonnement "Nordic Concrete Research"	NKr. 100
" "	Tidl. udgivelser "Nordic Concrete Research" pr. stk.	NKr. 150
" "	Abonnement på DBF's publikationer	25% rabat

Ovenstående kan rekvireres ved skriftlig henvendelse til:

Ingeniørforeningen i Danmark
Mødereistreringen
Vester Farimagsgade 29
1780 København V

ISSN nr. 0108-0406
ISBN nr. 87-87823-47-0
TEKNISK FORLAG A/S KØBENHAVN