

TEKNISK RAPPORT 146/86

LABORATORIET FOR  
BYGNINGSMATERIALER

# BETON I HENHOLD TIL DS 411-84

2. UDGAVE

*TORBEN C. HANSEN*



TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
BUILDING MATERIALS LABORATORY

BETON I HENHOLD TIL DS 411-84

Torben C. Hansen

Laboratoriet for Bygningsmaterialer  
Danmarks tekniske Højskole

Januar 1985

#### FORORD

Det foreliggende kompendium er udarbejdet til brug ved Dth's Laboratorium for Bygningsmaterialers grundkursus nr. 6101. Der er af tidsmæssige grunde kun afsat et begrænset antal timer til behandling af beton i grundkurset. Derfor er kompendiet begrænset til at omfatte det mindstemål af viden, som en bygningsingeniør må besidde for at kunne fungere som rådgivende, udførende eller tilsynsførende på betonområdet, d.v.s. kravformulering, betonproportionering og betonkontrol i henhold til DS 411. En mere udførlig behandling af betontechnologien tilbydes i kursus 6103, Betontechnologi.

Der henvises i kompendiet ofte til Dansk Ingeniørforenings Norm for Betonkonstruktioner, DS 411, og til standardbladene vedrørende prøvningsmetoder for frisk og hærdnet beton, DS 423. Der henvises også til Dansk Ingeniørforenings Norm for Sand-, Grus- og Stenmaterialer, DS 401, med tilhørende nomenklatur, og til standardbladene vedrørende prøvningsmetoder for sand-, grus- og stenmaterialer, DS 405. Det forudsættes, at de studerende gør sig bekendt med indholdet af disse dokumenter.

For at få det fulde udbytte af kompendiet anbefales de studerende samtidig med kursus 6101 at følge laboratoriekursus nr. 6121.

Alle betonstyrker i kompendiet angivet i enheden MPa. Det bringes i erindring, at  $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MN/m}^2$ .

INDHOLDSFORTEGNELSE

	<u>Side</u>
1. INDLEDNING .....	10
1.1 Betonens placering i materiallæren .....	10
1.2 Hvad er beton? .....	10
1.3 Fordeling af betonteknologisk ansvar og arbejdsopgaver mellem projekterende, udførende og tilsynsførende .....	14
1.4 Normer og bestemmelser .....	15
1.5 Betonlaboratoriet .....	17
2. FORMULERING AF KRAV TIL BETON .....	17
2.1 Alment .....	17
2.2 Formulering af krav til beton efter DS 411 .....	19
2.2.1 Styrkekrav .....	20
2.2.2 Miljøklasser .....	21
2.2.3 Kontrolklasser .....	25
2.2.4 Største tilladelige stenstørrelse .....	27
2.2.5 Tilsætningsstoffer .....	31
2.2.6 Konsistens .....	32
2.2.7 Særlige krav .....	32
2.2.7.1 Svind .....	32
2.2.7.2 Elasticitet .....	34
2.2.7.3 Krybning .....	35
2.2.8 Huskeliste ved formulering af krav til beton i arbejdsbeskrivelser .....	36
2.2.9 Huskeliste ved bestilling af fabriksbeton .....	39
3. VALG AF RÅMATERIALER OG BETONPROPORTIONERING .....	40
3.1 Alment .....	40
3.2 Betons konsistens .....	44
3.2.1 Målemetoder .....	44
3.2.2 Vandindhold .....	44
3.2.3 Tilslagets kornstørrelsesfordeling og kornform .....	45

	<u>Side</u>
3.2.3.1 Regneeksempel nr. 1 Beregning af kornkurver .....	46
3.2.3.2 Stenmaterialets kornstørrelsesfordeling ....	50
3.2.3.3 Regneeksempel nr. 2 Sammensætning af tre velafgrænsede stenfraktioner i foreskrevne blandingsforhold ..	60
3.2.3.4 Regneeksempel nr. 3 Sammensætning af tre eller flere mere eller mindre tilfældigt graderede sand- eller stenfraktioner til et betontilslag med ønsket gradering .....	62
3.2.3.5 Stenmaterialets kornform .....	64
3.2.3.6 Sandets kornstørrelsesfordeling .....	65
3.2.3.7 Filler .....	68
3.2.3.8 Regneeksempel nr. 4 Fremstilling af betonsand med gradering inden for en af BS zonerne ved blanding af groft og fint sand .....	71
3.2.3.9 Blandingsforholdet mellem sand og sten (sandprocenten) .....	74
3.2.3.10 Regneeksempel nr. 5 Korrektion for under- og overkorn .....	78
3.2.3.11 Regneeksempel nr. 6 Sammensætning af sand og sten til et velgraderet betontilslagsmateriale .....	79
3.2.4 Tilsætningsstoffers betydning for betons konsistens ..	81
3.3 Betons holdbarhed .....	84
3.3.1 Miljømæssigt betingede krav til betonens sammensætning .....	85
3.3.2 Miljømæssigt betingede krav til dæklagets tykkelse ...	88
3.3.3 Valg af cementtype under hensyntagen til betons holdbarhed .....	88
3.3.4 Valg af tilslag under hensyntagen til betons holdbarhed .....	94
3.3.4.1 Kemisk ustabil tilslag .....	95
3.3.4.2 Fysisk ustabil tilslag .....	101
3.3.4.3 Formulering af krav til tilslagsmaterialers holdbarhed i danske normer og bestemmelser .	105
3.3.4.4 Klassifikation af stenmaterialer til betonfremstilling .....	106
3.3.4.5 Klassifikation af sand til betonfremstilling .....	107
3.3.5 Valg af tilsætningsstoffer under hensyntagen til betons holdbarhed .....	108



	<u>Side</u>
3.4 Betons styrke .....	110
3.4.1 Betons lagringsforhold og alder ved prøvning .....	110
3.4.2 Valg af cementtype under hensyntagen til betons styrke .....	111
3.4.3 Valg af tilslagsmaterialer under hensyntagen til betons styrke .....	112
3.4.4 Valg af tilsætningsstoffer under hensyntagen til betons styrke .....	112
3.4.5 Sammenhæng mellem betons trykstyrke og vand-cement forhold .....	115
3.4.6 Variationer i betons styrke .....	116
3.4.7 Statistisk fordeling af styrkeresultater .....	117
3.5 Proportionering af almindelig beton .....	119
3.5.1 Beregning af betonens proportioneringsstyrke og godkendelse af beton i henhold til DS 411 .....	119
3.5.2 Opdeling af en konstruktion i kontrolafsnit og fastlæggelse af antallet prøver pr. kontrolafsnit .....	120
3.5.3 Beregning af $k_p$ -værdier for godkendelse af beton .....	124
3.5.4 Bestemmelse af variationskoefficient for godkendelse af beton .....	127
3.5.4.1 Fastlæggelse af variationskoefficient <u>uden</u> dokumentation (Princip A) .....	127
3.5.4.2 Bestemmelse af variationskoefficient <u>med</u> dokumentation (Princip B) .....	128
3.5.4.3 Regneeksempel nr. 7 Dokumentation af variationskoefficient for en betonproduktion .....	129
3.5.5 Beregning af betons proportioneringsstyrke .....	131
3.5.6 Regneeksempel nr. 8 Beregning af proportioneringsstyrken for en beton .....	134
3.5.7 Fastlæggelse af betonens vand-cement forhold .....	135
3.5.8. Fastlæggelse af betonens konsistens .....	136
3.5.9 Fastlæggelse af største tilladelige stenstørrelse .....	136
3.5.10 Fastlæggelse af betonens vandbehov .....	137
3.5.11 Beregning af betonens cementindhold .....	139
3.5.12 Fastlæggelse af betonens sandprocent .....	140
3.5.13 Beregning af det samlede tilslagsmateriales korn- densitet .....	141
3.5.14 Beregning af betonens indhold af tilslagsmaterialer ..	141

	<u>Side</u>
3.5.14.1 Generelt .....	141
3.5.14.2 Regneeksempel nr. 9 Beregning af betonens indhold af tilslags- materialer .....	143
3.5.15 Betonens blandingsforhold efter vægt .....	143
3.5.16 Betonens blandingsforhold efter volumen .....	144
3.5.16.1 Generelt .....	144
3.5.16.2 Regneeksempel nr. 10 Beregning af betons blanderecept efter vo- lumen, når blanderecepten efter vægt er kendt .....	148
3.5.17 Justering af betonens blandingsforhold med hensyn til aktuelt vandindhold i sand og sten .....	149
3.5.18 Regneeksempel nr. 11 Proportionering af almindelig beton .....	150
3.5.18.1 Forudsætninger .....	150
3.5.18.2 Fastlæggelse af variationskoefficienterne, $\delta_g$ og $\delta_p$ .....	152
3.5.18.3 Beregning af betonens godkendelsesstyrke, $f_{cg}$ .....	152
3.5.18.4 Beregning af betonens proportionerings- styrke, $f_{cp}$ .....	153
3.5.18.5 Fastlæggelse af betonens frie vand-cement forhold .....	154
3.5.18.6 Fastlæggelse af betonens frie vandbehov ..	154
3.5.18.7 Beregning af betonens cementindhold .....	155
3.5.18.8 Skøn af reel og beregning af betonens til- syneladende sandprocent .....	155
3.5.18.9 Beregning af det samlede tilslagsmateriales densitet .....	156
3.5.18.10 Beregning af betonens samlede indhold af tilslagsmaterialer .....	157
3.5.18.11 Beregning af betonens indhold af sand og sten .....	157
3.5.18.12 Beregning af blandingsforhold efter vægt ..	158
3.5.18.13 Justering af betonens blanderecept med hensyn til tilslagetets aktuelle vandind- hold .....	159
3.5.18.14 Proportioneringsskema udfyldt for alminde- lig beton .....	160
3.6 Proportionering af beton med indblandet luft .....	164
3.6.1 Luftens betydning for betonens frostbestandighed .....	164
3.6.2 Luftens betydning for betonens styrke .....	166
3.6.3 Luftens betydning for betonens konsistens og bearbej- delighed .....	166

