

## 4 Betonsammensætning

*Af Christian Munch-Petersen*



*Figur 1. Beton består af en række delmaterialer, der kan sammensættes i mange forskellige blandingsforhold. I øverste række tilslag i forskellige størrelser. Nummer tre fra venstre er knust granit. Nederste række fra venstre er cement, flyveaske, mikrosilica og vand. Beton tilsættes som regel også tilsætningsstoffer. Betonproducenten skal opfylde de stillede krav og vælge den optimale betonsammensætning blandt disse mange mulige blandingsforhold.*

Beton kan betragtes som et kunstigt stenmateriale skabt ved at "lime" tilslag (sand og sten) sammen med en to-komponent lim, bestående af cement og vand.

Udover disse tre komponenter indeholder beton typisk tilsætningsstoffer og tilsætninger som flyveaske, mikrosilica og kalkfiller.

Tilslag findes i forskellige typer og størrelser, der er mange cementtyper, et stort antal tilsætningsstoffer og en række forskellige tilsætninger som fx kalkfiller og flyveaske. Desuden findes der flere producenter af alle disse komponenter – og i forskellige kvaliteter til forskellige priser.

Der er derfor i teorien en mange-dobbelt uendelighed af muligheder for at sammensætte en beton, men i praksis vil betonproducentens muligheder være stærkt begrænset af kravmæssige og praktiske forhold.

## Betonproducentens rammebetingelser

Betonproducenten skal vælge en betonsammensætning, der opfylder de krav, der er stillet af køberen af betonen.

Køberens krav består normalt i krav til en trykstyrkeklasse, eksponeringsklasser (miljøpåvirkning), konsistens og største stenstørrelse ( $D_{\text{maks}}$ ). Desuden er det som regel underforstået, at betonstandarden DS/EN 206 DK NA skal være opfyldt.

Det betyder reelt, at køberens krav vil omfatte krav til betonens konsistens samt grænser for betonsammensætningen - fx krav om et maksimalt vand-cement forhold og en minimumscement-mængde - krav til kvaliteten af cement og tilslag, største stenstørrelse samt betonens styrke.

Betonproducenten har herudover normalt begrænsninger i sine muligheder forårsaget af anlæggets indretning, og her er særligt antallet af siloer til pulver (cement og tilsætninger) og tilslag samt doseringsanlæg for tilsætningsstoffer af betydning. Det betyder, at producenten reelt kun har et begrænset antal delmaterialer at vælge i mellem.

Betonproducenten kan selvfølgelig på anfordring fremskaffe ethvert tænkeligt delmateriale på markedet, men for en producent af fabriksbeton eller betonelementer, vil den enkelte køber kun aftage en lille del af den årlige betonproduktion, hvorfor den enkelte køber i høj grad må afpasse sine ønsker og krav til de delmaterialer, som betonproducenten har til rådighed på den aktuelle fabrik.

Derfor er det vigtigt - som beskrevet i afsnit 2 Krav til beton - at køberne anvender de standardiserede kravklasser i videst muligt omfang. Herved kan producenten med større sandsynlighed have relevante delmaterialer og betonsammensætninger "på lager", og behøver ikke fremskaffe særlige delmaterialer for at kunne producere nogle få kubikmeter specialbeton.

Dette har også betydning for en yderligere afgørende rammebetingelse for produktionen - betonen skal være så billig som mulig.

Udover en fordyring af betonen, hvis der stilles ikke-standardiserede krav, vil der også være et tidsforbrug til forprøvning og evt. prøvestøbninger.

Der foreligger i princippet mulighed for at optimere betonsammensætningen med matematiske værktøjer (fx lineær programmering), men det sker ikke i praksis. I stedet anvendes mere pragmatiske og erfaringsbaserede værktøjer.

## Delmaterialer på en almindelig betonfabrik

En typisk dansk betonfabrik til levering af færdigbeton har mindst 2 pulversiloer. Heri opbevares normalt i den første silo en almindelig portlandcement (som Rapid fra Aalborg Portland) og i den anden silo flyveaske. I en evt. tredje silo kan opbevares en anden cementtype, fx den til broer krævede CEM I SR5 (som Lavalkali-sulfatbestandig fra Aalborg Portland).

På en typisk dansk elementfabrik anvendes også almindelig portlandcement, men normalt ikke flyveaske, da flyveaske ikke fremmer den hurtige hærdning, der ønskes til elementproduktion. I en evt. silo nummer to og tre har elementfabrikkerne typisk en kalkfillercement (som Basis cement fra Aalborg Portland) og en hvid cement (som White fra Aalborg Portland). Basiscement er billigere end en almindelig portlandcement, og den hvide cement anvendes til såvel hvid som indfarvet beton.

Da lager og dosering af tilslag kræver megen plads, anvender nogle mindre færdigbetonfabrikker kun én kvalitet af fint tilslag (sand), som således skal være af den bedste kvalitet, der normalt kræves, hvilket vil sige et ikke-alkalisk reaktivt materiale. Til betoner til anvendelse indendørs vil et sådant sand derfor være af en unødvendig god kvalitet.

