

# Dansk Betondag 2005

Torsdag den 15. september  
på Munkebjerg Hotel ved Vejle  
og ekskursion fredag den 16. september



## Indhold

<b>Bygningsingeniøruddannelsen på DTU</b> – med speciel vægt på beton som byggemateriale.....	1
<i>Jacob S. Møller, BYG•DTU</i>	
<b>Selvudtørrende beton</b> – en overset mulighed?.....	6
<i>Jens M. Frederiksen, Birch &amp; Krogboe a/s</i>	
<b>Udnyt kendskabet til selvkompakterende betons reologiske egenskaber</b> – 4C Auto Slump Flow systemet til bestemmelse af de reologiske egenskaber af SCC.....	10
<i>Claus Pade, Teknologisk Institut</i>	
<b>Praktiske erfaringer med SCC-Beton til gulve</b> – gode som dårlige.....	14
<i>Tommy B. Jacobsen, Teknologisk Institut</i>	
<b>”Du kan sove trygt i et betonelementhus”</b> – testresultater for betonelementer.....	19
<i>Poul Erik Hjorth, Betonelement-Foreningen</i>	
<b>Revner og holdbarhed</b> – erfaringer fra praksis.....	22
<i>Carsten Henriksen, Vejdirektoratet</i>	
<b>Den faste forbindelse Busan-Geoje i Korea</b> – Holdbarhedsdesign for beton til broer og tunneler.....	28
<i>Carola K. Edvardsen, COWI a/s</i>	
<b>Københavns Hovedbanegård</b> – Betonrenovering og ombygning.....	32
<i>Mogens B. Andersen, Carl Bro a/s</i>	

**Dansk Betondag 2005**  
Munkebjerg Hotel, Vejle  
15. september 2005

**Bygningsingeniøruddannelsen på DTU  
– med speciel vægt på beton som byggemateriale**

Civ.ing., lic.techn., institutleder  
Jacob Steen Møller

Civ.ing., lic.techn., lektor  
Mette Rica Geiker

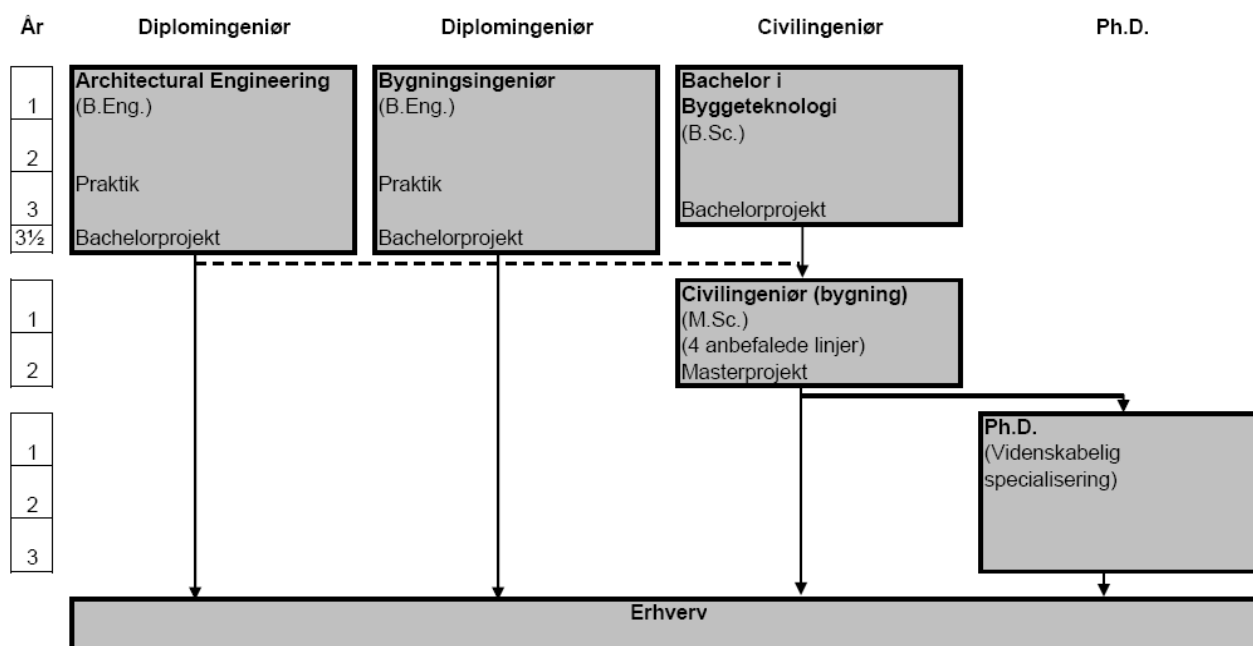
## Indledning

Der sker store forandringer af bygningsingeniøruddannelserne ved DTU. BYG•DTU blev dannet i 2001 ved en sammenslutning af institutter som dækker de fleste bygningsingeniørfag. En strategi for BYG•DTU fra 2003, et stort generationsskifte og indførelse af Bologna-deklarationen, som formulerer fælles europæiske retningslinier for de videregående uddannelser, er grundlag for en fornyelse af uddannelsens form og indhold [Møller 2004].

## Bygningsingeniøruddannelserne på DTU

DTU har ca. 900 forskere, 6000 studerende, 600 ph.d. studerende, og der optages 400 udenlandske studerende om året på engelsksprogede uddannelser. Hertil kommer et omfattende efteruddannelsesprogram. DTU rummer også et sammenhængende innovationssystem, der strækker sig fra forskning og undervisning over patentering til industrielt samarbejde.

DTU uddanner diplom- og civilingeniører. Diplomingeniøruddannelsen tager 3½ år, og civilingeniøruddannelsen 5 år. Civilingeniøruddannelsen er fra 2004 iht. Bologna-deklarationen opdelt i en 3-årig civilbacheloruddannelse og en 2-årig kandidatuddannelse. BYG•DTU varetager som et af DTU's 15 institutter bygningsingeniøruddannelserne. Deres struktur fremgår af figur 1.



Figur 1: Bygningsingeniøruddannelserne på DTU

Som en specialisering inden for den traditionelle diplom-bygningsingeniøruddannelse har DTU siden 2001 tilbudt en uddannelse i arktisk teknologi, hvor de studerende starter med 3 semestre i Sisimiut i Grønland og gennemfører praktikken i Grønland.

Uddannelsen (diplom) Architectural Engineering med det formelle navn By- og Byg.ing, startede i 2002 og lægger særlig vægt på samspillet mellem design og konstruktion.

De første studerende på Bachelor i Byggeteknologi begyndte i 2004, og de vil starte kandidatuddannelsen til civilingeniør (M.Sc.) i sommeren 2007. Civilingeniøruddannelsen

planlægges at indeholde tre til fire anbefalede specialiseringer (linjer) samt mulighed for helt individuel specialisering. Linjerne er: Anlæg, Bygningskonstruktion, Bygningsinstallation og -energi og muligvis Byggeledelse. Linjerne vil fremgå af eksamensbeviset. Undervisningen på kandidatniveau vil finde sted på engelsk.

## **Kompetencemål**

Det er målet, at de uddannede ingeniører besidder forståelse for og viden om naturvidenskab og teknologiske principper, og at de vil kunne udnytte denne viden innovativt i en erhvervs- og samfundsmæssig sammenhæng. Der er opstillet tre kategorier af kompetencemål for ingeniøruddannelserne:

Faglige kompetencer:

- Fællesfaglige generelle kompetencer inden for matematik, fysik og kemi
- Polyteknisk helhedsforståelse, specielt evne til modeldannelse og -anvendelse
- Specifikke faglige kompetencer knyttet til uddannelse og specialisering

Intellektuelle kompetencer (som ikke er snævert koblet til fagindhold):

- Indeholder bl.a. evne til at strukturere egen læring og kommunikative færdigheder

Praksiskompetencer:

- At kunne varetage specifikke jobfunktioner (særligt for diplom) og inddrage og overskue etiske miljømæssige aspekter af fagets løsninger.

De overordnede faglige kompetencemål med relation til materialelære, specielt beton, er sammenfattet i tabel 1. De angivne mål er minimumsmål, som den studerende kan supplere med valgfrie kurser, specialkurser og eksamensprojekter.

## **Faglige holdning og indhold**

Undervisningen benytter i dag en egenskabsorienteret indgang – i modsætning til tidligere tiders materialebaserede indgang. Dvs. der lægges vægt på at give de studerende en grundlæggende materialeforståelse ved at lægge vægt på forståelse af sammenhængene mellem struktur og egenskaber så vidt muligt baseret på fysisk-kemiske principper. Specielt på civil-uddannelsen vil der fremover blive lagt særlig vægt på at give en naturlovsbaseret forståelse af materialernes egenskaber. Formålet med dette er bl.a. at sætte de studerende i stand til vurdere risikoen ved variationer i materialeegenskaber samt egenskaberne af fremtidige materialer.

Alle uddannelserne vil give et indledende kendskab til byggematerialernes egenskaber, herunder porestruktur, porøsitet, fugttekniske forhold, varmetekniske forhold, mekaniske egenskaber, korrosionslære, volumenbestandighed, miljøpåvirkning. Der vil fremover blive lagt vægt på at sætte materialelæren i relation til konstruktions-, udførelses- og driftsforholdene, idet de studerende skal bibringes en forståelse for samspillet mellem enkeltdisciplinerne i ingeniørens praksis, se figur 2. Den indledende undervisning i materialelære har samme faglige kerne på alle uddannelserne, men der er forskel i eksemplificering og pædagogisk metode, som afspejler diplom- og civil-uddannelsernes forskellige sigte.