	<u>Side</u>
3.6.4	Luftens betydning for frisk betons densitet ..... 167
3.6.5	Ændringer i proceduren for proportionering af almindelig beton under hensyntagen til luftindblanding ..... 167
3.6.6	Regneeksempel nr. 12 Proportionering af luftindblandet beton ..... 168
3.6.6.1	Forudsætninger ..... 168
3.6.6.2	Beregning af betonens godkendelsesstyrke, $f_{cg}$ ..... 170
3.6.6.3	Beregning af betonens proportioneringsstyrke, $f_{cp}$ ..... 170
3.6.6.4	Beregning af betonens fiktive proportioneringsstyrke, $f'_{cp}(\text{luft})$ ..... 171
3.6.6.5	Fastlæggelse af betonens frie vand-cement forhold ..... 171
3.6.6.6	Fastlæggelse af betonens frie vandbehov ... 172
3.6.6.7	Beregning af betonens cementindhold ..... 172
3.6.6.8	Skøn af reel og beregning af tilsyneladende sandprocent ..... 172
3.6.6.9	Beregning af det samlede tilslagsmateriales densitet ..... 173
3.6.6.10	Beregning af betonens samlede indhold af tilslagsmaterialer ..... 173
3.6.6.11	Beregning af betonens indhold af sand og sten ..... 174
3.6.6.12	Betonens blandingsforhold efter vægt ..... 174
3.6.6.13	Proportioneringsskema udfyldt for luftindblandet beton ..... 176
4.	FORPRØVNING ..... 179
4.1	Forprøvning af delmaterialer ..... 179
4.1.1	Grus (sand og sten) ..... 179
4.1.2	Vand ..... 181
4.1.3	Tilsætningsstoffer ..... 181
4.2	Undersøgelse og justering af vægt-, doserings- og blandeanlæg ..... 181
4.3	Prøvestøbninger ..... 182
4.3.1	Generelt ..... 182
4.3.2	Satsvægte for prøveblandinger ..... 185
4.3.3	Korrektion af satsvægte for tilslagets virkelige fugtindhold ..... 186
4.3.4	Fremstilling af prøveblandinger ..... 186

	<u>Side</u>
4.4	Bedømmelse af prøveblandinger og justering af blandingsforhold ..... 187
4.4.1	Prøvning af den friske betons konsistens ..... 188
4.4.1.1	Sætmål ..... 189
4.4.1.2	Vejemål ..... 190
4.4.1.3	Udbredelsesmål ..... 191
4.4.1.4	Justering af betonens blandingsforhold på grundlag af konsistensmåling af prøveblandinger ..... 191
4.4.2	Prøvning af den friske betons luftindhold ..... 192
4.4.3	Prøvning af den friske betons densitet ..... 193
4.4.4	Prøvning af den hærdnede betons trykstyrke ..... 194
4.4.4.1	Fremstilling og standard-lagring ved 20° C af betoncylindre ..... 194
4.4.4.2	Fremstilling og accelereret hærdning af betoncylindre ..... 195
4.4.4.3	Trykprøvning af betoncylindre ..... 195
4.4.4.4	Justering af betons blanderecept på grundlag af styrkeresultater fra prøveblandinger ..... 196
4.4.5	Vurdering af den friske betons sandprocent ..... 197
4.4.6	Vurdering af den friske betons bearbejdelighed ..... 201
4.4.7	Vurdering af den friske betons vandseparation ..... 203
4.4.8	Vurdering af den friske betons kohesion og tilbøjelighed til afblanding af sten ..... 206
4.4.8.1	Indre afblanding ..... 207
4.4.8.2	Ydre afblanding ..... 209
4.4.9	Vurdering af visse tilsætningsstoffers indvirkning på den friske betons bearbejdelighed og den hærdnede betons frostbestandighed ..... 209
4.4.9.1	Luftindblandende tilsætningsstoffer ..... 209
4.4.9.2	Plastificerende tilsætningsstoffer ..... 211
4.4.10	Prøvning af den friske betons vand-cement forhold, cementindhold og fillerindhold ..... 212
5.	MODTAGE- OG PROCESKONTROL AF BETON ..... 213
5.1	Modtagekontrol ..... 214
5.1.0	Generelt ..... 214
5.1.1	Betonlaboratoriets indretning og udstyr ..... 218
5.1.2	Kontrol af cement ..... 220
5.1.3	Kontrol af grus (sand og sten) ..... 221

	<u>Side</u>
5.1.4	Kontrol af vand ..... 221
5.1.5	Afmåling og blanding ..... 222
5.1.6	Kontrol af frisk beton ..... 222
5.1.6.1	Kontrol af vand-cement forhold, cementindhold og fillerindhold ..... 222
5.1.6.2	Kontrol af konsistens ..... 223
5.1.6.3	Kontrol af luftporeindhold ..... 223
5.1.6.4	Kontrol af urenheder (klorider) ..... 223
5.1.7	Kontrol af hårdnet betons styrke i henhold til DS 411 ..... 223
5.1.7.1	Generelt ..... 223
5.1.7.2	Kontrol af betonstyrker i henhold til princip A (udokumenteret variationskoefficient) ..... 224
5.1.7.3	Kontrol af betonstyrker i henhold til princip B (dokumenteret variationskoefficient) ..... 226
5.1.7.4	Udeladelse af observationer ..... 229
5.1.7.5	Regneeksempel nr. 13 Styrkegodkendelse af beton i henhold til princip B ..... 230
5.1.7.6	Regneeksempel nr. 14 Styrkegodkendelse af beton i henhold til princip A ..... 233
5.1.8	Procedurer i tilfælde, hvor betoner ikke opfylder normens krav ..... 235
5.1.9	Vurdering af betonens kvalitet i færdige konstruktioner ..... 239
5.1.9.1	Prøvning med ultralyd ..... 239
5.1.9.2	Prøvning med slaghammer ..... 240
5.1.9.3	Prøvning med lok-test og capo-test ..... 241
5.1.9.4	Prøvning af udborede cylindre ..... 242
5.1.9.5	Prøvebelastning af konstruktioner ..... 242
5.1.10	Kontrol af hærdningens tidsforløb ..... 243
5.1.11	Kontrol med udstøbning og efterbehandling ..... 244
5.2	Proceskontrol ..... 245
6.	BETONARBEJDETS UDFØRELSE ..... 246
6.1	Materialernes levering og opbevaring ..... 246
6.2	Støbeskel ..... 246
6.3	Støbeprogram ..... 247

	<u>Side</u>
6.4	Materiel ..... 247
6.5	Klargøring af form og armering ..... 248
6.6	Afmåling af delmaterialer ..... 248
6.7	Blanding ..... 249
6.8	Transport ..... 249
6.9	Udstøbning, komprimering og afformning ..... 250
6.10	Overfladebehandling ..... 252
6.10.1	Afrevne overflader ..... 252
6.10.2	Formstøbte overflader ..... 253
6.11	Efterbehandling i hærdningsperioden ..... 255
6.12	Synlige fejl ..... 256
6.13	Skjulte fejl ..... 257
6.14	Vejrligsforanstaltninger ..... 257
6.14.1	Generelle ..... 257
6.14.2	Vinterforanstaltninger ..... 259
6.14.3	Hårdestyring ..... 261
FIGURER	..... 264
NØGLE TIL FORMLER	..... 310
NØGLE TIL TABELLER	..... 311
NØGLE TIL FIGURER	..... 312

## 1. INDLEDNING

### 1.1 Betonens placering i materiallæren

Beton og stål er de to vigtigste konstruktionsmaterialer. Da det som regel er mest økonomisk at lade stål optage trækspændinger og beton trykspændinger, supplerer de to materialer i visse tilfælde hinanden, som for eksempel i jernbeton. I andre tilfælde konkurrerer de med hinanden, således at konstruktioner af samme type og med samme funktion kan fremstilles af begge materialer.

Der er imidlertid en væsentlig forskel mellem de forhold, under hvilke de to materialer fremstilles, som er helt afgørende for den måde, på hvilken de behandles i bygningsmateriallæren.

Stål fremstilles i store industrielle anlæg under velkontrollerede forhold, og leverandøren garanterer inden for snævre grænser materialets egenskaber på grundlag af laboratorieprøvning. Disse egenskaber deklarerer i form af et certifikat, der medfølger enhver større stålleverance. Bygningsingeniøren har ingen indflydelse på, og intet ansvar for, udvælgelsen af råmaterialer eller fremstilling af stålet.

Bygningsingeniøren bærer derimod i mange tilfælde hele ansvaret for betonen. Ansvaret omfatter både valg af råmaterialer og fremstilling af frisk såvel som hærdnet beton. Det er derfor naturligt, at betontechnologien optager en forholdsvis stor del af bygningsmateriallæren, og at betonen behandles mere indgående, og på en anden måde end stål og andre materialer.

### 1.2 Hvad er beton?

Frisk beton er en blanding af 75-80 vægtprocent af et vilkårligt sand- og stenmateriale, et såkaldt tilslagsmateriale, som naturen tilfældigt har anbragt inden for en rimelig transportafstand fra byggepladsen, med 20-25 vægtprocent cement og vand. Dertil kommer kemiske tilsætningsstoffer i større eller mindre mængder, såsom accelerators og luftindblandende, plastificerende eller retarderende tilsætningsstoffer, og i mange tilfælde mineralske tilsætningsstoffer som flyveaske og mikrosilica.

Når denne blanding udstøbes i en form, for hvilket bygningsingeniøren iøvrigt også bærer ansvaret, og når massen får lov at henligge uforstyrret, stivner den efter nogle timer. Såfremt den stivnede masse lagres uforstyrret i nogen tid, således at den forhindres i at tørre ud under lagringen, hærdner cementen ved en kemisk reaktion med vand til en lim, nemlig den såkaldte hærdnede cementpasta, der binder sand og sten (tilslaget) sammen til en fast, homogen masse. Massen er meget tungt opløselig i vand og har veldefinerede styrke- og deformations-egenskaber. Både den hærdnede betons opløselighed, der er af betydning for dens vejrbestandighed, og dens mekaniske egenskaber er afhængige af tilslagets kvalitet, proportionerne mellem sand, sten, cement og vand, og ikke mindst lagringsforholdene i de første uger efter udstøbningen. Alt andet lige vil en beton, som fremstilles af et kemisk og fysisk stabilt, tæt og stærkt, velgraderet tilslag og med et lavt vægtforhold mellem vand og cement, og som er fugtigt lagret i de første uger efter udstøbningen ved temperaturer mellem 20° C og 30° C, være mange gange stærkere og stivere, og desuden væsentligt mere vejrbestandig end beton, der fremstilles med kemisk eller fysisk ustabil, porøst, svagt og dårligt graderet tilslag, højt vand-cement forhold, og som lagres tørt under ukontrollerede forhold.

Allerede på dette tidspunkt kan vi altså konstatere, at de vigtigste betingelser for fremstilling af god beton er et omhyggeligt valg af sand- og stenmateriale, en omhyggelig oparbejdning af dette råmateriale til et velgraderet tilslag, et lavt vand-cement forhold, en omsorgsfuld komprimering og en omhyggelig fugtig lagring af betonen ved en rimelig temperatur i nogle uger, før den udsættes for vejr og vind eller mekanisk påvirkning. Når der opstår problemer med beton, vil det altid kunne konstateres, at man har forsyndet sig mod en eller flere af disse elementære regler for fremstilling af god beton.

Som det er tilfældet for ståls vedkommende, fremstilles en enkelt af de i betonen indgående komponenter, nemlig Portland cementen, også i store industrielle anlæg under velkontrollerede forhold, og bygningsingeniøren har intet ansvar, hverken for udvælgelsen af råmaterialer eller for fremstilling af cementen.