Større færdigbetonfabrikker har typisk to sand-kvaliteter – én svarende til indendørs beton og én svarende til udendørs beton, hvilket svarer til henholdsvis et alkalireaktivt og et ikke-alkalisk reaktivt sandmateriale.

Det grove tilslag (sten) bør opbevares og doseres i flere fraktioner for at undgå afblanding, fx i fraktionerne 4-8, 8-16 og 16-32 mm (granitskærver dog oftest i 16-25 mm). Det betyder, at blot to kvaliteter af groft tilslag (fx til indendørs og udendørs beton) vil kræve mindst seks lagersiloer. Mindre fabriksbetonfabrikker anvender derfor ofte kun én kvalitet af sten og/eller anvender kun stenstørrelser op til 16 mm.

For elementfabrikkerne er forholdene i princippet tilsvarende, men her kan æstetiske krav til elementernes overflader, farve og struktur betyde, at producenten til en given produktion kan være nødsaget til at hjemtage specielle kvaliteter af tilslag og foretage tømning, rensning og udskiftning af tilslagslagene.

## Opfyldelse af krav

Den almindelige situation for beslutning om en betonsammensætning (ofte kaldet en "betonrecept", på engelsk "mix design") er derfor dels et produktionsanlæg med et antal tilgængelige delmaterialer og dels et kravdokument fra køberen. Køberens kravdokument vil normalt være helt eller delvist bygget op på grundlag af standarder.

Kravene vil altid omfatte de såkaldte brugsegenskaber, det vil sige krav til den udstøbte og hærdnede betons egenskaber. Det omfatter altid krav til betonens styrke, og kan fx omfatte vand-cement forhold og evt. krav til delmaterialerne – fx krav om ikke-alkalisk reaktive tilslagsmaterialer.

Kravene bør også omfatte de egenskaber ved den friske og hærdnende beton, som skal passe til den valgte udførelsesmetode. Disse egenskaber kan med en bred betegnelse kaldes udførelsesegenskaber. Det omfatter blandt andet betonens udstøbelighed (bearbejdighed og konsistens målt ved sætmål, flydemål mv.), betonens følsomhed overfor udtørring, betonens egnethed til særlige udførelsesforhold (fx en gulvstøbning), betonens styrkeudvikling og betonens temperatur og varmeudvikling under hærdningsprocessen, samt den tidsmæssige udvikling af konsistens og luftindhold.

I DS/EN 206 DK NA omtales i Tabel DK NA-4 egenskaberne:

- Konsistensændring
- Luftindholdsændring
- Varmeudvikling

som Produktionsegenskaber. Produktionsegenskaberne i standarden er således en delmængde af udførelsesegenskaberne.

Det ses ofte, at en køber af fabriksbeton ikke stiller særlige krav udførelsesegenskaberne. Betonproducenten må så enten gætte sig til, hvilke udførelsesegenskaber betonen skal have, eller henvende sig til køberen for at få specificeret de nødvendige og tilstrækkelige udførelsesegenskaber.

Slutbrugeren af betonen – fx en bygherre – interesserer sig kun for brugsegenskaberne og ikke for udførelsesegenskaberne, mens en entreprenør skal interesse sig meget for udførelsesegenskaberne og desuden selvfølgelig opfylde brugsegenskaberne. Det er derfor i entreprenørens egen interesse at definere sine krav til udførelsesegenskaberne overfor betonproducenten, og ikke blot alene videresende bygherrens krav til brugsegenskaberne til betonproducenten.

De fleste udførelsesfejl, der kan henføres til betonsammensætningen, stammer således fra entreprenørens manglende specificering af krav til udførelsesegenskaber. Undlader han dette, risikerer han at få leveret den billigste beton, der opfylder brugsegenskaberne, men også en beton, der ikke er egnet til den valgte udførelsesmetode.

## Betonsammensætning – brugsegenskaber

Krav til brugsegenskaberne omfatter de direkte krav til sammensætningen som typisk omfatter:

- Vand-cement forhold
- Minimum cementindhold
- Evt. minimum og maksimum indhold af en eller flere tilsætninger

Sådanne krav indgår direkte i sammensætningen. Det er dog vigtigt, at den valgte sammensætning opfylder alle disse krav med en vis margin, således at uundgåelige variationer under doseringen af de enkelte delmaterialer ikke medfører, at et krav ikke opfyldes.

Normalt kan man som tommelfingerregel regne med, at hvis den tilstræbte værdi for et delmateriale ligger mere end to gange doseringsnøjagtigheden fra grænsen, vil den samlede betonsammensætning altid opfylde de stillede krav.