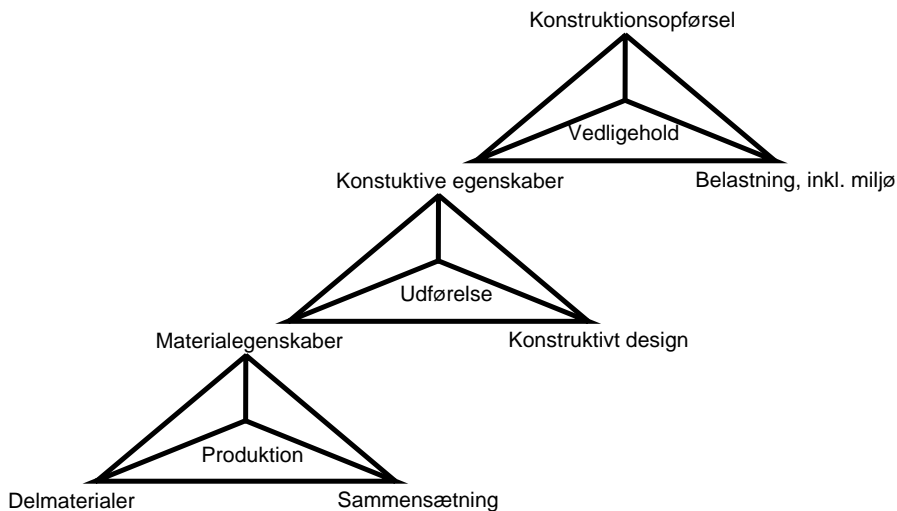
Diplom-bygningsingeniører og civilbachelorere, der følger linjerne Anlæg og Bygningskonstruktion, får praktisk erfaring med materialer og eksperimentelle metoder til materialekarakterisering gennem laboratoriekursus og virksomhedsbesøg. Endvidere får de et grundlæggende kendskab til betons struktur og egenskaber, så de herved erhverver forudsætninger for korrekt valg af delmaterialer og for teknisk og økonomisk korrekt fremstilling og brug af beton. F.eks. gives på bachelorniveau for

civilingeniørerne et kursus som omfatter: Valg af delmaterialer, cement hydratisering og strukturudvikling (bl.a. Powers' model), egenskabers afhængighed af tid og temperatur (bl.a. den eksponentielle egenskabsudviklingsmodel og maturitybegrebet), flydeegenskaber, udførelse (produktion og efterbehandling), mekaniske egenskaber og holdbarhed.

Tabel 1: Kompetencemål for materialelære (beton) når revideret kursusplan er fuldt implementeret

	Diplom-ingeniør		Civil-ingeniør			
	Architectural Engineering	Bygningsingeniør	Anlæg	Konstruktion	Installation	Byggeledelse
<b>Kompetencer som skal opnås på bachelorniveau:</b>						
• Kunne identificere materialer til typiske bygningskonstruktioner under hensyntagen til samspil mellem konstruktion, materialer, udførelse og miljøeksponering	X	X	X	X	X	X
• Kunne foretage en indledende bedømmelse af indflydelsen af materialevalg på miljøpåvirkning og indeklimate	X	X	X	X	X	X
• Kunne estimere indflydelsen af materialevalg på indeklimate og miljøbelastning	X					
• Kunne vælge materialer til typiske bygningskonstruktioner under hensyntagen til miljøbelastning, indeklimate, æstetik og brug	X					
• Kunne estimere enkle samspil mellem betonkonstruktion, materialer, udførelse og miljøeksponering		X	X	X		
• Kunne vælge materialer til gængse betonkonstruktioner under hensyntagen til samspil mellem konstruktion, materialer, udførelse og miljøeksponering		X	X	X		
• Kunne vælge eksperimentelle metoder og udføre simple undersøgelser til karakterisering af byggematerialer		X	X	X		
<b>Kompetencer som skal opnås på kandidatniveau:</b>						
• Kunne estimere komplekse samspil mellem betonkonstruktion, materialer, udførelse og miljøeksponering			X	X		
• Kunne specificere materialer til en given betonkonstruktion			X	X		
• Vælge vedligeholdelses- og reparationsstrategier for armerede betonkonstruktioner			X	X		

På kandidatuddannelsen, M.Sc. planlægges oprettet nye kursusforløb, som vil omfatte avanceret betontechnologi; f.eks. hærde-teknologi, nye betontypers egenskaber, udførelsesteknologi, avancerede målemetoder, holdbarhed og levetidsprojektering samt reparation og vedligeholdelse. Videregående økonomisk estimering, ressourceøkonomi og livscyklusanalyse er relevant for specialister i beton på kandidatniveau. På nuværende tidspunkt indgår det ikke i kursusforløbet, men på længere sigt vil BYG•DTU lægge større vægt på disse emner.



Figur 2: Samspil mellem konstruktion, materialer, udførelse, miljø og funktion [Stang og Geiker 2004].

## Undervisningens form

Undervisningen tilrettelægges med forelæsninger, demonstrationer, teoretiske og eksperimentelle øvelser samt projekter. Materialelæren udmærker sig ved i mange tilfælde at kunne illustreres eksperimentelt. Eksperimenter og undersøgelser af eksisterende konstruktioner er unikke pædagogiske hjælpemidler og bliver i størst muligt omfang inddraget i undervisningen. BYG•DTU har som led i udmøntningen af den nye strategi styrket de eksperimentelle faciliteter med en opgradering af betonstøberiet og nyindretning af laboratorier til materialeforskning og undervisning.

Til støtte for både forelæsninger og de studerendes selvstudier arbejdes der på at etablere IT-baserede visualiseringsteknikker og opbygge et bibliotek af visuelle 'learning objects' i form af animationer, videoer og MatLab baserede rutiner. BYG•DTU og Institut for Produktion og Ledelse (IPL) har etableret "det virtuelle klasseværelse", som et supplerende pædagogisk hjælpemiddel, se <http://www.knowledgecomm.org/> og [Møller og Geiker 2005].

## Referencer

P. Møller and M. Geiker: *The virtual classroom*. Knud Højgaard Conference on Advanced Cement-Based Materials, Research and Teaching, Technical University of Denmark, 13-15 June 2005. Kan downloades fra [www.byg.dtu.dk](http://www.byg.dtu.dk)

J.S. Møller: *Strategies for Research, Education, and Innovation, A University's Considerations*. Building for a European Future: Strategies and Alliances for Construction Innovation; Conference Proceedings, pp. 377-389. Brussels : ECCREDI, 2004. Kan downloades fra [www.byg.dtu.dk](http://www.byg.dtu.dk).

H. Stang og M. Geiker: *Højpræsterende Beton*. Arkitekten 2004, 12, 33-35.

## **Dansk Betondag 2005**

Munkebjerg Hotel, Vejle

15. september 2005

## **Selvudtørrende beton – en overset mulighed?**

Akademiingeniør, specialist, beton- og materialeteknik

Jens Mejer Frederiksen, [jmf@birch-krogboe.dk](mailto:jmf@birch-krogboe.dk)

**Birch & Krogboe A/S**

**Teknikerbyen 34**

**DK-2830 Virum**

**Tlf.: 4595 5555**

**[www.birch-krogboe.dk](http://www.birch-krogboe.dk)**



## Selvudtørrende beton – en overset mulighed?

Afkortning af byggetiden, forbedret kvalitet og god økonomi anses normalt for uforenelige størrelser. Byggefugt er tit synderen, når der opstår forsinkelser eller skader på nybyggeri. Selvudtørrende beton er ikke nogen ny opfindelse, men implementering mangler.



*Der er store økonomiske fordele ved at kunne færdiggøre byggerier og renoveringsarbejder hurtigt. Ofte er betonoverfladers fugtindhold afgørende for byggeprocessens fremdrift og færdiggørelse. Ved at bruge en særlig beton kan man reducere byggetiden og helt spare dyr affugtning.*

### Problemstilling

Det sker igen og igen, at der støbes betongulve/terrændæk, uden at have overvejet længden af udtørningstiden. Når huset står næsten færdigt ovenpå, kan den sidste bygningsoverflade – gulvet – ikke blive færdig fordi betonen i dækkonstruktionen stadig er for fugtig.

*”Jamen, dækket blev jo støbt for flere måneder siden!”*

### Løsning

Denne problemstilling er ikke ny. Og der findes også enkel løsning på problemet. Løsningen er at anvende en betonsammensætning, der opbruger det overskydende blandevand meget hurtigt. Betonen kaldes ”selvudtørrende”. Der er ikke tale om en tør og strid betonblanding, men en blanding, der stort set opfører sig som man er vant til. Betonen kan endda gøres selvkomprimerende ved hjælp af moderne superplastificeringsmidler.

### TorkaS hjælper

I Sverige har man i årevis forsket i mulighederne for at afkorte byggeperioden ved at begrænse mængden af byggefugt – herunder byggefugt i beton. Lunds Tekniska Högskole har været i front. På Internetadressen [www.fuktcentrum.lth.se](http://www.fuktcentrum.lth.se) kan man gratis hente programmet TorkaS. TorkaS er et af resultaterne af den årelange forskningsindsats. Med TorkaS kan man beregne betons udtørningsforløb fra støbning til slutsituationen – fx det tidspunkt, hvor man planlægger at færdiggøre sin gulvoverflade.

## Hvordan gør man?

Med programmet følger en letforståelig manual. Man indtaster sine aktuelle inddata, dvs. støbetidspunkt, tidspunkt for ”tæt hus”, tidspunkt for ”styret tørring” og sluttidspunkt (dvs. hvornår konstruktionsdelen skal være klar til næste arbejde, fx udlægge parketgulv). Derefter vælger man de udendørs klimadata, der er aktuelle. Programmet har vejrdata for svenske lokationer indlagt. For danske forhold er Göteborg ofte et kvalificeret gæt.

Betonsammensætningen indtastes – og her skal man være opmærksom på at programmet ved ”vct” forstår det ”rene” forhold mellem vand og cement. Herefter kører man beregningen. Betonsammensætningen og tidsplanen passer sammen, hvis betonen er tilstrækkelig tør til tiden, men er det ikke tilfældet må man justere. I planlægningsfasen er det lettest at ændre på betonens sammensætning – programmet har visse begrænsninger. Man finder ud af, at hvis tørretiden skal være meget kort og slutfugtigheden under 85% RF, så skal der tilsættes mikrosilica til betonen – der kan kun vælges mellem 0 og 5%. Har man støbt betonen – uden at tænke på selvudtørrende beton – kan TorkaS hjælpe ved planlægningen af den resterende udtørringstid.