Den vigtigste komponent i en moderne cementfabrik er en rotérovn, i hvilken en flydende eller tør blanding af finmalet kalksten og ler brændes; det vil sige opvarmes til ca. 1500° C. Ved brændingen sintres blandingen til cementklinker, der ligner småsten. Disse klinker finmales i en kuglemølle under tilsætning af en mindre mængde gips, som regulerer afbindings-tiden. Kvaliteten af det resulterende pulver, Portland cementen, der enten leveres til betonblandestationen i sække à 50 kg eller i løst mål i tankvogne, garanteres af fabrikanten at leve op til kvalitetskravene i Dansk Standard for Portland cement, DS 427, eller anden relevant standard. På forlangende skal der udleveres certifikat på større cementleverancer i lighed med, hvad der kræves for stålleverancer.

Forudsat at den projekterende ingeniør har valgt den rette type cement, under hensyntagen til forholdene på byggepladsen og de påvirkninger, som konstruktionen senere vil blive udsat for, giver cementen sjældent anledning til problemer. Men det er beton, ikke cement, der er bygningsmaterialet, og betonens kvalitet er afhængig af mange andre faktorer. For det første kvaliteten af de benyttede sand- og stenmaterialer; for det andet blandingsforholdene mellem sand, sten, cement og vand, samt eventuelle tilsætningsstoffer; for det tredje arbejdets håndværksmæssige udførelse, herunder betonens hærkning.

I modsætning til hvad der er tilfældet for ståls og andre bygningsmaterialers vedkommende, bærer bygningsingeniøren som nævnt i mange tilfælde ansvaret for hele fremstillingsprocessen. Ansvarer er mest omfattende, når betonen fremstilles på byggepladsen, og mindre omfattende når der leveres beton fra en fabrik, der er tilsluttet Dansk Fabriksbetonkontrol.

Det faktum, at man i det meste af den industrialiserede verden køber sit tilslagsmateriale fra industriforetagender, der er specialiserede i at udvinde og oparbejde sand og grus, og det faktum, at man i samme dele af verden ofte køber sin beton færdigblandet fra en betonfabrik, eller at man til og med køber sine komponenter færdige fra en betonvare- eller betonelementfabrik, fritager imidlertid hverken juridisk eller moralsk bygningsingeniøren for ansvaret over for bygherren, hvis betonen i den færdige konstruktion deformeres eller styrter ned på grund af for lav stivhed eller styrke, eller hvis den går i opløsning under påvirkning af vejr og vind.

Det i de senere år stigende antal skader på danske og udenlandske betonkonstruktioner er i væsentlig grad en følge af, at bygningsingeniøren har fralagt sig ansvaret for betonen, efterhånden som produktionen er blevet industrialiseret.

Det er grundkursets vigtigste formål at gøre de bygningsingeniørstuderende bekendt med de mest grundlæggende principper for fremstilling af god beton og de problemer, der er forbundet med en sådan fremstilling. Det gælder kravformulering, prøvning og valg af råmaterialer, betonproportionering og vurdering af prøveblandinger, prøvning af beton og kvalitetskontrol.

Der skelnes i kompendiet mellem pladsfremstillet beton og fabriksbeton. Som det fremgår af betegnelsen, er pladsfremstillet beton en beton, til hvilken cement og tilslagsmaterialer leveres til byggepladsen, og som fremstilles på byggepladsen. Bygningsingeniøren bærer det fulde ansvar for pladsfremstillet beton lige fra kravformulering, over valg og prøvning af råmaterialer, til fremstilling, udstøbning, komprimering, efterbehandling og prøvning af betonen. Ved brug af pladsfremstillet beton skal der indrettes et laboratorium på byggepladsen. Ved anvendelse af fabriksbeton kan efter særlig aftale kontrollen med betonens delmaterialer og med selve betonen helt eller delvis baseres på resultater fra fabrikkens løbende kvalitetskontrol, såfremt denne er tilrettelagt og udføres i overensstemmelse med principperne i DS 411, og såfremt fabrikken er tilsluttet en anerkendt kontrolordning. For tiden er Dansk Fabriksbetonkontrol den eneste officielt anerkendte kontrolordning. Hvis man ønsker at udnytte de fordele, der er forbundet med at bruge fabriksbeton, skal man derfor sikre sig, at den leverende fabrik er tilsluttet Dansk Fabriksbetonkontrol. Hvis dette ikke er tilfældet, skal den leverede beton betragtes og kontrolleres som pladsfremstillet beton. Ved brug af fabriksbeton bærer bygningsingeniøren stadig ansvaret for korrekt kravformulering og for kontrol med, at den beton, der modtages på pladsen, er i overensstemmelse med bestillingen. Uanset om der bruges pladsfremstillet beton eller fabriksbeton, bærer bygningsingeniøren naturligvis ansvaret for udstøbning og efterbehandling.

### 1.3 Fordeling af betonteknologisk ansvar og arbejdsopgaver mellem projekterende, udførende og tilsynsførende

Med hensyn til udarbejdelse af specifikationer, udførelse af betonarbejdet og kontrol af slutproduktet foreligger der en klar opdeling af arbejdsopgaver og ansvar mellem projekterende, udførende og tilsynsførende. Denne ansvarsfordeling ligger til grund for opdelingen af kompendiet. Afsnit 2 behandler således hovedsagelig problemer af interesse for den projekterende ingeniør, som skal udarbejde specifikationer for betonbyggeri. Afsnittene 3, 4, 5 og 6 behandler hovedsagelig problemer af interesse for den udførende og tilsynsførende, som skal udvælge og godkende råmaterialer og tilrettelægge og kontrollere betonproduktionen.

Det er den projekterende ingeniørs primære opgave og ansvar i arbejdsbeskrivelserne for et betonbyggeri at formulere de tekniske krav til betonen, der skal opfyldes, for at hver enkelt konstruktionsdel kan fungere efter hensigten. Det vil sige, at den projekterende ingeniør entydigt må foreskrive hvilke egenskaber, han kræver af råmaterialerne og af den hærtnede, og eventuelt også af den friske beton. Derimod bør den projekterende afholde sig fra at foreskrive, hvorledes disse egenskaber skal opnås.

Det er den udførendes, d.v.s. entreprenørens, opgave og ansvar at vælge et sådant fysisk og kemisk stabilt sand- og stenmateriale, der tilsikrer fremstilling af en beton med sådanne egenskaber, at de specificerede krav opfyldes. Det er også entreprenørens ansvar, at sand- og stenmaterialet oparbejdes, d.v.s. at det knuses, vaskes, sigtes og sammensættes således, at der af dette tilslag kan fremstilles en velbearbejdet og sammenhængende beton af ensartet kvalitet.

Det er ligeledes entreprenørens opgave at proportionere betonen, d.v.s. at fastlægge mængdeforholdene mellem sten og sand, cement og vand således, at både den friske og den hærtnede beton opfylder den projekterendes krav.

Det er endvidere entreprenørens opgave at sikre, at delmaterialerne afmåles korrekt, og at betonen blandes, transporteres, støbes, komprimeres, overfladebehandles og hærtnes på håndværksmæssig forsvarlig måde, således at den hærtnede beton reelt opfylder de krav, som den projekterende har stillet.

Endelig er det entreprenørens opgave ved prøvning at eftervise, at den hærtnede beton virkelig har opnået de foreskrevne egenskaber.

Det er i entreprenørens egen interesse ved fornuftigt valg af materialer, korrekt betonproportionering og omhyggelig arbejdsudførelse og prøvning at løse disse opgaver på den mest økonomiske måde.

Det er den tilsynsførendes ansvar og opgave at gennemføre det kontrolprogram, der kræves ifølge DS 411 for den kontrolklasse, som den projekterende har foreskrevet, samt at vurdere de enkelte resultater og godkende eller forkaste råmaterialer, arbejdsmetoder, og den friske såvel som den hærtnede beton.

Vi skal i de følgende afsnit diskutere det nærmere indhold af de enkelte arbejdsopgaver. For at løse opgaverne har bygningsingeniøren brug for to hjælpemidler. For det første de på stedet gældende normer og standardblade for beton og for de råmaterialer, der medgår ved betonfremstillingen; for det andet et velfungerende betonlaboratorium.

### 1.4 Normer og bestemmelser

Bygningsingeniørens første hjælpemiddel er de gældende normer for beton såvel som for de råmaterialer, der medgår ved fremstillingen af beton. Normerne suppleres som regel af en samling standardblade, som i detaljer redegør for de prøvemethoder, der skal anvendes. Kravene i normer og standardblade varierer fra land til land, beroende på de klimatiske forhold og det tekniske niveau, på hvilket de enkelte lande befinder sig. Normkravene suppleres ofte af yderligere krav, som er formuleret i arbejdsbeskrivelserne for det pågældende betonarbejde.

I Danmark er kravene til tilslagsmaterialer defineret i Dansk Ingeniørforening (DIF) norm for sand-, grus- og stenmaterialer, DS 401, med tilhørende nomenklatur, DS 404. De til sand- og grusnormen svarende prøvningmetoder er beskrevet i de danske standardblade, DS 405. Kravene til betonen er defineret i DIF norm for betonkonstruktioner, DS 411. De til denne norm svarende prøvemethoder er beskrevet i standardbladene DS 423. Andre normer af interesse i denne forbindelse er DIF norm, DS 427, for Portland cement, og DIF anvisning i brug af tilsætningsstoffer til beton, NP 111 R.

I U.S.A. henhører betonnormen under American Concrete Institute (ACI), medens sand- og grusnormen og de dertil hørende standardblade henhører under American Society for Testing and Materials (ASTM). I Tyskland, Frankrig og England findes normer og standardblade som henholdsvis "DIN", "AFNOR" og "BS" publikationer.

For fuldstændighedens skyld skal de såkaldte Housing Laws, Building Laws, Building Bylaws, Building Codes, og herunder den danske Byggeslov og Boligministeriets Bygningsreglement sættes i deres rette juridiske og tekniske sammenhæng. Sådanne bestemmelser var oprindeligt politiske skabelser, som hovedsagelig havde til formål at forhindre slumbebyggelse i byer ved at fastlægge minimekrav, dækkende områder lige fra grundens udnyttelsesgrad til bygningers indretning, isolering og installationer. Dette har i mange lande ændret sig i tidens løb.

Den danske byggeslov danner nu det lovmæssige grundlag for alt byggeri i landet. Byggesloven angiver imidlertid kun en række hovedprincipper. De tekniske bestemmelser i loven er beskrevet mere detaljeret i Boligministeriets Bygningsreglement, som er landsdækkende, og som også har lovmæssig gyldighed.