Hvis fx minimumscementindholdet er sat til  $330 \text{ kg/m}^3$  bør den tilstræbte betonsammensætning have et cementindhold på mindst  $350 \text{ kg/m}^3$ , da doseringsnøjagtigheden for cement er sat til 3 % i de gældende standarder.

Når man ikke kan "nøjes" med et tillæg på én gang doseringsnøjagtigheden, skyldes det, at man fx kan komme i den situation under en konkret dosering, at cementindholdet er minus 3 %, mens tilslag er plus 3 %. Herved reduceres det reelle indhold af cement pr. kubikmeter med mere end 3 %.

Ofte blandes beton på en fabriksbeton-fabrik i satse – fx 3  $\text{m}^3$  ad gangen – og disse satse fyldes op i en roterbil – fx 3 satse af 3  $\text{m}^3$  til et læs på i alt 9  $\text{m}^3$ . I roterbilen vil der under transport ske en blanding af satsene, og det er derfor i DS/EN 206 DK NA under visse omstændigheder tilladt, at de enkelte satse ikke fuldt ud opfylder doseringsnøjagtighederne, hvis blot det samlede læs gør. Hvis der fx i sats nr. 2 er for lidt cement, kan ekstra cement i sats nr. 3 korrigere herfor.

Disse to krav og deres indflydelse på betonsammensætningen er beskrevet nedenfor.

### Chloridindhold

Chloridindholdet i betonen skal begrænses, således at korrosion på armeringen ikke starter umiddelbart efter udstøbningen. For konstruktioner udsat for chlorider fra havvand eller tøsalt er det desuden en fordel, at betonen har et så lavt chloridindhold fra starten, så det tager længere tid for chlorid udefra - sammen med det i betonen indbyggede chlorid – at nå den tærskelværdi, hvor korrosion kan starte.

De vigtigste kilder til chlorid i den friskblandede beton er cementen (sic !), evt. tilslaget (især sømaterialer) og evt. tilsætningsstoffer.

Chloridindholdet i cement er tilladt at være op til 0,10 %, og da den kritiske grænse for chlorid i beton i de fleste normer og standarder er sat til 0,10 % eller 0,20 % (af cementmængden) betyder det, at cementen alene kan skabe problemer med at opfylde kravet til maks. chlorid i betonen. Heldigvis har de fleste cementer et lavere chloridindhold end 0,10 % – fx 0,04 % - men cementers chloridindhold er stigende omkring 2018 som følge af øget brug af alternative brændsler – fx biobrændsler – der har et vist chloridindhold.

### Eksempel

En betonrecept har en tilstræbt mængde cement på  $350 \text{ kg/m}^3$  og et tilstræbt vandindhold på  $155 \text{ kg/m}^3$ . Hertil 700 hhv. 1150 kg sand og sten pr. kubikmeter og et naturligt luftindhold på 1,6 % - se "Betonrecept" nedenfor. Vand-cement forholdet er 0,44.

Disse værdier kaldes i betonbranchen for "bør-værdier", fordi det er de værdier, der bør indgå i blandingen.

	Mængde Kg	Densitet Kg/m <sup>3</sup>	Volumen liter		Mængde Kg	Densitet Kg/m <sup>3</sup>	Volumen liter		Mængde Kg	Densitet Kg/m <sup>3</sup>	Volumen liter
Cement	350	3160	111	Cement	340	3160	107	Cement	332	3160	105
Vand	155	1000	155	Vand	160	1000	160	Vand	156	1000	156
Sand	700	2540	276	Sand	721	2540	284	Sand	705	2540	278
Sten	1150	2600	442	Sten	1185	2600	456	Sten	1158	2600	446
Luft			16	Luft			16	Luft			16
Sum	2355		1000	Sum	2405		1023	Sum	2352		1000
v/c	0,44			v/c	0,47			v/c	0,47		
Betonrecept.				Blandet recept. Fylder over 1000 liter				Blandet recept korrigeret til 1000 liter			

Imidlertid er der en vis tolerance på doseringen af delmaterialerne og normalt tillades afvigelser på  $\pm 3 \%$ . Hvis man tænker sig den (uheldige) situation, at cement doseres 3 procent for lavt og vand, sand og sten 3 procent for højt, fås en blanding som angivet på det midterste skema. Bemærk, at blandingen fylder over 1000 liter.

For at evaluere indholdet pr. kubikmeter skal der derfor korrigeres til 1000 liter, hvilket sker ved i eksemplet at korrigere med faktoren  $1000/1023$ . Herved fås skemaet til højre, som er den blandede recept på 1000 liter ( $1 \text{ m}^3$ ). Disse tal kaldes "er-værdier", fordi det er blandingen, som den er.

Bemærk, at cementindholdet er nede på  $332 \text{ kg/m}^3$ , og at vand-cement forholdet er på 0,47.

Den aktuelle betonrecept vil således selv med de tilladte doserings-variationer opfylde et krav til minimums cementindhold på  $330 \text{ kg/m}^3$ .