## Muligheder

I Birch & Krogboe har vi anvendt denne metodik i flere sammenhænge. Fx ved renovering af boliger. Her er genhusningsomkostningerne og generne for beboerne belastende. En kort byggetid er derfor afgørende. Fx har vi udskiftet terrændæk og blot 10 dage efter støbningen udlagt parketgulv. I forbindelse med museer og magasiner, hvor bygningens fugtforhold fra starten er afgørende for effekternes bevarelse har vi planlagt alle overflader således, at de tørrer meget hurtigt, så et fugtstabilt klima hurtigt kan indstille sig. Også overflader, hvor membranarbejder skal udføres på den nye beton vil selvudtørrende beton være med til at skabe fremdrift i byggeprocessen, dette er fx anvendt i forbindelse med svømmehaller og P-anlæg.

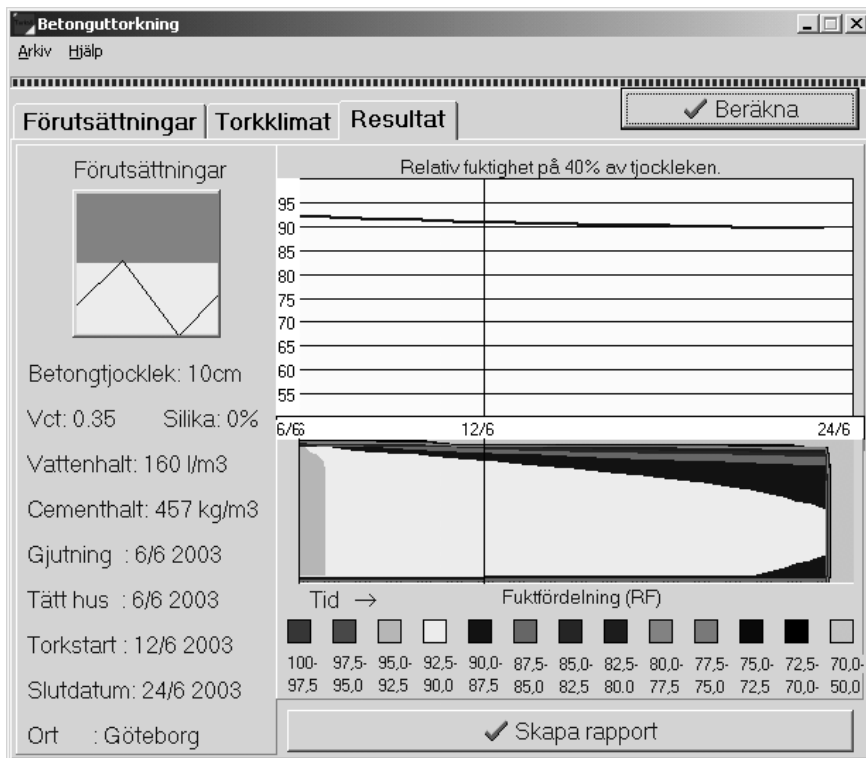
## Begrænsninger

Den selvudtørrende beton bliver meget stærk- måske *for* stærk. Det skal man tage hensyn til hvis man ønsker at begrænse revnevidder. Revnevidder over 0,2 mm tillades ikke i aggressive miljøer og vil give anledning til kantafskalninger, hvis der bruges køretøjer med små hårde hjul. Derfor skal armeringsmængden afpasses til den stærkere beton – eller betonens styrke skal begrænses. Ønsker man at begrænse selvudtørrende betons styrke kan man fx indblande luft i betonen. Hver %-point indblandet luft nedsætter styrken med 4%. Derfor kan indblanding af 10% luft reducere styrken med ca. 40%, hvilket nogen gange er at foretrække.

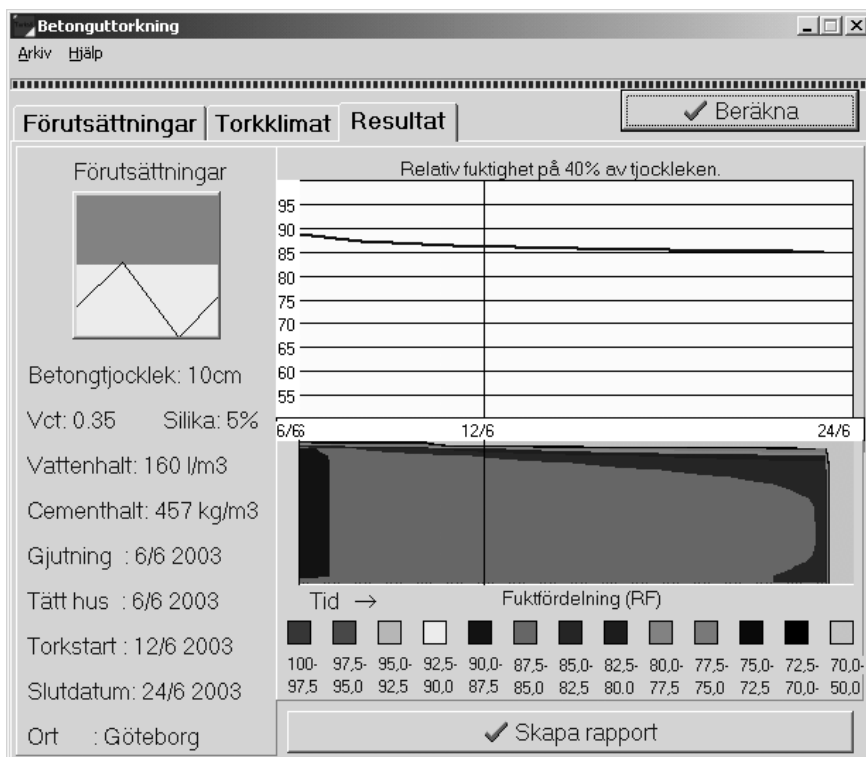
## Omkostninger

Enhver der har været udsat for forsinkelser i byggeprocessen og kender de økonomiske konsekvenser heraf ved, at der ofres mange penge på at undgå overskridelse af tidsfrister. Udgifter til at drive varmeblæsere for at tørre bygninger ud i vintermånederne eller tørreanlæg i sommermånederne kan også være ganske betydelige. Selvudtørrende beton er dyrere end almindelig beton, men prisen på den selvudtørrende beton er ofte højst 20-30% over prisen for den beton som netop opfylder normkravene til den aktuelle konstruktionsdel.

Derfor vil brug af selvudtørrende beton på kort sigt give en merudgift, men på lang sigt (men indenfor byggeperioden) oftest betyde klækkelige besparelser.



**Figur 1.** Exempel på berägningsresultat efter beräkning med TorkaS. Kurven överst visar den relativa luftfuktighet i betonen i dybden 4 cm (40 pct. af tykkelsen) under overfladen. Til venstre ses beregningens forudsætninger. Man har mulig for at udskrive en detaljeret rapport fra programmet. Beregningen viser, at betonen tørres igennem til under 90% RF på ca. 2 uger.



**Figur 2.** Forudsætninger som i figur 1, men hér er tilsat 5% mikrosilica. Beregningen viser, at betonen tørres igennem til under 85% RF på ca. 2 uger.

## **Dansk Betondag 2005**

Munkebjerg Hotel, Vejle

15. september 2005

### **Udnyt kendskabet til selvkompakterende betons reologiske egenskaber**

#### **– 4C Auto Slump Flow systemet til bestemmelse af de reologiske egenskaber af SCC**

Seniorkonsulent

Claus Pade

**Teknologisk Institut, Byggeri, Beton**

**Gregersensvej**

**Taastrup**

**Tlf. 72202183**

**Claus.Pade@teknologisk.dk**

## Sammendrag

En prototype til bestemmelse af de Bingham reologiske parametre af selvkomprimerende beton er blevet udviklet. Ved hjælp af billedanalyse af en videosekvens optaget under udførelse af et automatiseret sætmålskegleløft opnås sammenhørende værdier af tid og betonens udbredelse. Kurven for udbredelse som funktion af tid benyttes efterfølgende til at bestemme Bingham parametrene ved at finde det bedste fit i en database over kurveforløb. Databasen er opbygget på baggrund af simuleringer af betons udbredelse under kegleløft. Det tager mindre end 2 minutter fra kegleløftet er aktiveret, og til at den selvkomprimerende betons reologiske egenskaber er bestemt og vist på computerskærmen.

## Introduktion

Ideen bag auto-flydemålstyret (4C Auto Slump Flow) var at udvikle et relativt billigt, simpelt og betjeningsvenligt udstyr til bestemmelse af de Bingham reologiske parametre flydespænding,  $\tau_0$ , og plastisk viskositet,  $\eta_{pl}$ , for selvkomprimerende beton (SCC).

Når SCCs bearbejdighed skal beskrives er de mest udbredte metoder i dag empiriske – eksempelvis flydesætmål ( $D_{max}$  og  $T_{50}$ ). Imidlertid afhænger  $D_{max}$  og  $T_{50}$  af kegleorientering, løfthastighed af keglen, samt bundpladens ruhed og fugtighed. Nøjagtigheden af måling af udbredelse vs. tid er især vigtig for  $T_{50}$ . Ydermere er  $D_{max}$  and  $T_{50}$  ikke uafhængige parametre, idet  $T_{50}$  afhænger af  $D_{max}$ , hvorfor disse to parametre ikke giver en entydig beskrivelse en SCCs flydeegenskaber. Det er således ikke muligt direkte at sammenligne flydeegenskaberne af forskellige betoner ved at se på  $D_{max}$  and  $T_{50}$ .