Bygningsreglementet indeholder et generelt krav om, at bygningskonstruktioner skal kunne modstå de normalt forekommende statiske og dynamiske påvirkninger. Hvad angår beton til bærende konstruktioner, er dette udmøntet i et krav om, at betonen enten skal kontrolleres på byggepladsen i henhold til DS 411's bestemmelser, eller skal leveres fra en fabrik, der er tilsluttet en anerkendt kontrolordning som for eksempel Dansk Fabrikskontrol på de i DS 411 angivne vilkår. Hermed er DS 411 ophøjet fra at være en vejledning til at være en lov.

Da dette er et kompendium til brug for studerende ved Danmarks tekniske Højskole, bygger det naturligvis på DS 411. Læseren må imidlertid gøre sig klart, for det første at de danske normer bygger på danske erfaringer og kun dækker danske forhold med undtagelse af Grønland; for det andet at danske normer ikke nødvendigvis er bedre, mere fyldestgørende eller mere økonomiske at følge end fremmede normer; og for det tredje at der ofte kan være en økonomisk og teknisk fordel ved at følge en fremmed norm, hvor dette er tilladt.

## 1.5 Betonlaboratoriet

Bygningsingeniørens andet og uundværlige hjælpemiddel er et betonlaboratorium, i hvilket han kan bestemme egenskaberne hos de råmaterialer, som han af naturen og økonomien er henvist til at arbejde med. I betonlaboratoriet afprøver og justerer han også den betonblanding, som han måtte være kommet frem til ved den teoretiske proportionering ud fra idealiserede forudsætninger, således at både den friske og den hærdnede beton får de krævede egenskaber, når den fremstilles med de virkelige råmaterialer. Endelig fører han i laboratoriet løbende kontrol med produktionen, således at de kvalitetsmæssige variationer, der forekommer i alle råmaterialer, ikke får negativ indflydelse på den hærdnede betons egenskaber eller produktionsprocessens økonomi.

## 2. FORMULERING AF KRAV TIL BETON

### 2.1 Alment

Det er som nævnt den projekterendes primære opgave og ansvar at formulere de tekniske krav til betonen. Dette sker på grundlag af gældende normer og bestemmelser. Før de arbejdsopgaver, der er forbundet med at formulere arbejdsbeskrivelser for betonarbejder, diskuteres nærmere, skal der påpeges en begrænsning i den danske betonnorm, DS 411.

De generelle krav til beton ifølge DS 411 er udformet således, at der primært sigtes på at opnå en rimelig sikkerhed mod brud hos den færdige konstruktion. En betonkonstruktion skal dog også opfylde andre krav for at fungere tilfredsstillende. Der er tale om krav til konstruktionens deformationer (for eksempel maksimalt tilladelige elastiske deformationer, eller deformationer forårsaget af krybning, svind, temperaturvariationer m.v.), krav om tæthed og krav om holdbarhed. Det er den projekterendes opgave og ansvar i hvert enkelt tilfælde at bedømme, hvilke krav en betonkonstruktion skal opfylde, ud over kravet til sikkerhed mod brud, ligesom det må bedømmes, hvilke særlige foranstaltninger der skal træffes for at opfylde disse krav.

Kravene til beton kan formuleres på forskellige måder. Nogle er ulogiske og leder til modstrid, andre som de følgende to er logisk opbyggede og entydige i deres filosofi.

Enten kan den projekterende begrænse sig til at stille de krav til den hærtnede betons egenskaber, som skal opfyldes for, at konstruktionen kan fungere på en tilfredsstillende måde i hele dens forudsete levetid. Samtidig må den projekterende ingeniør dog entydigt foreskrive de kontrol- og prøvemethoder, der skal benyttes af tilsynet, for at den projekterende kan sikre sig, at de stillede krav virkelig er opfyldt. Man siger, at den projekterende opstiller et funktionskrav og kræver ydeevnen eftervist. Ifølge dette princip overlades det til den udførende at vælge de materialer og metoder, der på den mest økonomiske måde leder til fremstilling af en hærtnet beton, som opfylder de af den projekterende stillede krav. Den udførende bærer således det fulde ansvar for, at der fremstilles en beton af en kvalitet, som opfylder de stillede krav, medens den projekterende alene bærer ansvaret for, at der stilles de nødvendige og tilstrækkelige krav. DS 411 og moderne betonnormer i de fleste industrialiserede lande bygger i vid udstrækning, men ikke udelukkende på funktionskrav og eftervisning af ydeevne.

Alternativet for den projekterende ingeniør er at specificere råmaterialer, betonens blandingsforhold og udførelsen af betonarbejdet i detaljer. Forudsat at betonen fremstilles som foreskrevet, og forudsat at betonarbejdet udføres som krævet, har den udførende i dette tilfælde intet ansvar for kvaliteten af det færdige produkt. Hele ansvaret påhviler den projekterende. Ældre betonnormer i de industrialiserede lande og normer i mange udviklingslande er opbygget efter sådanne receptbetonede principper, som man vil foretrække, hvis der kan herske tvivl om entreprenørens evner til på egen hånd at løse opgaverne.

I praksis er valget mellem de to principper ikke helt så enkelt. Kun såfremt den projekterende er helt overbevist om, at den udførende har tilstrækkelig teknisk viden og evne til at proportionere og fremstille en beton, der modsvarer de opstillede krav, og kun såfremt han har fuld tillid til den tilsynsførendes viden og evne til at udføre den krævede kontrol og bedømme resultaterne heraf, kan han basere sine specifikationer udelukkende på funktionskrav.

Jo større tvivl den projekterende har om den udførendes eller tilsynets viden og evner, desto mere må betonen og betonarbejdet specificeres i detaljer. Dette skisma afspejles også i de fleste praktiske arbejdsbeskrivelser, der i realiteten er opbygget som en blanding af de to principper. For eksempel kan en arbejdsbeskrivelse, som i princip bygger på funktionskrav, indeholde et krav om sulfatbestandighed hos betonen, og man vil ofte se dette generelle krav suppleret med et krav om brug af sulfatbestandig cement, hvilket er et krav til recepten. Eller en arbejdsbeskrivelse, som specificerer en blanderecept, kan indeholde en bestemmelse om, at tilslaget skal opfylde mindstekravene i en sand- og grusnorm som f.eks. DS 401, der er opbygget på grundlag af funktionskrav.

Dette er naturligvis både praktisk og tilladeligt, så længe man undgår at stille modstridende krav som f.eks. at specificere både materialer, blandingsforhold, vand-cement forhold og betonstyrke; eller at specificere materialer, blandingsforhold, vand-cement forhold og betonens konsistens. Man må gøre sig klart, at samtidige krav til på den ene side materialer, blandingsforhold og vand-cement forhold og på den anden side ydeevne ofte kan være uforenelige eller direkte modstridende og derfor kan give anledning til tvivl og tvister.

I det følgende skal vi diskutere de problemer, der kan opstå, når den projekterende skal formulere kravene til en beton efter DS 411.

## 2.2 Formulering af krav til beton efter DS 411

I henhold til DS 411 skal den projekterende formulere følgende krav til betonen:

- 1) Styrke
- 2) Miljøklasse (med deraf følgende krav til mindste tilladelige dæklagstykkelse, maksimalt tilladeligt vand-cement forhold og luftindblanding, samt eventuelt mindste tilladelige cement- og fillerindhold, cementtype og krav til vandtæthed, brug af særligt tilslag, samt eventuelt krav om brug af beskyttelsesmembraner).
- 3) Kontrolklasse
- 4) Største tilladelige stenstørrelse



- 5) Tilsætningsstoffer
- 6) Konsistens (kun hvis særlige forhold taler for det)
- 7) Særlige krav (f.eks. krav til forsinket afbinding af den friske beton, krav om slidstyrke, stivhed, eller vægt af den hærtnede beton, eller krav om maksimalt tilladelig varmeudvidelse, svind, elasticitet, krybning m.v.).

2.2.1 Styrkekrav

DS 411 opererer med tre kontrolklasser for betonarbejde; skærpet kontrol, normal kontrol og lempet kontrol. Problemer i forbindelse med valg af kontrolklasse behandles nærmere i afsnit 2.2.3. Betónens karakteristiske styrke skal foreskrives i alle tre kontrolklasser.

Trykstyrkeresultater fra betonprøvning følger en statistisk frekvensfunktion som vist på figur 2.1. Den beskrives ved middelse styrken  $E[f_c]$  og styrkespredningen  $D[f_c]$ . Disse to teoretiske størrelser kan vurderes ved prøvning af et endeligt antal prøvelegemer, en stikprøve eller en gruppe. Stikprøvegennemsnittet  $f_{cm}$  og stikprøvespredningen  $s$  vil ligge i nærheden af og give et skøn for  $E[f_c]$  og  $D[f_c]$ . Skønnet bliver desto bedre jo større stikprøven er. Det bemærkes, at  $f$  står for styrke, index  $c$  for tryk og index  $m$  for gennemsnit (mean).

Betonens variationskoefficient,  $\delta$ , er den relative spredning  $D[f_c]/E[f_c]$ .

I DS 411 er betonens karakteristiske trykstyrke defineret som den værdi, under hvilken 10% af trykstyrkeresultaterne ved uendeligt mange målinger befinder sig. Det betyder på figur 2.1, at 10% af arealet under kurven ligger til venstre for den lodrette streg, der er betegnet "den karakteristiske styrke". Den karakteristiske betontrykstyrke betegnes med symbolet  $f_{ck}$ . Her står bogstavet  $f$  for styrke,  $c$  for tryk og  $k$  for karakteristisk.

Den karakteristiske værdi af betonens trykstyrke skal altid foreskrives som et multiplum af 5 MPa. Den må ikke regnes større end 50 MPa i armeret beton og 25 MPa i uarmeret beton.

I forbindelse med lempet kontrol må der ikke regnes med større karakteristisk styrke end 25 MPa.

Endvidere må der for armeret beton af holdbarhedsmæssige grunde ikke foreskrives lavere karakteristiske trykstyrker end angivet i tabel 2.1.

Miljøklasse	Mindste værdi af foreskreven $f_{ck}$ (MPa)
Aggressiv	30
Moderat	25
Passiv	15

Tabel 2.1. Krav til mindste værdi af foreskreven karakteristisk trykstyrke for armeret beton i forskellige miljøklasser i henhold til DS 411-84.

Det må naturligvis overvejes i hvert enkelt tilfælde, hvilken betonkvalitet der skal foreskrives i forbindelse med en foreliggende konstruktion. Vejledende værdier er angivet i tabel 2.2 for en række typiske betonkonstruktioner.