Den aktuelle betonrecept kan dog ikke opfylde et krav til  $v/c \leq 0,45$ , da de tilladte doserings-variationer kan øge v/c med 0,03. Bør-værdien for v/c skal derfor ligge mindst 0,03 under kravet – altså på 0,42 i vores eksempel. Det vil kræve en recept med lidt mindre vand eller lidt mere cement – evt. begge dele.

I brugsegenskaberne indgår også krav til delmaterialer, hvor krav til tilslag for udendørs betoner er særligt vigtige under danske forhold – se kap. 2 Krav til beton.

I krav til brugsegenskaber indgår også for betoner krav til:

- Chloridindhold
- Alkaliindhold

Chloridindholdet i tilslag afhænger primært af tilslagets oprindelse. Tilslag indvundet på land – bakkematerialer – og nedknust klippe indeholder typisk ikke chlorid, men tilslag udvundet på havet (kaldet sømaterialer) indeholder chlorid fra havvandet. Hvis materialet derfor drænes for havvand eller endnu bedre vandes med ferskvand, vil chloridindholdet være lavt. Hvis saltvandet forbliver i tilslaget og tilslaget udtørres, kan chloridindholdet blive så højt, at tilslaget ikke kan anvendes til armeret beton.

### Eksempel på chloridindhold i beton

Nedenfor ses et eksempel på en beregning af chloridindholdet i en beton med sømaterialer.

Som det ses, er de væsentlige chloridkilder cementen (kan indeholde op til 0,10 % iht cement-standard), vandet (her sat til maks. indholdet i drikkevand på 250 mg/liter – ofte er det under halvdelen i drikkevand), og søsand og søsten.

Betonen opfylder akkurat det almindelige krav på maksimalt 0,20 % ift. Cementvægten.

Imidlertid er chloridindholdet i søsand og søsten svingende og ofte højere end det anførte – fx op til 0,07 % for sand og 0,020 % for sten – værdier som ville medføre overskridelse af kravet.

Derfor anvendes sjældent søsand og søsten i samme betonrecept.

	Mængde kg/m <sup>3</sup>	Chloridindhold %	Chloridindhold kg/m <sup>3</sup>
<b>Cement</b>	350	0,050	0,1750
<b>Vand</b>	155	0,025	0,0388
<b>Søsand</b>	700	0,050	0,3500
<b>Søsten</b>	1150	0,010	0,1150
<b>Luftindblandingsmiddel</b>	0,8	0,020	0,0002
<b>Plastificering</b>	2,4	0,000	0,0000
<b>Superplast</b>	1,6	0,000	0,0000
		Chlorid i alt	0,6789 kg/m <sup>3</sup>
		<b>Chlorid ift. Cement</b>	<b>0,19 %</b>
		Krav typisk Cl <sup>-</sup> /Cement	0,20 %

### Alkaliindhold

Alkaliindholdet (indholdet af natrium- og kalium-ioner) i betonen skal være så lavt, at der ikke udvikles skadelige alkaliselreaktioner. Er alkaliindholdet højt, kan der opstå

alkaliskelreaktioner i tilslag, der (ved en fejl) ikke helt opfylder kravene til ikke-reaktivt tilslagsmateriale. Krav om begrænsning af alkaliindholdet i beton er derfor i mange tilfælde at betragte som en ekstra sikkerhedsforanstaltning mod alkaliskelreaktioner - der supplerer kravet om ikke-reaktivt tilslag.

Er alkaliindholdet meget højt, kan der fremprovokeres alkaliskelreaktioner selv i tilslag, der normalt regnes som uskadeligt. Muligvis kan selv et mellemhøjt alkaliindhold på langt sigt (+30 år) give anledning til skader.

### **Ækvivalent alkaliindhold**

Alkaliindholdet – indholdet af natrium og kalium – beregnes som det såkaldte ækvivalente alkaliindhold. Der ses bort fra de øvrige alkalimetaller som lithium og cæsium.

#### **3 Bestemmelse af alkaliindhold**

Alkaliindholdet er defineret som indholdet af ækvivalent syreopløseligt  $\text{Na}_2\text{O}$ , som beregnes på følgende måde:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ækv}} \text{ masse-\%} = \text{Na}_2\text{O} \text{ masse-\%} + 0,658 \text{ K}_2\text{O} \text{ masse-\%}$$

hvor indholdet af  $\text{Na}_2\text{O}$  og  $\text{K}_2\text{O}$  skal bestemmes som angivet i DS/EN 196-2.

Ovenfor i den blå ramme ses definitionen fra DS/INF 135. Når der regnes med alkali-oxider, skyldes det den traditionelle metode til bestemmelse af alkaliindholdet. Indholdet af rene alkalier er således mindre.