En anden mulighed er at bestemme de faktiske Bingham reologiske parametre af SCC. Kendskab til de reologiske egenskaber af SCC åbner nogle interessante perspektiver for betonindustrien. Først og fremmest giver det mulighed for direkte at sammen forskellige betonrecepter gennem de to uafhængige parametre  $\tau_0$  og  $\eta_{pl}$ . Desuden kan de reologiske egenskaber anvendes til simulering af betons strømning i en hvilken som helst formgeometri. Sådanne simuleringer kan potentielt være en stor fordel i forbindelse valg af design og udstøbnings teknik af en konstruktion. Ligeledes giver kendskab til universelle reologiske parametre mulighed for at genere viden/erfaringsdatabase med information om SCC egenskaber (f.eks. holdbarhed og opførsel under udstøbning), af betoner med specifikke reologiske egenskaber.

De instrumenter (betonreometre), som findes på markedet, er alle systemer baseret på principperne for coaxiale cylindre eller parallelle plader. Betonreometrene er imidlertid meget lidt brugt i industrien formodentlig på grund af deres pris, samt at de er tidskrævende at bruge og fordrer en erfaren bruger til at tolke resultaterne.

Der er således et behov for et udstyr, som hurtigt og enkelt kan bestemme de reologiske egenskaber af SCC.

## 4C Auto Slump Flow Systemet

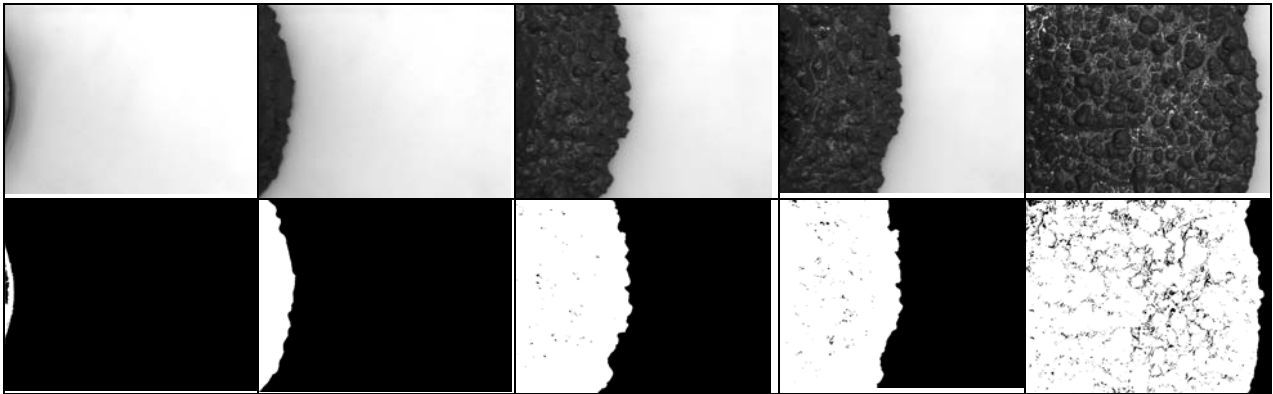
4C Auto Slump Flow systemet er vist i figur 1. Udstyret er basalt set en automatiseret PC-styret flydemålstester, hvor en SCC betons udbredelse som funktion af tid bestemmes ved hjælp af video-billedanalyse. Sætmålskeglen, som er placeret retvendt på en bundplade af sandblæst glas løftes med en konstant hastighed på 7 cm/s.



*Figur 1 - 4C Auto Slump Flow systemet*

Det integrerede brugervenlige software har en “wizard”-funktion, som guider operatøren igennem de nødvendige indtastninger og valg for at gennemføre en test – testresultatet bliver automatisk gemt på PC’ens harddisk. Når information om den beton, som skal testes er indtastet vil et klik på “start measurement”-knappen aktiverer selve testforløbet. Sætmålskeglen løftes og betonens strømning ud af sætmålskeglen optages på video. Videosignalet optages i 40 sekunder med en hastighed på ca. 30 billeder pr. sekund og de i alt ca. 1200 billeder bliver digitaliseret ved hjælp af en framegrabber og streamer software. Betonens udbredelse som funktion af tid bestemmes herefter ved billedanalyse. Hvert billede i videosekvensen bliver binariseret på baggrund af en tærskelværdi, så det kun består af hvide (beton) og sorte (bundplade) pixels. Da størrelsen af hver pixel er kendt, kan positionen af betonfronten bestemmes nøjagtigt for hvert billede. Billedanalysen returnerer ca. 1200 sammenhørende værdier af udbredelse som funktion af tid. En serie på fem billeder fra den samme test er vist i figur 2 som illustration af billedanalyseprincippet.

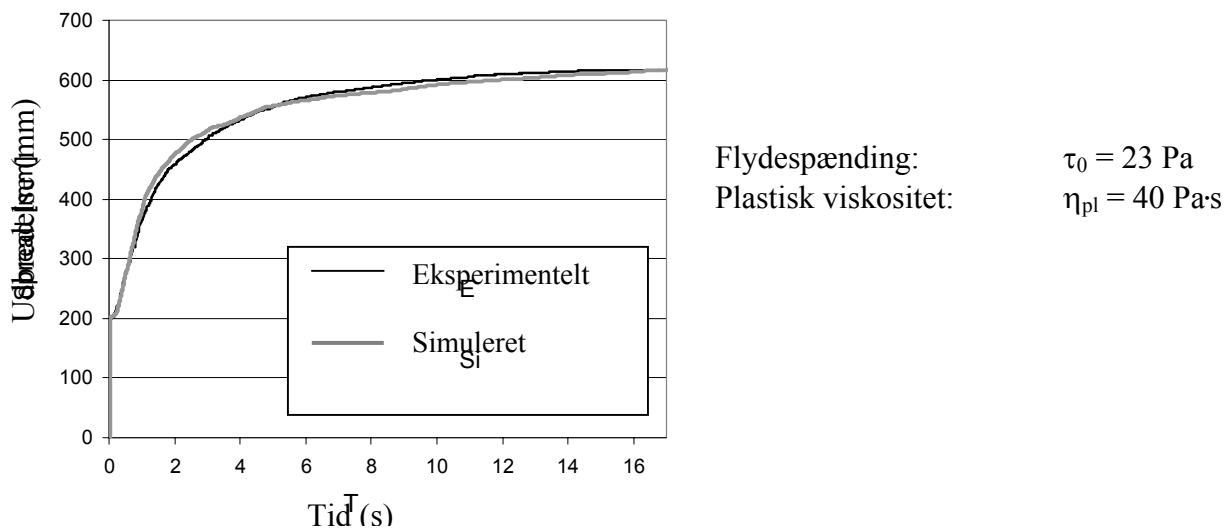
Efterfølgende findes betonens reologiske parameter ved en “best-fit” søgning i en database over flydekurver (udbredelse som funktion af tid) opbygget ud fra numeriske simuleringer af flydesætmålet baseret på Bingham-modellen. Til sidst præsenteres de fundne reologiske parameter på PC-skærmen, og en rapport gemmes i pdf-format på PC’ens harddisk.



Figur 2 – Billedanalyseprincip – Betonfrontens position bestemmes ved at binarisere hver eneste billede optaget af videokameraet. Billedstørrelse i horisontal retning er 232 mm.

## Resultater

Et typisk resultat fra en måling med 4C Auto Slump Flow udstyret er vist i figur 3. Den målte udbredelse som funktion af tid er vist sammen med det bedste fit fra databasen og de dertil hørende reologiske parametre. Som det ses, er der en god overensstemmelse mellem den eksperimentelt målte og den simulerede flydekurve.



Figur 3 – Eksperimentelt bestemt (sort) og “best-fit” simulering (grå) af udbredelse som funktion af tid for en SCC-beton testet med 4C Auto Slump Flow systemet.

## Konklusion

Med 4C Auto Slump Flow systemet opnås en god korrelation imellem den eksperimentelle og simulerede strømning af SCC. De Bingham reologiske materialeparametre, flydespænding og plastisk viskositet, som ligger til grund for simuleringer, er derfor et godt estimat af en SCC betons reologiske egenskaber.

**Dansk Betondag 2005**  
Munkebjerg Hotel, Vejle  
15. september 2005

## **Praktiske erfaringer med SCC-Beton til gulve – gode som dårlige**

Sektionsleder, ingeniør  
Tommy Bergenholz Jacobsen

**Teknologisk Institut**  
Gregersensvej  
2630 Taastrup

**Tlf.: 72 20 21 71**  
**tommy.b.jacobsen@teknologisk.dk**  
**www.teknologisk.dk**



SCC-Beton (selvkomprimerende beton) bliver i stigende grad anvendt til gulve. Anvendelsen sker primært inden for bolig- og institutionsbyggeriet, men SCC-Betonen bruges også til industrigulve.

Generelt lever SCC-Betongulvene op til bygherrens forventninger og eller fremstår med et acceptabelt udfald. Når de ikke gør det, er det ofte fordi:

- SCC-Beton ikke var egnet til den specifikke opgave
- Der opstod udførelsesfejl som følge af manglende kendskab til brugen af SCC-Beton
- Bygherren var ikke informeret om resultatet af den færdige gulvoverflade
- Der var fejl ved SCC-Betonen ved leverancen - betonen skulle have været afvist

Kan man rette op på disse fejl og bidrage bygherren de rette forventninger er man nået langt.

Indeværende indlæg vil prøve at fokusere på nogle af de faldgruber, som under udførelsen afgør, om gulvet bliver en succes eller fiasko. Endvidere på hvordan vi ved at give de rigtige oplysninger, kan få nedbragt de manglende forventninger hos bygherren.

### **SCC-Beton kan bruges til alle gulvtyper...Næsten**

SCC-Beton vil med fordel kunne bruges til en stor del af de danske betongulve. Især kan SCC-Beton med stor fordel anvendes i bolig og institutionsbyggeriet, hvor der i gulvet ofte er samlet mange installationer på et lille område, og hvor kravene til overfladebeskaffenheden er væsentlig mindre end ved de mere specielle industrigulve.