2.2.2 Miljøklasser

Ved betons holdbarhed forstås en rimelig levetid (f.eks. 50 år), i hvilken konstruktionen eventuelt ved hjælp af almindelig vedligeholdelse kun udsættes for ubetydelig nedbrydning. Arten af de nedbrydningsmekanismer, der nedsætter betonens holdbarhed, afhænger af det omgivende miljø. De vigtigste nedbrydningsmekanismer er:

- Frostangreb
- Alkali-kiselreaktioner
- Armeringskorrosion
- Kemiske angreb

Tabel 2.2 Betonens anvendelse efter styrker og miljøklasser ("Beton - fra 1973-normen til 1984-normen". (Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor, Ålborg)

MILJØKLASSE	f <sub>ck</sub> FORESKREVEN KARAKTERISTISK TRYKSTYRKE MN/m <sup>2</sup>	v/c MAKSIMALT	KONSTRUKTIONSTYPE	LUFTINDBLANDING	SÆRLIGE KRAV TIL GRUS
Særlige foranstaltninger	40	0,40	Kørebaner Udendørs belægninger Fliser	+	+
Aggressiv miljøklasse	35	0,50	Funderingspæle	+	+
			Beholdere Gulve for svær færdsel (indendørs) Vægge og gulve udsat for vandtryk Ajlebeholdere Siloer for ensilage Svømmebassiner Konstruktioner i aggressivt miljø Broer Altaner	+	+
	30	0,50	Udendørs betondæk Havvandskonstruktioner Tunnelkonstruktioner Sluser Vandtæt beton Gulve, der udsættes for en del slid, herunder staldgulve	+	+
Moderat miljøklasse	25	0,60	Beholdere Tårne Tribuner Husbygningskonstruktioner Støttemure uden vandtryk, udendørs Stærke fundamenter Tage på bygninger Indendørs beton i stalde (bortset fra gulve)	+	+
Passiv miljøklasse	20*		Gulve for lettere færdsel Indendørs armeret beton Kældertrapper	+	+
Uarmeret beton (uden for miljøklassen)	15		Kældergulve uden vandtryk Indendørs beton Fundamenter i store bygninger Udstøbning i fundablokke	+	
	10		Alm. parcelhusfundament Klaplag - renselag		

For at sikre betons holdbarhed stiller DS 411-84 miljøafhængige krav til betonens sammensætning og dæklagets tykkelse over armeringen. Kravene knytter sig til tre miljøklasser, som er karakteriseret ved forskellige grader af aggressivitet, der er almindeligt forekommende i Danmark med undtagelse af Grønland.

Til passiv miljøklasse hører tør, ikke-aggressiv atmosfære, d.v.s. navnlig indendørs klima. I passiv miljøklasse skal betonen alene kunne sikre armeringen mod at korrodere i et tørt miljø uden kloridpåvirkning.

Til passiv miljøklasse henregnes konstruktioner i beskyttet miljø, det vil navnlig sige beton i lokaler uden høj luftfugtighed. Endvidere vil jorddækkede konstruktioner og jorddækkede fundamenter normalt kunne henføres til denne klasse.

Til moderat miljøklasse hører fugtig, ikke-aggressiv udendørs såvel som indendørs atmosfære, hvor de hårdest belastede områder er lodrette eller skrå flader udendørs, som udsættes for ferskvand og frost, men ikke for direkte vandtryk eller for saltpåvirkning. Ud over at opfylde kravene til beton i passiv miljøklasse skal beton i moderat miljøklasse være frostbestandig, og der skal være taget forholdsregler mod skadelige alkali-kiselreaktioner.

Til moderat miljøklasse henregnes armerede konstruktioner udsat for udendørs klima og indendørs fugtigt klima samt konstruktioner udsat for ferskvand (f.eks. beholdere, tårne, tribuner, indendørs betonbelægninger, jorddækkede tunneler, uopvarmede bygninger, udendørs beton i bygningskonstruktioner, indendørs beton i fugtige lokaler og særligt udsatte kældervægge, kældergulve og fundamenter).

Til aggressiv miljøklasse hører salt- og røgholdig atmosfære, havvand og brakvand. Aggressiv miljøklasse omfatter konstruktionsdele, hvor de hårdest udsatte områder er udenførs flader, som påvirkes af røgholdig atmosfære i forbindelse med ferskvand under tryk, stillestående eller strømmende havvand eller brakvand hvad enten fladerne står under tryk eller ej, alkalier, klorider eller svagt sulfatholdig jord og grundvand, eller flader, som udsættes for kombinationer af sådanne

\* Denne styrke anbefales frem for normkravet på 15 MN/m<sup>2</sup>.

Ovenstående opdeling af styrkerne efter miljøklasserne må betragtes som vejledende, idet den kan variere efter bl.a. grusmaterialernes vandbehov. NB! Luftindblandet beton kræves, hvor betonen kan udsættes for frost i vandmættet tilstand. Skal betonen være vandtæt, kræves det, at indholdet af cement og filler < 0.25 mm er mindst 375 kg/m<sup>3</sup>.

påvirkninger. Foruden ovennævnte tilkommer for vandrette fladers vedkommende også påvirkning af stillestående eller strømmende ferskvand og frost, hvad enten påvirkningen sker under tryk eller ej.

Ud over at opfylde kravene i moderat miljøklasse skal beton i skærpet miljøklasse således være vandtæt og bestandig over for påvirkning af alkalier, klorider og svage sulfatopløsninger.

Til aggressiv miljøklasse må almindeligvis henregnes udendørs, armerede konstruktioner nær en kyststrækning og konstruktioner i fabriksområder med stærkt røgholdig atmosfære, vandbygningskonstruktioner i saltvand (f.eks. kajmure, bolværker, moler, dækværker, sluser og tunnelkonstruktioner), broer (men ikke nødvendigvis brofundamenter), svømmebassiner, udendørs betondæk, altaner og uafdækkede betonbelægninger.

Før der udarbejdes arbejdsbeskrivelser for et projekt, må man nøje overveje, hvilken af normens tre miljøklasser der bedst dækker de miljøpåvirkninger, som den foreliggende betonkonstruktion vil blive udsat for i løbet af hele dens levetid. Den relevante miljøklasse skal angives i arbejdsbeskrivelserne for hver enkelt gruppe af konstruktionselementer, der indgår i projektet.

Ved fastsættelse af krav til miljøklasse skal man være opmærksom på, at en betonkonstruktion, der under normal brug måske kun bliver udsat for svage miljømæssige belastninger, under selve byggeprocessen kan blive udsat for frysning og optøning eller andre alvorlige påvirkninger. Hvis dette er tilfældet, skal konstruktionen klassificeres i en miljøklasse, der svarer til den alvorligste påvirkning, som konstruktionen vil blive udsat for på noget tidspunkt under dens levetid.

Man skal også være opmærksom på, at der kan forekomme særligt aggressive miljøer inden for normens gyldighedsområde, hvor normen ikke foreskriver, hvilke forholdsregler der skal træffes for at sikre konstruktionens bestandighed.

Foranstaltninger, der kan foreskrives, hvor særligt aggressive miljøer forekommer, kan omfatte udvendige membraner, betonteknologiske forholdsregler, herunder valg af særlige cementer, særlige tilslagsmaterialer, specielt lave vand-cement forhold, geometriske forholdsregler, herunder valg af særligt tykke dæklag, og endelig valg af korrosionsresistent armering.

Et overordnet krav til miljøklasse i en arbejdsbeskrivelse medfører automatisk mere detaljerede krav i henhold til DS 411-84, d.v.s. krav til betonens sammensætning, krav til dæklagets tykkelse over armeringsjernene, krav til luftindblanding, krav til cementtype og krav til tilslagsmaterialernes kvalitet. Disse krav vil blive beskrevet nærmere i afsnit 3.3 vedrørende betons holdbarhed, men nogle af de vigtigste krav er sammenfattet i tabel 2.3. For krav til fyllerindhold i vandtæt beton, se afsnit 3.2.3.7. For krav til luftindhold i frostbestandig beton, se tabel 3.37.

Tabel 2.3 Nogle miljømæssigt betingede krav til vand-cement forhold, v/c, karakteristisk betontrykstyrke,  $f_{ck}$ , og dæklagstykkelse i henhold til DS 411-84.

Miljøklasse	Største tilladelige værdi af v/c*	Mindste tilladelige værdi af foreskrevet $f_{ck}$ (MPa)	Mindste tilladelige værdi for foreskrevet dæklagstykkelse** (mm)
Aggressiv	0.50	30	30 mm + 5 mm tolerancetillæg
Moderat	0.60	25	20 mm + 5 mm tolerancetillæg
Passiv	-	15***	10 mm + 5 mm tolerancetillæg

\* For at overholde disse krav vil det være hensigtsmæssigt at fastlægge blandingforholdene således, at v/c forholdet ved proportionering bliver 0.05 mindre end den største tilladelige værdi i henhold til skemaet.

\*\* Når der støbes mod jord, bør det foreskrevne dæklag forøges med mindst 50 mm, og samtidig bør jorden afdækkes f.eks. med plastfolie.

\*\*\*Gælder kun for armeret beton. For uarmeret beton stilles ingen krav til min.  $f_{ck}$  i passiv miljøklasse.

### 2.2.3 Kontrolklasser

For med rimelig troværdighed at sikre, at de ved dimensioneringen stillede krav til en bærende konstruktion bliver overholdt, skal der foretages en kontrol af materialer og udførelse, hvis art og omfang afhænger af risikoen for personska- de og materiel skade.

Betonarbejde kan kræves udført i én af tre kontrolklasser, skærpet, normal eller lempet. Tabel 2.4 og 2.5 fra DS 411 sammenfatter de forskellige kontrolopgaver, der er forbundet med hver af de tre klasse.

Skærpet kontrolklasse for betonkonstruktioner omfatter:

Konstruktioner, hvor et eventuelt svigt med stor sandsynlighed vil resultere i personskade eller vil medføre stor materiel skade. Som eksempler kan angives bygninger med mere end to etager, og ét- og to-etagers bygninger med store spændvidder (halkonstruktioner), såfremt disse ofte benyttes til ophold for mange personer, f.eks. til bolig, kontor, teater, sport eller produktion; tribuner, vej-, jernbane- og fodgængerbroer, større master, tårne, vandtårne, skorstene og siloer.

Normal kontrolklasse for betonskonstruktioner omfatter:

Konstruktioner, hvor et eventuelt svigt med nogen sandsynlighed vil resultere i personskade eller vil medføre nogen materiel skade. Som eksempler kan angives bygninger med mere end to etager, og ét- og to-etagers bygninger med store spændvidder, hvor der kun lejlighedsvis kommer personer, f.eks. lagerbygninger; ét- og to-etagers bygninger med moderate spændvidder, der ofte benyttes til ophold for mange personer, f.eks. til bolig, kontor eller produktion; mindre master, tårne, vandtårne, skorstene og siloer i lokalt ubebygget område.