Omregningsfaktoren på kalium-oxid indholdet skyldes, at atomvægten for Natrium er 23,0, for Kalium 39,1 og Ilt 16,0.  $\text{Na}_2\text{O}$  har derfor molekylvægten  $2 \times 23 + 16 = 62$ , mens  $\text{K}_2\text{O}$  har molekylvægten  $2 \times 39,1 + 16 = 94,2$ . Forholdet mellem 62 og 94,2 er lig 0,658

Den vigtigste kilde til alkali i beton er cement. Der kan også være mindre mængder alkali i tilslag (fra natriumchlorid) og i tilsætningsstoffer og tilsætninger.

Alkaliindholdet i cement er derfor en vigtig parameter for at sikre, at alkaliindholdet i betonen ikke er for højt.

I Danmark stilles der i DS/EN 206 DK NA krav om, at alkaliindholdet i en række udendørs eksponeringsklasser ikke er over  $3,0 \text{ kg/m}^3$  beton. Det betyder, at hvis der fx anvendes  $400 \text{ kg}$  cement pr.  $\text{m}^3$ , skal alkaliindholdet i cementen være et stykke under  $3/400 = 0,0075$  eller under  $0,75 \%$ , hvis der også skal være plads til alkalier fra andre delmaterialer.

Cementer med et alkaliindhold på mindre end  $0,6 \%$  får i henhold til DS/INF 135 betegnelsen LA for lavt alkaliindhold og kaldes for lavalkalicementer. En lavalkalicement vil normalt sikre, at kravet om de maksimalt  $3,0 \text{ kg}$  alkali er opfyldt. Den danske



lavalkaliments fra Aalborg Portland og den hvide cement fra samme producent har endda kun et alkaliindhold på under 0,4 % og har derfor betegnelsen EA for ekstra lavt alkaliindhold.

De mere almindelige cementer som Rapid og Basis fra Aalborg Portland er også LA cementer, hvorfor en producent, der anvender danske cementer, normalt ikke vil få vanskeligheder med at opfylde kravet om maksimalt 3,0 kg alkali pr. kubikmeter.

Hvis producenten anvender importerede cementer – eller hvis der importeres beton til Danmark (fx i betonelementer) – kan disse cementer udmærket have et alkaliindhold på over 1 %, og så vil selv cementindhold på under 300 kg pr. kubikmeter kunne skabe problemer.

DS/EN 206 DK NA tillader brug af alkali-reaktivt sand ved moderat miljøpåvirkning (udendørs uden tilføjelse af chlorider og alkalier), hvis alkaliindholdet i betonen er under 1,8 kg/m<sup>3</sup>. Et sådant krav kan kun opfyldes med en begrænset mængde LA cement eller bedst med EA cement.

### Trykstyrke

Betonens trykstyrke er en vigtig og ofte afgørende brugsegenskab.

Som der fremgår af kap. 6 Proportionering, afhænger trykstyrken primært af vand-cement forholdet og af cementstyrken. Luftindholdet har også en vis betydning, da højt luftindhold reducerer styrken. Tilslagets styrke er af betydning for betoner med høj styrke.

En betonproducent kan således beregne sig frem til en forventet styrke og eftervise denne styrke ved prøvning. Desuden har de fleste producenter en stor erfaring med styrker fra praktisk produktion.

For betoner til de udendørs eksponeringsklasser er der i DS/EN 206 DK NA stillet krav til både vand-cement forhold og trykstyrke. Disse trykstyrkekrav vil som regel blive opfyldt, hvis der anvendes en sammensætning, der opfylder kravene hertil (især vand-cement forholdet), og hvis der anvendes en almindelig dansk cement. Trykstyrkekravene i DS/EN 206 DK NA sikrer dog, at en betonproducent ikke uden afprøvning, der dokumenterer tilstrækkelig styrke, kan anvende cementer med lav styrke og højt indhold af tilsætninger som fx flyveaske.

I nogle tilfælde kræves højere styrker- fx til søjler – og dette opnås ved at reducere vand-cement forholdet som beskrevet i kap. 6 Proportionering.

### Vandtæthed

Der stilles ofte krav til, at betonen kan holde vand ude. Der skelnes i DS/EN 206 DK NA mellem fugttæthed (fx beton til almindelige kældervægge uden egentligt vandtryk) og vandtæthed (hvor betonen skal kunne modstå et vandtryk – fx beton til vægge i tunneler og kældre under grundvandsspejlet).

De i DS/EN 206 DK NA anførte krav påvirker betonens sammensætning, i det der er stillet krav til et minimum fillerindhold på  $375 \text{ kg/m}^3$  for både fugttæthed og vandtæthed, og et vand-cement forhold på højst 0,55 for fugttæthed og 0,45 for vandtæthed. Desuden skal det ækvivalente cementindhold være mindst  $300 \text{ kg/m}^3$  for vandtæt beton.

Der henvises desuden til afsnit 10.8 Vandtæthed.

### **Modstand mod chloridindtrængning**

Modstand mod chloridindtrængning sikres i høj grad ved krav til vand-cement forholdet. DS/EN 206 DK NA har således krav til vand-cement forhold, men ikke direkte krav til måling af modstanden mod chloridindtrængning.