De nuværende SCC-Betoner kan ikke umiddelbart bruges til gulvtyper, hvor der stilles store krav til planheden, og eller hvor gulvet udføres med stor hældning (kuvertfald). Det er ikke muligt ved den normale udførelsesteknik at opnå de planheder, som f.eks. kræves i højreollagre, selv med anvendelse af laserbaseret udstyr.

### **Udførelsesfejl som følge af manglende kendskab til brugen af SCC-Beton**

Gulvstøbninger med SCC-Beton adskiller sig bl.a. fra de traditionelle gulvstøbninger ved, at der f.eks. ikke skal bruges vibratorbjælke til afretning og komprimering af betonen. SCC-Beton er nemlig en selvkomprimerende og vibrationsfri beton.

Afretningen af gulve med SCC-Beton sker i Danmark med en såkaldt jutter, dvs. et plast rør med et påmonteret skaft.

SCC-Beton gulve kan glittes som de traditionelle gulve, men overfladefærdiggørelsen på SCC-Betongulve sker oftest ved en slibning. Med en slibning undgår man den ventetid, der er indtil glitningen kan påbegyndes. Ventetiden kan dog blive noget længere for betongulve med SCC-Beton, hvis ikke betonleverandøren har taget forholdsregler mod dette.



*Jutning af gulv*

Skal den færdige betonoverflade fremstå som sleben overflade og uden skræbespartling, stiller dette dog store krav til udførelsen af gulvet, idet der efter slibningen ofte ses et stort antal huller i overfladen.



*Fremkomst af huller efter slibning af SCC-Beton*

De nuværende SCC-Betoner har en tendens til, at der opstår mange små luftbobler i betonen. Luftboblerne vil kunne give bitte små huller i overfladen ved en slibning. Det er sjældent disse huller, der giver anledning til problemer. Det er derimod væsentlig større huller, som optræder en gang i mellem.

Hullerne er forårsaget af indesluttet luft, der søger op mod atmosfæren og efterlader overfladen med et krater eller et hul med lodrette vægge.

Der synes umiddelbart at være en sammenhæng mellem tidspunktet for indsættelse af jutningen og fremkomsten af de mere markante lufthuller i overfladen. Kommer man for tidlig på med jutningen, synes risikoen for de markante huller i den færdige overflade at være stor.



*Huller i SCC-Beton gulv med lodrette vægge*

En for tidlig jutning ses også at få indflydelse på overfladens planhed og dermed også på det efterfølgende slibearbejde. Ved en for tidlig jutning vil der kunne stå vandfilm mellem jutteren og betonen, som kan medføre punktvis fordybninger i overfladen. En sådan overflade vil kræve en større slibedybde for at opnå en plan overflade. Der ses ofte at være problemer med at få slebet disse fordybninger væk.

En tidlig jutning kombineret med en for kraftig jutning og eller et højt flydesætmål vil også kunne resultere i, at der sker en flytning af den øvre del af betonen med kraftig separation til følge.



*Sleben overflade på SCC-Betongulv der er blevet juttet for tidligt*

### **Manglende information til bygherren om resultatet af den færdige gulvoverflade**

Man bliver nødt til at orientere bygherren om, at betonen efter slibning vil kunne fremstå med huller. Det er lige så vigtigt at orientere bygherren om, at en sleben overflade ikke kan sammenstilles med en glattet betonoverflade. Den opfattelse har mange bygherrer.

En bygherre havde i sin beskrivelse angivet, at overfladen i det nye lager skulle fremstå afrettet med vibrationsbjælke som i eksisterende lager, dvs. uden glitning. Dette havde han gjort, fordi denne overflade gav gulvet den friktion, der var nødvendigt for den aktuelle brug. Gulvet blev af entreprenøren udført med SCC-Beton og afrettet med jutter, hvilket medførte, at gulvet ikke fik den

af bygherren ønskede friktion. Her er det også vigtigt at skelne mellem afretning, når det drejer sig om SCC-Beton og afretning af de traditionelle betongulve.



*SCC-Beton med juttet overflade*

### **Materialefejl ved leverancen - betonen skulle have været afvist**

For tynde eller for stive betoner bør afvises ved ankomsten på pladsen. Sådant er det også med de traditionelle betoner. Men for en SCC-Beton er det utroligt vigtigt, at det sker. For det er svært at rette op på en SCC-beton som er blevet for stiv, når man kun har jutteren til rådighed og har planlagt støbningen efter dette. Hvor der ligger gulvvarme, er der ligeledes stor risiko for en utilstrækkelig omstøbning af slangerne ved en for stiv beton.

En for lind beton ofte kaldet ”Skumbeton” (blød beton med stort luftindhold, ofte kun i den øvre del af tværsnittet) vil ligeledes betyde en nedsættelse af gulvets styrkeforhold, specielt slidstyrken vil være markant nedsat. Er en sådan beton blevet indbygget, vil en reparation ofte bestå i en plastbelægning på gulvet.

Her kan et enkelt læs beton, der når at blive indbygget, blive en kostbar affære for entreprenøren, idet reparationen ofte løber op i mere end betonen til hele gulvet har kostet.

Der ses ofte separation (slamlag) af betonen i varierende dybde inden for samme gulvafsnit, selv om procesudskrifter for disse støbninger viser en ensartet dosering og blanding af betonen. En mulig forklaring kunne være, at målemetoden til flydesætmålet ikke er tilstrækkelig, og eller at det er den tidsmæssige effekt (forskel i køre- og ventetider), der har indflydelse på dette.

Der pågår i øjeblikket et stort udredningsarbejde omkring SCC-Betoner i forbindelse med SCC-konsortiets arbejde.



**Dansk Betondag 2005**

Munkebjerg Hotel, Vejle

15. september 2005

**”Du kan sove trygt i et betonelementhus”  
– testresultater for betonelementer.**

Direktør, ingeniør

Poul Erik Hjorth

**Betonelement-Foreningen**

**Kejsergade 2**

**1002 København K**

**Telefon 72160268/ 72160267. Fax 72160276**

**poh@danskbyggeri.dk**

**www.bef.dk**



## **”Du kan sove trygt i et betonelementhus” – testresultater for betonelementer.**

- Brandafprøvninger af huldæk og tilhørende ny designanvisning
- Fuldskalatest af betonelementvægge
- Indeklimaet er også dokumenteret.

### **Brandprøvninger af huldæk**

I Danmark produceres ca. 1 mio. m<sup>2</sup> huldæk om året. I 2005 vil mængden nok nå op på 1,3 mio. m<sup>2</sup>. Men det er intet at regne i forhold til Europa, hvor den samlede produktion nærmer sig 50 mio. m<sup>2</sup> og world-wide estimeres mængden til omkring 500 mio. m<sup>2</sup>.

Huldæk produceres både som BS 60, BS 120 og BS 180 overalt på kloden – og der er ingen rapporter om, at huldæk har svigtet ved forskydningsbrud under brand.

Alligevel var det de danske huldækproducenter, der blev tvunget til lommerne af et massivt krav om at levere dokumentation for ”den varme” forskydningsbæreevne.

Det første forsøg blev udført på DTI den 2. november 2004. Forsøget blev afbrudt efter 25 minutter, da lastarrangementet ”kæntrede”, men opvarmningen blev fortsat, og forsøget gav derfor alligevel baggrund for en række interessante iagttagelser.

Forsøget blev efterfulgt af 3 afprøvninger hos SP – og afprøvningerne viste, at huldæk besidder fortrinlige brandmæssige egenskaber.

Afprøvningerne gav derved grundlag for en helt ny designanvisning (se [www.bef.dk](http://www.bef.dk)) for huldæk. I anvisningen er inkorporeret både den generelt gældende større ”varme forskydningsbæreevne”, men også de iagttagelser fra DBI-forsøget, som medfører begrænsninger omkring udsparinger og lastpåføring.

Afprøvningerne hos SP gav tillige dokumentation for bæreevnen i afkølingsfasen, så det fremover er muligt at dokumentere brandmodstandsevnen for et fuldt udviklet brandforløb.

### **Fuldskalatest af betonelementer**

DS skriver i forordene i samtlige konstruktionsnormer, at ”normerne udgør et sammenhængende, konsistent normsæt”.

Betonbranchen har altid ment, at DS tillægger ordet ”konsistent” en anden betydning end de danske ordbøger. På den baggrund – og tillige påvirket af den stigende konkurrence på byggematerialernes ydeevne – besluttede BEF at lade Aalborg Universitet udføre 4 pilotforsøg med centralt belastede vægelementer.

Resultatet viste, at den gennemsnitlige bæreevne var 50% større end bæreevnen beregnet efter DS 411.



Fuldskalatesten viser, at betonnormen med rette kan betegnes som ”yderst konservativ”.

### **Indeklimaet**

Det er en udbredt opfattelse, at beton og et sundt indeklime er to uforenelige størrelser. Opfattelsen er så udbredt, at selv veluddannede læger forbinder beton og allergiske sygdomme.

Betonbranchen leverer nu dokumentation for, at beton som byggemateriale og et sundt indeklime er to størrelser, der let går hånd i hånd.

Overskriften kan med rette udvides til: ”Du kan **leve** og sove trygt i et betonelementhus”.

## **Dansk Betondag 2005**

Munkebjerg Hotel, Vejle  
15. september 2005

## **Revner og holdbarhed - erfaringer fra praksis**

Akademiingeniør  
Carsten Henriksen

**Vejdirektoratet**  
**Thomas Helstedsvej 11**  
**8660 Skanderborg**  
**cfh@vd.dk**



## Baggrund

Revner er en del af den virkelighed, der knytter sig til brugen af beton. Revner i beton er både ”frivillige” og ”ufrivillige”. De ”frivillige” revner er lastbetingede revner, der optræder i trækpåvirkede områder af konstruktionen som et uundgåeligt og accepteret resultat af armeret betons virkemåde. De ”ufrivillige” revner er de revner, der opstår som følge af andre faktorer end ydre last f.eks. svindrevner eller revner som følge af tvangsspændinger ved støbning af nyt på gammelt.