Lempet kontrolklasse for betonkonstruktioner omfatter:

Konstruktioner, hvor et eventuelt svigt med meget ringe sandsynlighed vil resultere i personskade eller kun vil medføre ringe materiel skade. Som eksempler kan angives ét-etagers bygninger med små spændvidder, hvor der kun lejlighedsvis kommer personer.

For hvad angår risikoen for nedbrydning af betonen som følge af miljømæssige påvirkninger anbefales:

I skærpet kontrolklasse at udføre alle konstruktioner, som henføres til aggressiv miljøklasse. Endvidere konstruktioner i moderat miljøklasse, hvor ødelæggelse af betonen under hensyntagen til bygherrens økonomiske forhold vil få alvorlige konsekvenser.

I normal kontrolklasse at udføre alle konstruktioner, som henføres til moderat miljøklasse, hvor ødelæggelse af betonen under hensyntagen til bygherrens økonomiske forhold vil være af moderat betydning.

I lempet kontrolklasse kun at udføre ubetydelige konstruktioner, som henføres til passiv miljøklasse.

Det bemærkes, at konstruktionsdele, der ikke forudsættes at medvirke i hovedkonstruktionens bærende funktion, henføres til den relevante kontrolklasse uafhængig af, hvilken kontrolklasse hovedkonstruktionen befinder sig i, men afhængig af konsekvenserne af et eventuelt svigt eller ødelæggelse af konstruktionsdelen.

En oversigt over kontrolomfanget i de tre kontrolklasser findes i tabellerne 2.4 og 2.5. Ved skærpet og normal kontrol skal alle kontroldata samt væsentlige fremstillings- og efterbehandlingsdata anføres i en kontroljournal.

Ved anvendelse af fabriksbeton kan kontrollen med betonens delmaterialer og med betonen efter særlig aftale helt eller delvis baseres på resultater fra fabrikkens løbende kvalitetskontrol, hvis denne er tilrettelagt og udført i overensstemmelse med normens principper, og fabrikken er tilsluttet en anerkendt kontrolordning.

#### 2.2.4 Største tilladelige stenstørrelse

Et tilslagsmateriales største tilladelige stenstørrelse defineres som den stenstørrelse, under hvilken 95% af stenmaterialet tillades at befinde sig ved en sigteanalyse, udført i henhold til DS 405.9.

Den største tilladelige stenstørrelse skal foreskrives således, i forhold til konstruktionen og armeringen, at betonen fuldstændigt kan bringes til at udfylde formen og omslutte armeringen. Ved fastlæggelsen af den største tilladelige stenstørrelse skal der tages hensyn til konstruktions-elementernes dimensioner og den mindste forekommende frie afstand mellem armeringens enheder.

Største tilladelige stenstørrelse må ikke overskride:

- a) 3/4 af mindste afstand mellem armeringsjern
- b) 1/5 af mindste afstand mellem formsider
- c) 1/3 af mindste pladetykkelse
- d) 3/4 af dæklagets tykkelse



Tabel 2.4 Materialekontrol i henhold til DS 411-84

Emne	Skærpet kontrol	Normal kontrol	Lempet kontrol
kontrol-journal	kontroljournal kræves		kontroljournal kræves ikke
slap armering kontrol	i overensstemmelse med DS 13080 i alle kontrolklasser		
spændarmering kontrol	i overensstemmelse med DS 13081		spændarmering må ikke anvendes i forbindelse med lempet kontrol
beton forprøvning	udføres inden betonarbejdet påbegyndes samt ved væsentlige ændringer af materialer og materiel	kan udelades, såfremt materialerne i længere tid har været i løbende produktion og vist sig egnede	ingen
cement kontrol	cementens kvalitet skal dokumenteres ved varedeklaration eller ved prøvning		ingen
grus kontrol	grusmaterialernes egnethed skal dokumenteres ved værkcertifikat eller ved prøvning		ingen
vand kontrol	udføres ved forprøvning og under særlige omstændigheder		ingen
urenheder kontrol	udføres ved forprøvning og under særlige omstændigheder		ingen
flyveaske kontrol	flyveaskens kvalitet skal dokumenteres ved varedeklaration eller ved prøvning		ingen
mikrosilica kontrol	mikrosilica kvalitet skal dokumenteres ved varedeklaration eller ved prøvning		ingen
tilsætningsstoffer kontrol af dosering	udføres ved forprøvning og mindst én gang pr. skift af arbejdshold		ingen
konsistens kontrol	skal eftervises ved udstøbningen og i forbindelse med udtagning af eventuelle prøver til styrkemåling		ingen
v/c-forhold	når der er stillet krav til v/c-forholdet, kontrolleres det ved kontrol med betonens indhold af vand, cement, flyveaske og mikrosilica		

Tabel 2.4 Materialekontrol (fortsat)

Emne	Skærpet kontrol	Normal kontrol	Lempet kontrol
fabriksbeton modtagekontrol	ja	ja	nej
betonstyrke kontrol inden afformning	udføres efter en i forvejen truffet aftale		ingen
betonstyrke kontrol	skal eftervises ved styrkemåling		skal eftervises ved styrkemåling. For beton med krævet karakteristisk styrke mindre end 15 MN/m <sup>2</sup> , kan styrkekontrollen erstattes af kontrol af blandingsforhold og sætmål

Tabel 2.5 Udførelseskontrol i henhold til DS 411-84

Emne	Skærpet kontrol	Normal kontrol	Lempet kontrol
journal	kontroljournal kræves ved skærpet og normal kontrol		kontroljournal kræves ikke
formarbejde kontrol	alt formarbejde synes inden hver udstøbning		stikprøvekontrol af formarbejde
armeringsarbejde kontrol	armeringsarbejdet synes inden hver udstøbning		stikprøvekontrol af armeringsarbejde
udstøbning kontrol	kontrol af hele udstøbningen	lejlighedsvis kontrol af udstøbningen	lejlighedsvis kontrol af udstøbningen
hærdning og efterbehandling	jævnlig inspektion	lejlighedsvis inspektion	ingen
opspænding kontrol	udføres efter spændlister	udføres efter spændlister	opspænding må ikke finde sted

Hvis disse regler ikke overholdes, er der risiko for dannelse af såkaldte stenreder i betonen på grund af separation af mørtel fra stenene under udstøbning af betonen.

Det anbefales i tidligere tider at vælge den størst mulige stenstørrelse, som opfylder disse fordringer, idet den vandmængde, der kræves for at opnå en vis betonkonsistens, aftager med øgende stenstørrelse. Samtidig reduceres den cementmængde, der kræves for at bibeholde et uforandret vand-cement forhold, og dermed uforandret betonstyrke. Betragtningen er korrekt op til stenstørrelser på 16 eller 20 mm. For større stenstørrelser synker betonstyrken imidlertid for konstant holdt vand-cement forhold. Samtidig øger risikoen for afblanding med øgende stenstørrelse. Hverken teknisk eller økonomisk er der derfor nogen fordel ved at fremstille beton med større sten end 32 eller 40 mm. Nu til dags bruger man sjældent større stenstørrelse end 40 mm ved fremstilling af konstruktionsbeton.

#### 2.2.5 Tilsætningsstoffer

Normalt bør den projekterende kun foreskrive brug af tilsætningsstoffer, hvis de krævede betonegenskaber kun kan opnås, når sådanne stoffer bruges. Således kan frostbestandig beton i skærpet og moderat miljøklasse kun fremstilles ved tilsætning af luftindblandende tilsætningsstoffer. Ligeledes kan en glideformsstøbning normalt kun gennemføres ved tilsætning af et afbindingsforsinkende tilsætningsstof til betonen.

På den anden side af sagen bør den projekterende heller ikke ved sine forskrifter forhindre den udførende i at bruge tilsætningsstoffer, med mindre det kan antages, at de vil skade betonen. Det kan for eksempel være tilfældet, når der bruges kalciumklorid til at fremskynde betonens styrkeudvikling, eller når der bruges andre kloridholdige tilsætningsstoffer, som bringer betonens samlede kloridindhold over de maksimalværdier på 0.5%, 1.5% og 2.5% af cementvægten, der er foreskrevet i henhold til DS 411 for spændbeton, slapt armeret beton, henholdsvis uarmeret beton. Højere kloridindhold i betonen kan nemlig give anledning til korrosion af armeringen.

Tilsætningsstoffers indvirkning på betonens konsistens, holdbarhed og styrke er behandlet i kompendiets afsnit 3.2.4, 3.3.5 og 3.4.4 og i Dansk Ingeniørforenings anvisning i brug af tilsætningsstoffer til beton, NP-111-R.

### 2.2.6 Konsistens

Betonens konsistens kan måles med forskelligt prøveapparat som beskrevet i afsnit 4.4.1. I Skandinavien er sætmålet, vebe-måleren og faldbordet de mest anvendte konsistensmålere.

Den projekterende kan foreskrive et vist område, inden for hvilket han ønsker, at betonens konsistens skal ligge. Men da den optimale konsistens i høj grad afhænger af de råmaterialer, som entreprenøren måtte vælge, af komprimeringsudstyret, af betonarbejdernes rutine, og af en række andre forhold på byggepladsen, er det tilrådeligt at begrænse forskrifterne til den blødeste konsistens, som er forenelig med god praksis. En sådan konsistens skal foreskrives under hensyntagen til betonkonstruktionens art og udformning samt bearbejdningsmetoden. Ved støbning af slanke, tæt-armerede konstruktioner eller konstruktioner med mange hjørner og vinkler kræves således en blødere konsistens end for massive og uarmerede konstruktioner. Beton, der skal vibreres, skal støbes med stivere konsistens end beton, der skal håndbearbejdes.

Tabel 2.6 kan tjene som vejledning ved fastlæggelse af blødest tilladelige konsistens afhængig af konstruktionsformålet og komprimeringsmetoden. Det bemærkes i den forbindelse, at det er uforeneligt med god betonteknisk praksis at foreskrive eller bruge beton med et sætmål, der overstiger 15 cm, med mindre sådan beton proportioneres og fremstilles specielt som såkaldt flydebeton.

### 2.2.7 Særlige krav

#### 2.2.7.1 Svind

Beton trækker sig sammen, når den tørrer ud, og udvider sig, når den opfugtes; man siger, at betonen svinder og sveller. Det kan være nødvendigt at vurdere størrelsen af betonens udtørringssvind i forbindelse med udførelse af konstruktionsberegninger.

Betonens svind beror på mange forskellige faktorer, som for eksempel delmaterialernes egenskaber, betonens blandingsforhold, omgivelsernes fugtighed og temperatur, konstruktionselementets størrelse og armeringsgrad, og den tid betonen udsættes for udtørring.