Sådanne krav ses dog stadigt oftere og hvis de stilles, kan det påvirke betonsammensætningen for at sikre opfyldelse af disse krav.

Der henvises desuden til afsnit 10.9 Chloridtæthed.

### **Betonsammensætning – udførelsesegenskaber**

Krav til udførelsesegenskaberne omfatter krav specifikt nævnt i DS/EN 206 DK NA som:

- Konsistens
- Konsistensændring
- Luftindholdsændring
- Varmeudvikling
- Styrkeudvikling

Nedenfor er det beskrevet, hvorledes betonsammensætningen har indflydelse på udførelsesegenskaberne, og dermed hvorledes man ved at vælge sin betonsammensætning kan påvirke udførelsesegenskaberne.

Det er også beskrevet, hvorledes betonens efterbehandling kan påvirke betonsammensætningen – og omvendt.

#### **Konsistens**

Mange forhold påvirker betonens konsistens – se afsnit 5.1 Konsistens – men umiddelbart kan bearbejdigheden øges ved at tilsætte flere plastificerende tilsætningsstoffer eller mere vand til betonen.

Den sidstnævnte fremgangsmåde anvendes ofte til fabriksbeton, hvor en grundrecept med fx et sætmål på 120 mm ligger på blandecomputeren. Hvis en kunde ønsker en højere konsistens – fx sætmål 180 mm – beregner blandecomputeren, at dette medfører en øget vandtilsætning på fx 10 liter. For at fastholde et uændret vand-cement forhold for at fastholde styrken og ikke overskride et evt. maksimum krav til vand-cement forholdet, ændres recepten ved, at der tilsættes både de 10 liter vand og mere cement – fx 20 kg - hvis vand-cement indholdet ønskes fastholdt på fx 0,50.

Herved øges konsistensen, mens vand-cement forholdet og styrken fastholdes. Betonen bliver også dyrere, da cement er et dyrt delmateriale. Bemærk, at hvis der som i eksemplet tilsættes 10 liter vand og 20 kg cement, skal der ske en reduktion af et andet delmateriale, hvilket normalt sker ved at reducere mængden af fint tilslag (sand).

Beton i et højere sætmål er derfor dyrere at producere end beton med lavere sætmål, og der er derfor i prislister en tillægspris på at øge sætmålet.

Hvis betonen skal være selvkompakterende, SCC-beton, skal der anvendes et særligt tilsætningsstof, se afsnit 3.4 Tilsætningsstoffer.

### **Konsistensændring**

Betonens konsistens ændres med tiden.

Konsistensen er typisk højest lige efter blanding, hvorefter den falder med tiden og typisk er bearbejdeligheden væk - og betonen kan ikke udstøbes - efter nogle timer.

Typen af plastificerende tilsætningsstoffer kan påvirke denne konsistensændrings hastighed.

Ved brug af fabriksbeton ønskes ofte en langsom konsistensændring, mens der til elementproduktion som regel ønskes en hurtig konsistensændring, da betonen er udstøbt få minutter efter blandingen, og der ønskes en hurtig afbinding og hærdning, så der kan afforskalles hurtigt.

Det er derfor vigtigt, at entreprenøren specificerer sit ønske til konsistensændringens tidsforløb.

I praksis er det konsistensen på pladsen, der er afgørende, hvorfor betonen umiddelbart efter blanding har en højere konsistens. Hvis der fx ønskes et sætmål på 120 mm på pladsen, vil sætmålet umiddelbart efter blanding være fx 140 mm - noget afhængigt af kørefasthed, temperatur mv.

### **Luftindholdsændring**

Producenten skal specificere luftindholdsændringen, hvilke primært har til formål at bevise overfor brugeren, at luftindholdet ikke forsvinder, inden betonen er udstøbt.

Producenten skal vælge sit luftindblandende tilsætningsstof med omhu, og via prøvestøbninger eftervise, at den indblandede luft ikke forsvinder under transporten af betonen.

I nogle tilfælde kræves det, at luftindholdet måles på pladsen - typisk ved at betonproducenten sender en laboratoriebil ud på pladsen med tilhørende laborant.

### **Varmeudvikling**

Cement udvikler varme ved hydratisering, hvorfor betonen også udvikler varme under hærdningen.

Denne varmeudvikling kan være meget gavnlige ved vinterstøbninger og meget skadelig ved sommerstøbninger eller støbninger i store tykkelser (typisk over 80 cm), hvorfor brugeren ofte har brug for at kende betonens varmeudvikling for at kunne regne på varmestigningen i betonen.

Beton med høje cementindhold udvikler mest varme, og cementernes varmeudvikling er også forskellige. Tilsætninger som flyveaske og kalkfiller nedsætter varmeudviklingen pr. m<sup>3</sup> beton, hvis de anvendes til at erstatte cement.