Ret beset er de ”ufrivillige” revner også ”frivillige”, fordi de er et resultat af betonens natur. Det ”ufrivillige” opstår, fordi vi mener, at vi kan – burde kunne – undgå disse revner.

I DS 411 opstilles krav til maksimale beregnede revnevidder afhængigt af miljøklasse og valg af armeringsprincip ligesom der gives anvisning i metoder til beregning af maksimale revnevidder.

Kravene til maksimale revnevidder er - som det formuleres i ”Betonkonstruktioner efter DS 411” af Bjarne Chr. Jensen - ”i nogen grad mere udtryk for sund ingeniørpraksis end for eksakt viden”, idet der blandt andet i teksten henvises til, at der ikke er eftervist nogen klar sammenhæng mellem revnevidde og risikoen for korrosion.

Dog har bl.a. undersøgelser af Tuutti har vist, at revner mindre end 0,2 mm har en mindre skadefrekvens end revner større end 0,2 mm som et argument for DS 411 kravene til maksimale revnevidder i ekstra aggressiv miljøklasse.



Figur 1.

Netop denne mangel på dokumenteret viden gør, at revner i armeret beton til stadighed giver anledning til betydelige diskussioner med hensyn til deres effekt på holdbarheden af armerede betonkonstruktioner.

Diskussionen har dog indbygget et paradoks, idet revnediskussionen til tider synes at skelne mellem frivillige(lastbetingede) revner og ufrivillige revner(f.eks. svindrevner).

De forventede lastbetingede revner observeres sjældent i praksis og når de observeres, er de normalt mindre end revneviddekravet og placeret i områder beskyttet mod direkte klorid- og fugtbelastning (f.eks. undersiden af brodæk eller dækket af en fugtisolering).

Langt de fleste revner der observeres er svindbetingede revner, der ikke er behæftet med de lastbetingede revners ”uafvendelighed”, men skyldes forhold, som vi kan - eller mener man burde kunne – kontrollere og derfor kan gøres til genstand for en diskussion, når de opstår.

Paradokset består i, at revnerne uden videre ville blive accepteret, hvis de var blevet observeret i trækzonen på undersiden af en dækkonstruktion, hvis de er mindre end DS 411 kravene. Alligevel

gøres revnerne ofte til genstand for betydelige diskussioner med hensyn til deres betydning for holdbarheden.

Et forhold der nærer og komplicerer diskussionen når det drejer sig om ”ufrivillige revner” er, at de ofte optræder på flader, der er direkte eksponeret for fugt- og kloridbelastning.

Som en komplicerende ingrediens i diskussionen om revners betydning optræder endvidere også hærde-/svindrelaterede mikrorevner i betonmatricen. Mikrorevners betydning for holdbarheden har været undersøgt, men som med undersøgelserne af makrorevners betydning har heller ikke disse undersøgelser ført til entydige konklusioner.

De senere års store fokus på holdbarhed har ikke gjort diskussionen om revners betydning mindre relevant og Vejdirektoratet har senest i forbindelse med bl.a. opførelsen af broer uden fugtisolering og kantbjælkeudskiftninger måttet forholde sig til revner i beton og betonbelægninger uden at dette på nuværende tidspunkt har ført til konklusioner.

For Vejdirektoratet har den diskussionsinitierende faktor ikke været holdbarhedsaspekter men det faktum, at en relativt stor del af de nystøbte kantbjælker efterfølgende har udvist visuelt skæmmende udfældninger i forbindelse med revnedannelser.

Hvis diskussionerne om revners betydning for holdbarheden skal nuanceres - og om nødvendigt føre til ændringer - kan et muligt udgangspunkt være at se på de praktiske erfaringer med eksisterende revner. På trods af at der er en del eksempler på revners skadelige indflydelse på holdbarheden mangler der lige netop på dette punkt et samlende generelt overblik og pejlemærke – hvad ved vi egentlig?

I det følgende er en række af Vejdirektoratets erfaringer med revner på brokonstruktioner summarisk beskrevet.

### **Revner i brokonstruktioner**

Generelt:

Vejdirektoratet har en del konstruktioner med ikke-statisk betingede revner på endevægge, søjler og kantbjælker. Desuden har der været udført en række rene betonbroer uden fugtisolering, som ligeledes fremstår med revner.

Væsentlige revnedannelser på Vejdirektoratets konstruktioner er første gang beskrevet i rapporten ”Betons Holdbarhed” fra 1980, hvor 512 konstruktionselementer på 79 broer blev undersøgt med hensyn til årsag og effekt.

Årsagen til revnerne knyttes overvejende til forhold omkring udførelsen og hærdningen (termo- og/eller svindrevner) med alkalikiselreaktioner som en eventuel følgeskade.

Enkelte elementer på 5 af de 79 broer er senere blevet repareret – overvejende søjler som er blevet overfladebehandlet. Årsagen til reparationerne har været alkalikiselreaktioner.

Kantbjælker:

I 2005 har Vejdirektoratet foretaget en optælling af kantbjælker med så store revner, at de er blevet registreret ved generaleftersyn. Resultatet fremgår af tabel 1.

Opførelsesår	Tværgående revner	Tværgående revner og netrevner	Tværgående revner, netrevner og revner af ukendt årsag	Tværgående revner, netrevner, revner af ukendt årsag og langsgående revner
1960	10 %	15 %	27 %	31 %
1970	8 %	11 %	26 %	33 %
1980	5 %	10 %	19 %	23 %
1990	5 %	9 %	18 %	19 %
2000	4 %	5 %	12 %	12 %

**Tabel 1**

Det ses, at antallet af revner i de ældre broer er relativt højt, hvilket skyldes at mange af disse er støbt med reaktivt materiale. Revner – primært de langsgående revner - skyldes derfor alkalikiselreaktioner.

Revnerne er overvejende mindre end 0,2 mm.

Ingen af disse broer er indtil videre blevet repareret og på ingen af broerne er der indikationer på, at reparationskrævende korrosionsskader er under udvikling trods revnerne. Det kan ikke afvises, at der allerede lokalt omkring revnerne har eller i fremtiden vil udvikles korrosionsskader, men kantbjælkerne vil alle på det tidspunkt have opfyldt et 50 års levetidskriterium før første reparation.

Antallet af broer med revner opført efter 1990 med de nye betonrecepter - hvor AKR-problemet skulle være blevet elimineret – er 12 %. Revnerne er overvejende mindre end 0,1- 0,2 mm. Ingen broer har indikationer på skader.

Det kan derfor konstateres, at omfanget af kantbjælker med et potentielt revneproblem er begrænset samtidig med, at erfaringen med de gamle broer ikke indikerer, at revnerne er noget større problem. Dette kan både skyldes, at revnerne er under den kritiske vidde eller at skade-udviklingen er så langsom, at den først vil føre til reparationskrævende skader på et meget sent tidspunkt i livsforløbet. Konklusionen er den samme: Revneproblemet synes ikke akut så længe revnerne er mindre end 0,1 - 0,2 mm, hvilket er den normalt observerede maksimale revnevidde.

### **Afsluttende kommentarer**

På basis af ovenstående kan det konstateres, at Vejdirektoratet ikke har haft større problemer med holdbarheden af brokonstruktionerne som følge af revner. Dels er antallet af konstruktionsdele med revner begrænset – 10-15 % af de kritiske elementer – dels er de revner der er udviklet i de revnekritiske konstruktionselementer begrænset i både antal og revnevidde (typisk mindre end 0,1-0,2 mm) og endelig har de elementer, der har udviklet revner endnu ikke udviklet følgeskader 25-50 år efter opførelsen.

De væsentligste problemer har indtil videre været knyttet til æstetiske forhold, når revner optræder på - og skæmmer - synlige flader.

Hvorvidt dette skyldes, at revnerne reelt ingen betydning har eller det skyldes, at revnevidderne er under en given kritisk størrelse er ikke afklaret (det anses for givet at nedbrydningsmiljøet i form af klorid eller karbonatisering er til stede).

Ligeledes er det ikke verificeret, om nedbrydning allerede er initieret. Det kan blot konstateres, at det ikke har ført til skader og næppe heller vil gøre det i skadeligt omfang, da revnerne overvejende kun forløber på tværs af fordelingsarmeringen, hvor korrosionen i givet fald vil udvikle sig som en grubetæring, der ikke hverken har statiske eller holdbarhedsmæssige konsekvenser.

Skulle det alligevel - mod forventning - ske vil det i givet fald ske på et tidspunkt, hvor den forventede levetid med rimelig kan siges at være opfyldt (50 år før de første reparationer er påkrævet).

Revnerne i de eksisterende konstruktioner støbt med de gamle betontyper vil i øvrigt kunne håndteres ad hoc i forbindelse med særeftersyn.

På de nye broer må ambitionsniveauet med hensyn til levetid forventes at være højere – 100 år eller mere. Der er med baggrund i den hidtidige historie samt forventningerne til de nye betoners begrænsede egenskaber som korrosionsmiljø ikke grund til at tro, at revner vil være et større generelt problem for holdbarheden end betonen i sig selv. Det vil sige, at de tiltag Vejdirektoratet hidtil har anvendt for at begrænse udviklingen af revner – spændingsberegninger, temperaturkrav, køling, fordelingsarmering, modenhedskrav osv. – synes tilstrækkelige.

Særlige og yderligere foranstaltninger af frygt for revner synes derfor unødvendige i både teknisk og økonomisk henseende, idet det må noteres, at en øget indsats for at nedbringe revneforekomster på et begrænset antal fremtidige konstruktioner er forbundet med øgede omkostninger, som skal kunne begrundes.