Tabel 2.6 Forskellige betonkonsistenser og deres anvendelsesområder

Konsistens	Komprimeringsmetode og typiske anvendelsesområder	Sætmål mm	Vebemål sek.	Udbredelsesmål cm
Jordfugtig	konstruktionsdele, som udsættes for kraftig og langvarig vibrering evt. under samtidig trykpåvirkning	0	over 20	-
Meget stiv	kræver ved støbning meget kraftig vibrering, bruges hovedsageligt i forbindelse med belægningsbeton	0	10-20	-
Stiv	små og svagt armerede konstruktionsdele ved normal vibrering og store konstruktionsdele ved håndbearbejdning	0-30	5-10	-
Plastisk	svagt armerede konstruktioner, ved håndbearbejdning og tætarmerede konstruktioner ved normal vibrering	30-60	3- 5	-
Tyk flydende	normalt armerede konstruktioner med forholdsvis store dimensioner og ved håndbearbejdning	60-100	2- 3	-
Let flydende	små konstruktionsdele med tæt armering og ved håndbearbejdning	100-150	0	44-47
Flydebeton	tætarmerede konstruktioner og gulve uden bearbejdning. Selvnivellerende beton.	-	-	55-63

Comité Européen du Béton angiver en metode til overslagsmæssig beregning af betonens svind\*. Metoden er udarbejdet for beton, der fremstilles med Portland cement og med tilslag af normal vægt. Den tager hensyn til følgende parametre: omgivelsernes relative luftfugtighed, cementindholdet, vand-cement forholdet, udtørringstiden og konstruktionstværsnittets ækvivalente tykkelse. Konstruktionstværsnittets ækvivalente tykkelse defineres som tværsnitsarealet divideret med halvdelen af den del af tværsnittets omkreds, som er udsat for udtørring.

Betonens udtørringssvind beregnes som produktet af ordinatværdierne, som aflæses af de fire diagrammer i figurerne 2.2 til 2.5. Man bemærker, at betonens svind udtrykkes som en længdeændring pr. længdeenhed, d.v.s. som en dimensionsløs tøjning. Først ved at multiplicere denne tøjning med konstruktionselementets højde, længde og bredde fremkommer elementets svind i de tre retninger.

Selv om man kan sætte spørgsmålstegn ved nøjagtigheden af de beregnede udtørringssvind, fordi metoden ikke tager hensyn til en række andre parametre, som også har betydning for betonens svind, kan man i det mindste vurdere den relative betydning af de væsentligste faktorer, og man kan bedømme, hvorvidt en foreliggende betonblanding er hensigtsmæssig med henblik på at minimere svindet.

#### 2.2.7.2 Elasticitet

Betonens elasticitetsmodul er i det store og hele proportional med betonens trykstyrke. Elasticiteten er imidlertid også stærkt afhængig af tilslagets elastiske egenskaber og i mindre grad af betonens lagringsbetingelser og alder, blandingsforholdene og cementtypen. For beton, som er fremstillet af tilslag med normal vægt og med en densitet på 2300 kg/m<sup>3</sup> eller mere, angiver tabel 2.7 tilnærmede værdier for betonens elasticitetsmodul på forskellige styrkeniveauer.

\* Comité Européen du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte. International Recommendations for the Design and Construction of Concrete Structures. FIP Sixth Congress, Prague, June 1970.

Hvis der er behov for en mere nøjagtig værdi for elasticitetsmodulen for beton, der fremstilles med særlige materialer under særlige forhold, må der udføres forsøg, for eksempel som angivet i DS 423-25. Elasticitetsmodulen for beton, som fremstilles med visse typer tilslag, kan afvige væsentligt fra værdierne i tabel 2.7. Det er tilladt at bruge sådanne materialer til betonfremstilling, forudsat at den målte elasticitetsmodul benyttes ved konstruktionsberegningen.

Tabel 2.7 Betonens elasticitetsmodul (efter B.W. Shacklock, "Concrete Constituents and Mix Proportions", Cement and Concrete Association, London, 1974)

Trykstyrke	Statisk elasticitetsmodul E <sub>c</sub>		Dynamisk elasticitetsmodul	
	middelværdi	typisk område	middelværdi	typisk område
N/mm <sup>2</sup> (MPa)	kN/mm <sup>2</sup> (GPa)	kN/mm <sup>2</sup> (GPa)	kN/mm <sup>2</sup> (GPa)	kN/mm <sup>2</sup> (GPa)
15	25	21-29	35	31-39
20	26	22-30	36	32-40
25	28	23-33	38	33-43
30	31	26-36	40	35-45
40	34	28-40	42	36-48
50	38	30-42	44	38-50

#### 2.2.7.3 Krybning

Beton under langtidsbelastning deformeres gradvis med tiden. Denne tidsafhængige deformation kaldes krybning. Der må tages hensyn til betonens krybning for eksempel ved beregning af nedbøjninger hos konstruktioner, ved beregning af spændingsomlejringer i statisk ubestemte konstruktioner og ved beregning af spændingstab i førspændte eller efterspændte konstruktioner.

Størrelsen af betonens krybning beror på en lang række faktorer såsom belastningens størrelse, belastningstiden, betonens alder ved belastningens påførelse, omgivelsernes relative luftfugtighed og temperatur, blandingsforholdene og konstruktionselementets størrelse.



Comité Européen du Béton\* angiver også en metode til overslagsmæssig beregning af betonens krybning. Ifølge denne metode sættes krybningen i relation til betonens elastiske deformation under den givne belastning. For at beregne en given betons krybning beregnes produktet af ordinatværdierne i diagrammerne i figurerne 2.6, 2.3, 2.5, 2.7 og 2.8. Betonens krybning under en given belastning beregnes ved at multiplicere det således fremkomne tal med betonens elastiske deformation under den givne belastning.

Den således skønnede værdi for krybningen skal imidlertid tages med et vist forbehold, da metoden ikke tager hensyn til en række andre parametre, som også er af betydning for betonens krybning; men ved brug af metoden kan man i det mindste vurdere den relative betydning af de væsentligste faktorer, og man kan bedømme, hvorvidt en foreliggende betonblanding er hensigtsmæssig med henblik på at minimere krybningen.

#### 2.2.8 Huskeliste ved formulering af krav til beton i arbejdsbeskrivelser

Huskelisten i tabel 2.8 kan være til hjælp, når den projekterende skal formulere krav til beton i forbindelse med udarbejdelse af arbejdsbeskrivelser. Listen er opdelt i en række obligatoriske krav, som altid bør formuleres for entydigt at definere betonen, og en række supplerende krav, som kan, men ikke nødvendigvis bør stilles. Det bemærkes, at der i forbindelse med hvert enkelt krav skal angives prøvningsmetode, prøvningsomfang og -frekvens samt godkendelseskriterium.

\* Comité Européen du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte. International Recommendations for the Design and Construction of Concrete Structures. FIP Sixth Congress, Prague, June 1970.

Tabel 2.8 Huskeliste ved formulering af krav til beton i arbejdsbeskrivelser

Obligatoriske krav	Bemærkninger * kræver opstilling af supplerende krav
Karakteristisk styrke (af hensyn til mekanisk belastning såvel som miljøpåvirkning)	Tryk (multiplum af 5 MPa) Bøjning (for belægningsbeton) Spaltetræk (alt. for belægningsbeton)
Miljøklasse	Passiv Moderat Aggressiv Særlig aggressiv*
Kontrolklasse	Skærpet (hovedsagelig anlægsarbejder) Normal (hovedsagelig boligbyggeri) Lempet (sekundære betonarbejder)
Konsistens	Sætmål Vebe Udbredelsesmål
Største tilladelige stenstørrelse	40, 32, 20, 16, 10 eller 8 mm
Cementtype	Standard Rapid Lavalkali Sulfatbestandig Hvid
Stentype	Bakke Sø Skærver Materialeklasse*
Sandtype	Bakke Sø Skærvesand Materialeklasse*
Luftindhold	Vol% indblandet luft

Supplerende krav	Bemærkninger
Særlige krav til stenmaterialet	Materialeklasse Knusningsgrad Form Renhed etc.
Særlige krav til sandet	Reaktive korn Ekspansion o/oo-tid Vandbehov Renhed etc.
Max. vand-cement forhold	Miljøklasse Vandtæthed
Min. eller max. cementindhold	(Af hensyn til temperatur- eller holdbarhedsmæssige forhold)
Min. eller max. temp. hos frisk beton	Vinter- eller Sommerstøbning
Max. temp. hos hærdnet beton	Massivbeton
Tilsætningsstoffer	Accelererende Retarderende Luftindblandende Plastificerende Pumpelighedsforbedrende Pigmenter Flyveaske Mikrosilica Polymerer Klorider
Skærpede miljøkrav	Holdbarhed mod sulfatpåvirkning Holdbarhed mod kloridpåvirkning Holdbarhed mod alkalipåvirkning Holdbarhed mod andre kemiske stoffer Holdbarhed mod ekstreme klimaforhold Membraner Specialcement Særlige tilslagsmaterialer

Tabel 2.8 Huskeliste ved formulering af krav til beton (fortsat)

Supplerende krav	Bemærkninger
Luftporefordeling i hærdnet beton	Afstandsfaktor
Forprøvning	Omfang
Særlige krav	Eksempelvis: Pumpelighed Retarderet afbinding Accelereret afbinding Accelereret styrkeudvikling Største tilladelige svind Største tilladelige krybning Mindste tilladelige E-modul Slidstyrke Vandtæthed Densitet Etc.

2.2.9 Huskeliste ved bestilling af fabriksbeton

Huskelisten i tabel 2.9 kan være til hjælp, når den udførende skal afgive bestilling på en betonleverance, f.eks. hos en betonfabrik.

Tabel 2.9 Huskeliste ved bestilling af fabriksbeton

Oplysning	Bemærkninger
Kundens navn og adresse	Fakturering
Byggepladsens beliggenhed	Modtageradresse
Nøjagtig beskrivelse af leveringsstedets beliggenhed på byggepladsen	Leveringssted

Tabel 2.9 Huskeliste ved bestilling af fabriksbeton (fortsat)

Oplysning	Bemærkninger
Myndighed som har formuleret kravene	Eksempelvis: D.S.B. Vejdirektoratet Større rådgivende ingeniørfirma
Formål til hvilket betonen skal bruges	Se f.eks. tabel 2.2
Plan over ønskede leverancer inkl. dato, klokkeslet og mængder. Evt. skønnet gennemsnit og maksimum pr. dag	Af hensyn til fabrikkens planlægning (indkøb af materialer, ferier, etc.)
Accept af kontrolordningens prøvning	Ja Nej
Byggepladsprøvning	Omfang og frekvens
Betontype	Alle relevante oplysninger fra tabel 2.8

### 3. VALG AF RÅMATERIALER OG BETONPROPORTIONERING

#### 3.1 Alment

Det er som tidligere nævnt den udførendes primære opgave og ansvar at fremskaffe eller producere de nødvendige råmaterialer, samt at sammensætte disse i sådanne blandingsforhold, og at udføre arbejdet på byggepladsen således, at de krav til betonen opfyldes, som den projekterende har opstillet. Det er i den udførendes egen interesse at sikre en økonomisk optimal løsning af disse opgaver.