Der findes ikke pålidelige metoder til at estimere varmeudviklingen fra en given betonrecept, hvorfor varmeudviklingen måles ved prøvning af en mængde beton isoleret på passende vis efter gældende standarder.

### Styrkeudvikling

Betonens styrke (efter 28 døgn) er en brugsegenskab, der stilles krav til fra standarder og byherrens udbudsmateriale.

I mange tilfælde ønsker entreprenøren at kende styrkeudviklingen, for at kunne vurdere hvornår der fx kan afformes eller opspændes.

Hvis der ønskes en høj tidlig styrke, kan dette opnås ved at anvende en beton med en høj slutstyrke, men det vil oftest være mere økonomisk i stedet at ændre på betonsammensætningen ved dels at anvende en cement med høj styrke og hurtig styrkeudvikling, dels at undgå brug af tilsætninger som fx flyveaske.

### Efterbehandling

Efter udstøbning skal betonen efterbehandles, se afsnit 9.4.3 Udtørningsbeskyttelse.

Kravene til efterbehandling afhænger i starten af betonsammensætningen, fordi nyudstøbt beton med højt pulverindhold lettere udvikler plastiske svindrevner.

Entreprenøren kan derfor øge den periode, hvor betonen efter udstøbning ligger uafdækket, hvis betonsammensætningen foreskrives uden store mængder af tilsætninger som microsilica og flyveaske.

### Betonsammensætning tilpasset konstruktioner

Visse konstruktioner kræver særlige betoner med særlige egenskaber for at kunne udføres på en korrekt måde.

Dette spørgsmål er delvist løst ved, at der i branchen markedsføres betontyper egnede til specielle formål – ofte kaldet funktionsbetoner. Det omfatter blandt andet betoner benævnt:

- Sekant
- Gulvbeton
- Slidlagsbeton
- Anlægsbeton

- Kantstensbeton
- Fugebeton

Alle med navne, hvor anvendelsen fremgår. Herved lettes kommunikationen mellem køber og producent, og der findes veldokumenterede standardvarer til en række konstruktionstyper.

Nedenfor er gennemgået eksempler på betoner til specielle formål, og hvordan betonerne skal sammensættes.

## Gulve

Beton bruges meget til gulve, og kravene til betonsammensætningen afhænger meget af gulvets senere brug.

Her skal ses på to forskellige gulvtyper:

- Gulve, hvor betonen skal udgøre den endelige overflade
- Gulve, hvor der skal lægges en belægning oven på betonen

### *Gulve, hvor beton udgør den endelige overflade*

For sådanne gulve stilles typisk krav om en god slidstyrke i overfladen og også krav om en styret overfladegeometri.

Slidstyrkekravet af overfladen kræver en beton med passende styrke og tilslag, der ikke indeholder bløde og svage korn. Selv om gulve typisk befinder sig i indendørs miljø, skal der derfor vælges tilslag i god kvalitet.

Under udstøbning af gulvet vil lette korn og partikler søge op i mod gulvets overflade på grund af opdrift. Selv en mindre mængde lette korn og partikler i tilslaget kan derfor blive et problem.

Der vil derfor ofte være god økonomi i, at kræve en beton med høj klasse tilslag til en gulvstøbning.

Hvis gulvet skal udlægges med stor geometrisk præcision – fx til et højlag – anvendes ofte glitning efter udlægning. Beton med puzzolaner som kalkfiller, microsilica og flyveaske kan typisk ikke glittes, hvorfor entreprenøren skal stille krav om, at disse delmaterialer ikke indgår i betonsammensætningen

Samlet er en god gulvbeton derfor typisk en beton med gode tilslag og kun cement som bindemiddel. Det koster lidt ekstra i indkøb af betonen, men spares typisk hjem under udførelsen.

Selve betonens overflade skal ofte være meget geometrisk præcis med veldefinerede faldforhold (fx kuvertfald mod afløb i fødevarevirksomheder), Det kræver en beton med begrænset bearbejdighed, og SCC-beton kan normalt ikke anvendes. (Med omhu kan SCC-beton med flow på 550-570 nogle gange anvendes, hvis der efterfølgende

slibes). De fleste gulventreprenører foretrækker betoner med kun cement som bindemiddel og en begrænset mængde - eller ingen - tilsætningsstoffer.

I andre tilfælde ønskes en helt vandret overflade (fx til højlagre med truckkørsel) og her stilles samme krav til betonen.

Det skal pointeres, at SCC-beton ikke er egnet til at skabe en præcis geometrisk overflade, fordi SCC-betoner har tendens til at flyde lidt efter afretning. Det skal også pointeres, at SCC-betoner absolut ikke er selvnivellerende og derfor ikke i sig selv skaber en vandret overflade.