Det er dog samtidig klart at eksistensen af paradokser, uklarheder og manglende dokumentation samt ikke mindst manglen på praktiske erfaringer med revners reelle betydning må og skal give anledning til at foretage en mere nuanceret vurdering af revner og krav til revnevidder (herunder selvfølgelig kravene i DS 411) således, at de revner der rent faktisk er farlige undgås.

Der foreslås blandt andet:

1. En verifikation af forventninger til de nye betoners egenskaber som korrosionsmiljø. Vurderingerne af revners konsekvenser er initieringsfikseret. Eventuelle problemer ville være knyttet til den udviklingsfase, der følger efter initieringen. Denne fase tages imidlertid i øjeblikket som givet som en periode, der er ”kort”. Dette er korrekt på eksisterende klorid-belastede betoner med høje v/c-tal, men ikke nødvendigvis på nye høj kvalitetsbetoner! Vurderingerne af revners holdbarhedsmæssige konsekvenser skal klart skelne mellem revner i eksisterende og nye fremtidige konstruktioner. Specielt indikationerne på at betonerne aldrig når - eller i hvert fald først efter mange år når - overhovedet at opbygge en steady state tilstand, hvor korrosion kan finde sted. Dette ville muligvis kunne føre til, at der til kravet til maksimale revnevidder skal hæftes et mere entydigt samtidigt krav til betonkvalitet.
2. Vurdere behovet for at skelne mellem den revnede flades eksponering, revnernes orientering og tidspunktet for revnens opståen og årsag. Dette ville dels føre til en eliminering af det ambivalente i, at en revne risikerer at blive godkendt henholdsvis forkastet afhængigt af om revnen konkluderes at være lastbetinget henholdsvis betinget af anden årsag. Dels måske føre

til at kravene til lastbetingede revner skærpes i visse tilfælde alternativt, at der stilles krav om særlige forholdsregler mod en senere udvikling af korrosion(f.eks. brug af fugtisolering, rustfri stål armering, katodisk beskyttelse osv.)

Desuden er der en række mere principielle forhold som bør afklares f.eks.:

1. Når et lokalt område med øget v/c-tal(støbefejl f.eks.) vides at kunne føre til for tidlig nedbrydning, hvorfor skal en revnevidde på 0,2 mm så accepteres? Og hvorfor netop 0,2 mm? Transporten af fugt og klorid foregår uanset revnens størrelse – det kan argumenteres at transport ved kapillarsugning foregår hurtigere i tynde end brede revner. Det kan også argumenteres, at små revner holder bedre på de aggressive stoffer end de større revner som lettere ”rengøres” i forbindelse regnvejr. Omvendt kan der argumenteres for en selvhelende effekt i små revner(men hvad er så ”små”-hedskravet?)
2. Ikke-lastbetingede revner dannes ofte helt op til et år efter udstøbning. Hvordan skal de håndteres?
3. Erfaringerne viser, at korrosion i revner kan initieres og udvikles som grubetæringer uden et synligt skadebillede hvis de rette korrosionsbetingelser er til stede. Dette indebærer en risiko for uvarslede kollaps. Hvordan kan revner overhovedet accepteres gennem et generelt revneviddekrav uden samtidig at stille krav til korrosionsbetingelserne i omgivelserne?

**Dansk Betondag 2005**  
Munkebjerg Hotel, Vejle  
15. september 2005

**Den faste forbindelse Busan-Geoje i Korea**  
**Holdbarhedsdesign for beton til broer og tunneler**

Dr. Ing.  
Carola Katharina Edvardsen

**COWI**

**COWI A/S**  
**Parallelvej 2**  
**2800 Kgs. Lyngby**

**Tlf.: 45 97 28 13**  
**cle@cowi.dk**  
**www.cowi.dk**

## Holdbarhedsdesign for beton til broer og tunneler

I de seneste 10 år har COWI stået i spidsen for den internationale udvikling vedrørende rationelle levetidsdesigns for betonkonstruktioner. Designmetodikken er opsamlet i en probabilistisk baseret designmetode for holdbarhed, som blev udviklet i det europæiske forskningsprojekt DuraCrete (1996-1999). Metoden har fået navnet DuraCrete og er en af de første videnskabelige internationalt anerkendte metoder for levetidsdesigns.

Baseret på praktiske erfaringer som viser at de traditionelle holdbarhedsmetoder ofte har ført til utilstrækkeligt holdbare betonkonstruktioner, er fokus i den internationale betonforskning nu vendt mod nedbrydningsmekanismerne (f.eks. armeringskorrosion) i beton som funktion af de valgte materialer og det aktuelle omgivende miljø. I denne sammenhæng er det specielt cementtypen og betonkvaliteten, især betons porøsitet (diffusivitet), der er interessant. Resultatet af den internationale forskning har ført til forskellige holdbarhedsbaserede levetidsdesigns, som kan inddeles i to forskellige niveauer.

### Sammenligning af forskellige levetidsdesigns

	Traditionelt levetidsdesign	Holdbarhedsbaseret levetidsdesign Level 1	Level 2
	AASHTO, DS, BS, DIN Eurocodes	ACI-Life 365	DuraCrete
Basis	Erfaring & intuition	Deterministiske beregninger	Probabilistiske beregninger
Resultat	Simpelt <i>skøn</i> (min. dæklag, max. w/c, etc.)	Holdbarheds- (nedbrydningsmekanismer) baseret <i>design</i> (levetid, korrosionsrisiko, min. dæklag, max. klorid-diffusivitet, min. karboniseringsmodstand)	
Miljø	Utilstrækkelig miljøklassificering	Dårlig miljøklassificering	Detaljeret miljøklassificering (f.eks. marine konstruktioner: nedsænket, atmosfærisk, splash-/tidevandszone)
Nedbrydning	Ingen transport eller nedbrydningsmodellering	Matematiske modeller til transportprocesser og nedbrydningsmekanismer	
Betonkvalitet	Uafhængig af faktiske betonegenskaber	Baseret på teoretiske betonegenskaber	Baseret på faktiske betonegenskaber (faktisk klorid-diffusion ko-efficient fra betontest)

DuraCrete-metoden er en af de få probabilistisk baserede metoder, som tager højde for usikkerheden af miljøets aggressivitet, nedbrydningsmekanismer og materialeegenskaber.

For øjeblikket projekterer COWI broer og tunneler for den faste forbindelse mellem den sydkoreanske storby Busan og øen Geoje. Opgaven svarer næsten til en ny "Øresundsforbindelse", og omfatter en næsten 4 km lang sænketunnel - som bliver en af verdens længste og den dybeste med en maksimal vanddybde på 50 meter - samt to skråstagsbroer på hver to kilometer. Forbindelsen skal stå færdig i 2009.



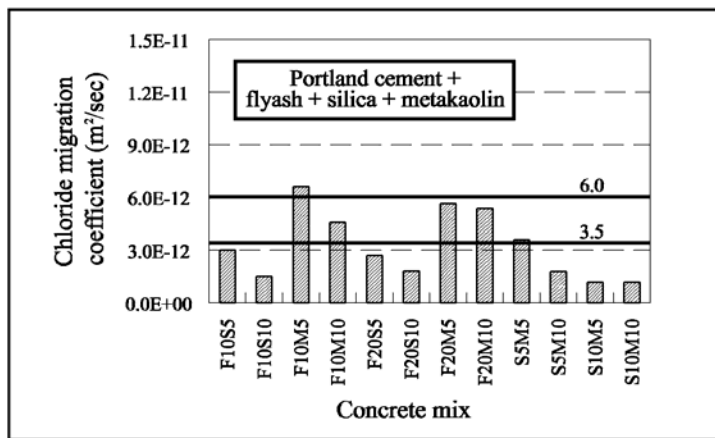
*Modelbillede Busan-Geoje-forbindelse (Daewoo E&C Ltd)*

Broerne og tunnelerne projekteres til at opfylde kravet om 100 års levetid under hensyntagen til de styrende nedbrydningsmekanismer, f.eks. armeringskorrosion forårsaget af klorider.

På dette projekt anvendes DuraCrete-metoden i forbindelse med levetidsdesignet for den armerede beton i bro- og tunnelkonstruktionerne. Nøgleholdbarhedsfaktorer, der gælder for DuraCrete designmetodikken, er kloriddiffusionskoefficienten og aldersfaktoren. Begge disse parametre er funktionelle krav i projektets betonspecifikationer og er fastlagt og efterprøvet i omfattende



testprogrammer af betonblandinger. Afprøvning af diverse betonblandinger er udført af DAEWOOs eget betonlaboratorium Institution of Construction Technology (DICT).



*Kloridmigrationkoefficient bestemt i forbindelse med prøver forud for byggeriet af den faste forbindelse Busan-Geoje. Forskellige potentielle betonblandinger med Portland Cement (F10S5 = 10% flyveaske og 5% mikrosilica, M10=10% Metakaolin).*

**Dansk Betondag 2005**  
Munkebjerg Hotel, Vejle  
15. september 2005



## **Københavns Hovedbanegård – Betonrenovering og ombygning**

ved civilingeniør Mogens Birkov Andersen

**Carl Bro as**  
**Granskoven 8**  
**2600 Glostrup**  
**Tlf. 4348 6595**  
**E-mail: [mba@carlbro.dk](mailto:mba@carlbro.dk)**  
**[www.carlbro.com](http://www.carlbro.com)**

*Hovedbanegården, der nærmer sig sin 100 års fødselsdag, står foran en gennemgribende istandsættelse af det bærende betondæk over sporene i banegårdshallen og på forpladsbroerne. Endvidere skal perron 2 og 3 sænkes og forlænges som led i en tilpasning til de nye IC4-tog. Arbejdet udføres fra begyndelsen af 2006 til midten af 2008, samtidigt med at driften på banegården og de underførte 12 jernbanespor opretholdes. Projektet er kompliceret og stiller store krav særlig til planlægning og logistik.*

Betondækket under banegårdshallen og på forpladsbroerne omkring banegraven ud til Vesterbrogade har længe trængt til istandsættelse. Dækket, der er en af de første større danske jernbetonkonstruktioner med et areal på ca. 15.000 m<sup>2</sup>, fik for ca. 50 år siden udskiftet betondæklaget med sprøjtebeton. Betonreparationerne beskytter nu ikke længere armeringen, og der er i de senere år løbende blevet foretaget afhugninger af løstsiddende dæklag for at forebygge mod nedfald på banen. Den manglende beskyttelse af armeringen skyldes primært karbonatisering og lokalt kloridindtrængning i betonen.