### ***Gulve, hvor der lægges belægning ovenpå betonen***

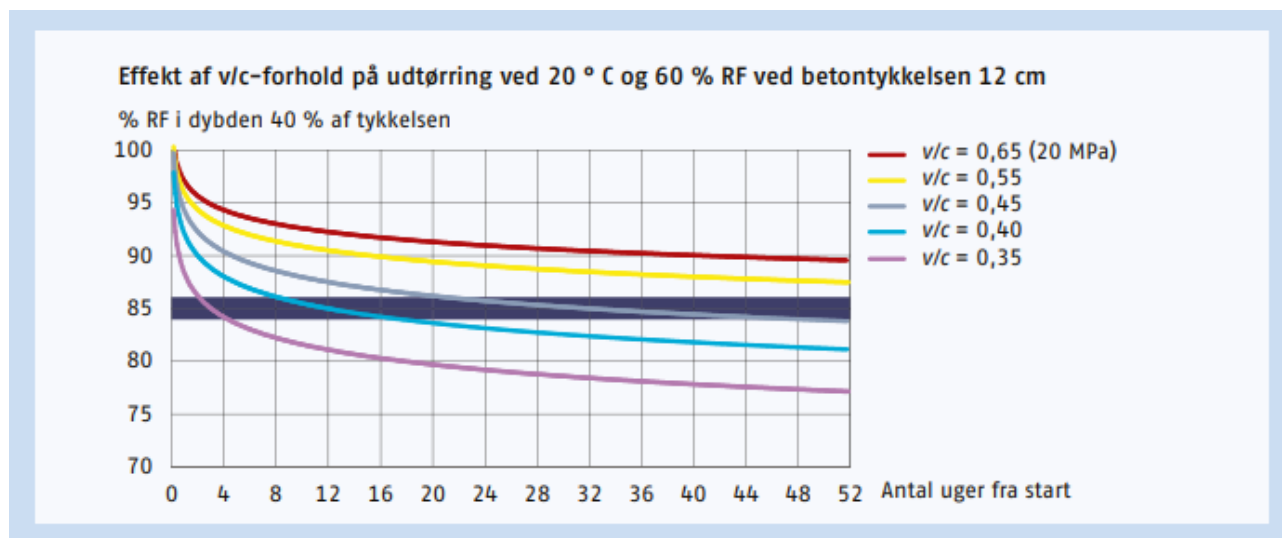
I nogle tilfælde lægges der en form for belægning ovenpå et betongulv. Det kan fx være et betonslidlag, fliser, linoleum, vinyl eller trægulv.

En del af de ovenstående særlige krav kan som regel frafaldes – fx kan en SCC-beton udmærket anvendes under et trægulv på strøer.

I mange tilfælde ønskes dog betonens fugtindhold styret, fordi en "våd" beton kan skabe problemer med den overliggende belægning – lige fra skimmelsvamp til fugtbevægelser i træ.

Betons fugtindhold består typisk af den vandmængde betonen indeholder udover den til cementens hydratisering nødvendige mængde. Betoner med høje vand-cement forhold indeholder betydelige mængder overskudsvand, der efter betonens hærkning kan tage uger eller måneder at få tørret ud.

Hvis man anvender en beton med et vand-cement forhold under ca. 0,40, vil alt vandet i betonen blive brugt til cementens hærkning, og betonen vil således være tør efter hærkning – det kaldes selvudtørrende beton.



Figur 2. Figuren viser udtørringens forløb som funktion af v/c forholdet. De 85 % RF er et normalt accept krav for tilstrækkelig tør beton. Figuren er fra [1], hvor den benævnes figur 3. Bemærk, at det i figurteksten her angives, at det er beregnede værdier, der ikke er verificeret i praksis.

Hvis vand-cement forholdet sættes endnu lavere – fx til 0,30 – kan selvudtørring opnås på få dage, hvad der kan være vigtigt for hurtig fremdrift på byggepladsen. Betoner med vand-cement forhold på 0,30 er dog vanskelige at arbejde med, og kan have øget tendens til at revne.

### Glidestøbning

Beton til glidestøbning – se afsnit 9.2 Form– skal have en relativ hurtig og veldefineret afbindingstid og styrkeudvikling, således at betonen kan bære, når formen forlader betonen på vej opad.

På Storebælts Vestbro, hvor sænkekasserne blev gledet, var betonens krævede lave vand-cement forhold opnået med brug af store mængder plastificerende tilsætningsstoffer, hvilket skabte problemer med for lange afbindingstider, og betonen var i flere tilfælde ikke bundet af, når formen var gledet forbi.

De fleste glidestøbninger foretages – blandt andet herfor – med betoner uden tilsætningsstoffer (fx uden flyveaske). Herved opnås korte afbindingstider og derfor også en lav (kort) form. Den præcise afbindingstid kan styres med acceleratorer eller retardere – se afsnit 3.4 Tilsætningsstoffer.

### Referencer

- [1] **Selvudtørrende beton** - til gavn for byggeriet, Anvendelse, specifikation, udførelse og baggrund, FABRIKSBETONGRUPPEN under Dansk Byggeri, December 2013.