Forpladsbroerne har endvidere en meget beskeden bæreevne, idet trafiklasten er begrænset til 12 tons køretøjer. Renovering af broerne kombineres derfor med en forstærkning, så broerne fremover ikke pålægges vægtbegrænsning i forhold til færdselslovens køretøjer, som omfatter vogntog på op til ca. 50 tons.

Hovedbanegården er et af Danmarks travleste trafikknudepunkter med ca. 110.000 dagligt besøgende og 600 standsende tog. For på sigt at genere disse mennesker og banegårdens naboer mindst muligt udføres renoveringsarbejdet samtidigt med en sænkning og forlængelse af perron 2 og 3. Arbejdet udføres som ét samlet projekt for at sikre den bedste udnyttelse af de nødvendige sporspærringer.

Bygherre på projektet er DSB i samarbejde med Banedanmark. De samlede arbejder er i januar 2005 udbudt i én hovedentreprise i et tidligt udbud på projektforslagsniveau og der er nu indledt samarbejde med entreprenørkonsortiet Pihl & Søn A/S og Per Aarsleff A/S. Udbudet og den i gangværende detailprojektering varetages af Carl Bro as som ingeniørrådgiver og DSB Byggerådgivning som arkitekter. Atkins Danmark A/S er underrådgiver på baneteknik.

Det udbudte entreprisearbejde inkluderer tilknyttede banetekniske arbejder, herunder midlertidige flytninger og nedtagninger af køreledningsanlægget for gennemførelse af renoveringsarbejdet, banetransporter af materialer og materiel, sikkerhedsledelse mv. Entreprisearbejdet omfatter således bygge-, anlægs- og banearbejder, der skal udføres på en snæver arbejdsplads med mange interne og eksterne grænseflader, herunder grænseflader til banedriften, passagerer, naboer, forretningscenter, hoteller, vejtrafikken mv. Disse arbejdsbetingelser stiller store krav til entreprenørens planlægning og til at projekt- og udførelsesløsningerne er simple, fleksible og sikre. Entreprenøren er derfor blevet inddraget i detailprojekteringen for derigennem at medvirke til, at de tekniske løsninger bliver hensigtsmæssige og bygbare, og for at den banetrafikale og den logistiske planlægning foretages i god tid og tilpasset de valgte udførelsesmetoder.

Det samlede projekt er opdelt i 4 delprojekter:

1. Perronforlængelser
2. Perronsænkninger
3. Haldæk
4. Forpladsbroer

De enkelte delprojekter er kort beskrevet i det følgende.

## 1. Perronforlængelser

Perron 2 og 3 forlænges hhv. 70 og 55 m ind under banegårdshallen, så perronerne tilpasses et IC4 tog på 344 m. En forlængelse den modsatte vej er ikke mulig pga. sporkonfigurationen. Under banegårdshallen fjernes bygninger og de bærende konstruktioner forenkles for at gøre de nye perronafsnit så åbne og overskuelige som muligt. For at sikre gode omstigningsforhold erstattes store bærende betonsøjler ved perronkanterne med centersøjler i perronen. Den nuværende elevator flyttes til midt i perronen og en ny trappe etableres mellem den forlængede perron og banegårdshallen. Trapper udføres i lukbare brandsikre trapperum og konstruktioner brandsikres iht. en udarbejdet Brandstrategirapport.



For at sikre tilfredsstillende frisk luft på perronerne etableres et omfattende ventilationsanlæg, hvor luften over spor udsuges og føres ud via ca. 14 m høje aftræksskorstene mellem stationsbygningen og perronhallen. Som grundlag for dimensionering af ventilationsanlægget, er der udført omfattende målinger af den eksisterende luftkvalitet.

## 2. Perronsænkninger

Perronerne sænkes 15-20 cm, så de tilfredsstiller den internationale standard på 55 cm over skinne og samtidig giver niveaufri adgang til de nye IC4 togs lavtgulvsafsnit. Sænkning af perronerne medfører principielt ingen anden ændring af perronerne end selve sænkningen, bortset fra at minibarer fjernes og trapper og elevatorer tilpasses. Ved sænkningen afkortes og genanvendes de eksisterende perronkonsoller. Sænkningen foretages sektionvis over 6 weekender med ét spor spærret ad gangen. Perronerne vil blive anvendt til den almindelige drift i hele byggeperioden, med undtagelse af weekender, hvor den ene perronhalvdel lukkes.



### 3. Haldæk

Renovering af jernbetondækket under banegårdshallen foretages mens banegårdshallen og dens forretningscenter er i drift. Dette betyder, at arbejdet skal udføres fra undersiden, dvs. fra baneterrænet. En traditionel betonreparation med behugning og sprøjtestøbning er ikke optimal, idet en sådan metode er langsommelig, støj- og vibrationsbelastende og ikke egnet til reparation af de aktuelle kun ca. 10 cm tykke betonpladefelter. Pladefelterne og de sekundære bjælker er i stedet valgt renoveret ved påsætning af en underliggende bærende præfabrikeret stålkonstruktion. Betonen over stålkonstruktionen indgår herefter ikke i den bærende konstruktion og renoveres derfor ikke.

Stålkonstruktionen beskyttes af brandbats og rustfri tyndplader. Under pladefelterne indbygges endvidere varmeisolering til forbedring af komforten i de ovenliggende rum.

De resterende betonarealer, dvs. hovedbjælker og søjler, renoveres ved en traditionel behugning og sprøjtestøbning.

### 4. Forpladsbroer

I forbindelse med renovering og forstærkning af forpladsbroerne udskiftes balustraden omkring hele banegraven, så den kan modstå gældende krav til påkørselslaste. Endvidere udskiftes trappen mod Reventlowgade samt ti større søjler under forpladsbroen ud for hovedindgangen.

Det broarbejde, der skal udføres fra baneterrænet, vil i væsentlighed skulle foregå i togfrie intervaller, dvs. i korte perioder om natten, hvor der tilmed også er skærpede krav til støjbelastninger. Der er derfor tilstræbt løsningsmetoder, hvor mest muligt arbejde kan foretages om dagen fra oversiden af broen og uafhængigt af togdriften. Med den planlagte løsning vil der fra baneterrænet i det væsentlige alene skulle foretages behugning af bjælkeundersider og opsætning af arbejdsplatforme ud for bjælkeundersider. Fra oversiden fjernes samtlige pladefelter og bjælkesider behugges og suppleres eventuelt med armering. Herefter foretages – ligeledes fra brooversiden - forskalling og blødstøbning af bjælkesider og -undersider. Dækket etableres ved brug af filigran-elementer. Forstærkning af brodækket opnås primært ved en forstærkning af dækpladen, således at indspændingen over mellemunderstøtninger øges.

Der er i projektet stor opmærksomhed på, at naboerne, som bl.a. omfatter flere hoteller, generes mindst muligt af entreprisarbejderne. For at få en god vurdering af støjgenerne er der foretaget støjundersøgelser fra prøvehugninger på broanlægget med forskellige nedbrydningsmetoder. Undersøgelsesresultaterne har vist, at de sædvanlige gældende støjkrav ikke kan forventes overholdt, og der har derfor været en tæt information og dialog med de enkelte naboer og Miljøkontrollen, inden udførelsesmetoderne er blevet valgt.

Forpladsarealet vil efter renoveringsarbejdet være nyindrettet. Disponeringen af trafikflowet vil overordnet forløbe som nu med en midterø på forpladsen. Mængden af parkeringspladser vil dog blive reduceret til fordel for mere sikre og bedre adgangsforhold for de svage trafikanter - fodgængere og cyklister. Af hensyn til det visuelle indtryk vil der kun blive anvendt cykelstativer i én etage og ikke som i dag i to etager.

Forpladsarealet foran hovedindgangen vil blive gjort til et ”stilleområde”, hvor kørebanerne hæves til samme niveau som fortovene og hele arealet belægges med granit- og chausséstensfliser i forskellige mønstre, som adskiller gang-, fortovs-, parkerings- og køreområder.

## **Arbejdsplads**

Hovedbanegården er udførelsesmæssigt vanskelig tilgængelig og byggematerialer og entreprenørmateriel vil i vid udstrækning skulle tilkøres via banen. Arbejdspladsen har derfor måtte opdeles på flere steder:

- Hovedskurby i Reventlowsgade ca. 100 m fra byggeplads.
- Arbejdsplads og læssested til fjernbanen ved Dybbølsbro ca. 1 km fra byggeplads.
- Omlæsningssted til S-banen ved Ingerslevsgade ca. 1 km fra byggeplads.

Arbejdet på hovedbanegården vil blive stærkt etapeopdelt, idet der typisk kun tillades spærring af ét S-spor og ét fjernspor ad gangen. Sporet på fjernbanen vil blive døgnspærret, mens sporet på S-banen kun spærres om natten og i enkelte weekender.

Arbejdspladsen og arbejdsforholdene får en væsentlig indflydelse på projektet og fordobler formentlig både entrepriseudgiften og udførelsestiden i forhold til et projekt på en åben mark.

## **Det endelige resultat**

Det synlige resultat af dette betragtelige entreprisarbejde er umiddelbart kun en moderniseret forpladsindretning og et par mindre perronforlængelser, men dækker over en bro- og bygningskonstruktion, der gennem de senere år har krævet betydelige drifts- og vedligeholdelsesarbejder og som fremover vil få forlænget levetiden med mindst 50 år uden væsentlig vedligeholdelse.