I Laboratoriet for Bygningsmaterialers grundkursus er det af tidsmæssige grunde ikke muligt at behandle alle de problemer, som den udførende må tage stilling til for at løse disse opgaver på en teknisk og

økonomisk forsvarlig måde. Vi skal hovedsagelig koncentrere os om problemerne i forbindelse med fastlæggelse af blandingsforhold for beton, hvor der er stillet almindelige krav til:

- 1) konsistens (d.v.s. krav til sætmål eller vebemål)
- 2) holdbarhed (d.v.s. krav om min. cementindhold og max. tilladeligt vand-cement forhold eller begge dele, typen af cement og tilslag, og luftindhold)
- 3) styrke (d.v.s. krav til karakteristisk styrke,  $f_{ck}$ )

Ifølge DS 411 skal betonblandinger proportioneres således, at den friske beton opnår den foreskrevne eller ønskede konsistens og således, at den hærdede beton opnår den foreskrevne trykstyrke og holdbarhed.

Det er formålet med enhver betonproportionering, på grundlag af de begrænsede oplysninger vedrørende delmaterialernes egenskaber, der foreligger, eller som kan fremskaffes ved laboratorieforsøg, på det stadium da proportioneringen skal udføres, at fastlægge blandingsforholdene mellem cement, vand, sand og sten, således at den færdige beton opnår de ønskede egenskaber.

Betonproportioneringen kan foretages på mange forskellige måder, og normerne tager ikke stilling til, hvorledes denne proportionering skal foregå. Dette kompendium bygger på en britisk proportioneringsmetode, "Design of Normal Concrete Mixes", som er udarbejdet af D.C. Teychenne, R.E. Franklin og H.C. Entroy, og publiceret af Department of the Environment, Building Research Establishment, London, 1975. Der er foretaget en tilpasning af den såkaldte DOE-metode til danske råmaterialer og klimatiske forhold.

Før den egentlige betonproduktion kan påbegyndes, kræves det eftervist ved forprøvning, at de beregnede blandingsforhold virkelig giver anledning til fremstilling af beton med de ønskede egenskaber. På grund af usikkerhederne i forbindelse med de antagelser, der må gøres på proportioneringsstadiet, vil den første prøveblanding sjældent have nøjagtigt

de foreskrevne egenskaber. Det vil som regel være nødvendigt, på grundlag af de ved prøveblandinger opnåede resultater, at justere blandingsforholdene og enten benytte de justerede blandingsforhold direkte i forbindelse med betonproduktionen eller at fremstille yderligere prøveblandinger.

DOE-metoden kan bruges med godt resultat ved proportionering af betonblandinger fra 15 MPa og op til en maksimal middelstyrke på 45 MPa ved 28 døgn, en maksimal stenstørrelse på 40 mm, og et sand som er graderet mellem zone 1 og 4 i henhold til British Standard 882. I tabeller og diagrammer er der taget hensyn til, at betonen fremstilles med danske cementer og danske tilslagsmaterialer. Det er muligt at fremstille beton med højere eller lavere styrker og at bruge tilslagsmaterialer, som er graderet uden for de anbefalede grænser. DOE-metoden kan dog være mindre nøjagtig og give uøkonomiske blandingsforhold under sådanne forhold.

Proportioneringsmetoden bygger på to grundlæggende relationer mellem betons blandingsforhold og egenskaber.

Lyse's lov angiver sammenhængen mellem friske betonblandingers vandindhold og konsistens. Lyse's lov udtrykker, at konsistensen af friske betonblandinger, der fremstilles med samme råmaterialer, udelukkende beror på det effektive vandindhold, medens konsistensen er uafhængig af cementindholdet og vand-cement forholdet.

Bolomey's lov angiver sammenhængen mellem hærtnede betonblandingers vand-cement forhold og trykstyrke. Bolomey's lov udtrykker, at trykstyrken af hærtnede betonblandinger, der fremstilles med samme råmaterialer, udelukkende beror på det effektive vand-cement forhold, medens trykstyrken er uafhængig af de absolutte vand- og cementindhold.

Disse grundlæggende relationer mellem betons blandingsforhold og egenskaber gør det muligt at foreskrive og proportionere beton for konsistens og styrke uafhængig af hinanden. En sådan proportionering foregår ved,

at man vælger det effektive vandindhold, således at betonen får den foreskrevne konsistens. Derefter vælges cementindholdet, således at betonen netop fremstilles med det effektive eller frie vand-cement forhold, der er nødvendigt, for at betonen skal kunne opnå den foreskrevne trykstyrke.

Det samlede vandindhold i en betonblanding befinder sig i to forskellige tilstande. Den vandmængde, der er absorberet i tilslagetets porestruktur, når tilslaget befinder sig i vandmættet, overfladetør tilstand, bidrager ikke til betonens konsistens og deltager ikke i cementens kemiske hærdeproces. Det gør derimod den frie vandmængde, der er til stede i betonblandingen ud over den vandmængde, der er nødvendig for at bringe tilslaget i vandmættet, overfladetør tilstand.

I praksis er tilslaget ofte vådt og indeholder både absorberet vand og frit vand. Under sådanne forhold skal der tilsættes mindre vand til blanderen end den beregnede mængde frie vand, for at blandingen skal opnå den foreskrevne konsistens og styrke. På den anden side skal der naturligvis tilsættes mere vand til blanderen end den beregnede mængde frie vand, hvis tilslaget er helt tørt. Betonens konsistens beror udelukkende på det frie vandindhold og er uafhængig af den absorberede vandmængde. Betonens styrke beror udelukkende på det effektive vand-cement forhold\* (d.v.s. vægtforholdet mellem frit vand og cement) og er uafhængig af det absolutte vandindhold. Derfor proportioneres betonblandinger altid ud fra antagelsen om, at tilslaget befinder sig i vandmættet, overfladetør tilstand. Ved fremstilling af prøveblandinger og under senere betonproduktion måles tilslagets virkelige fugtindhold løbende, og den tilsatte mængde blandingsvand justeres, således at betonen altid fremstilles med samme mængde frit vand. Korrekt justering af vandindholdet er et af de største problemer i forbindelse med en løbende betonproduktion.

Når betonens blandingsforhold er fastlagt, vil betonproducenten som oftest styre vanddoseringen efter betonens konsistens. Så længe tilslagets gradering, kornform og overfladestruktur er uforandret, vil producenten på denne måde kunne justere den tilsatte mængde støbevand med hensyn til eventuelle variationer i tilslagets eget vandindhold, således at det effektive vand-cement forhold og dermed betonens styrke forbliver nogenlunde

\* Det effektive vand-cement forhold benævnes også det frie vand-cement forhold

konstant under produktionen. Denne fremgangsmåde vil imidlertid ikke give tilfredsstillende resultater, hvis tilslagets gradering, kornform eller overfladestruktur ændrer sig i løbet af produktionen, således at betonens vandbehov ændres af denne grund. Dette vil ofte være tilfældet, hvis tilslaget ikke opfylder rimeligt strenge specifikationskrav.

DS 405.2 angiver metoder til at bringe sand og sten i en vandmættet overfladetør tilstand i laboratoriet og til at bestemme tilslagets absorptionskoefficient. DS 405.11 angiver en metode til bestemmelse af tilslagets frie vandindhold. Tabel 3.36 viser, hvorledes korrektionen af vandindholdet kan foretages, når disse to størrelser er kendte.

### 3.2 Betonens konsistens

#### 3.2.1 Målemetoder

DS foreskriver tre forskellige metoder til måling af betons konsistens. Sæt målet, som beskrevet i DS 423.12, anbefales for letflydende til plastiske betonblandinger. Vebemålet, som er beskrevet i DS 423.13, bruges i forbindelse med stive til jordfugtige betonblandinger. Udbredelsesmålet, som er beskrevet i DS 423.14, anbefales til bestemmelse af konsistensen hos såkaldt selvnivellerende beton eller "flydebeton". Som det vil fremgå af tabel 2.6, supplerer de tre metoder hinanden, idet der dog forekommer en vis overlapning. Metoderne er iøvrigt beskrevet nærmere i afsnit 4.4.1.

DS 423.11 og afsnit 5.1.0 giver vejledning med hensyn til korrekt prøveudtagning af frisk beton.

#### 3.2.2 Vandindhold

Det skal atter understreges, at konsistensen af friske betonblandinger, der fremstilles med samme råmaterialer, udelukkende beror på det frie vandindhold, medens konsistensen er uafhængig af cementindholdet og vand-cement forholdet. Jo højere vandindhold, desto mere flydende vil betonblandingen være.

Det frie vandindhold, der er nødvendigt, for at betonen skal opnå en vis konsistens, beror på tilslagspartiklernes form og ujævnheden af deres overflader. Naturligt forekommende og velafrundede sand- og stenpartikler kræver mindre vand end knuste, flade, spidse og skarpkantede materialer. Mængden knuste og flade partikler i et tilslagsmateriale kan bestemmes som angivet i DS 405.5 og DS 405.6.

Brug af mindre sten kræver højere vandindhold hos betonen, for at den skal få en vis konsistens. Men af hensyn til betonens styrke, som mindsker med øgende stenstørrelse, og af hensyn til den øgede risiko for afblanding af store sten under transport og komprimering af betonen, bruger man sjældent større sten end 32 mm ved betonfremstilling i Europa og 40 mm i England og U.S.A.

Tabel 3.32 angiver gennemsnitlige værdier for det frie vandindhold, som kræves, for at beton fremstillet med forskellige typer dansk tilslag skal opnå forskellige konsistensniveauer. Da vandbehovet for en given betonbearbejdelse øger med betonens temperatur, kan det anbefales at øge værdierne i tabel 3.32 med  $5 \text{ kg/m}^3$  for hver  $5^\circ \text{C}$  den friske betons temperatur overstiger  $20^\circ \text{C}$ .

#### 3.2.3 Tilslagets kornstørrelsesfordeling og kornform

Fremgangsmåden ved bestemmelse af et grusmateriales kornstørrelsesfordeling (kornkurven) er beskrevet i DS 405.9 samt i T.C. Hansen, "Vejledning i elementær grusprøvning", LBM Teknisk Rapport 113/82. Der er gennemgået et eksempel på beregning af kornkurver i afsnit 3.2.3.1.

Tilslagets gradering, og i særlig grad sandets gradering, bestemmer den mængde vand, der skal sættes til en beton, for at den skal opnå en vis konsistens (betonens vandbehov). Dermed bestemmer tilslagets gradering også, hvor meget cement der skal sættes til en beton, for at den skal opnå en vis styrke. Men tilslagets gradering er også afgørende for den friske betons evne til at modstå vandudskillelse og afblanding af større sten. Betonens evne til at fastholde stenene i opslemning kaldes betonens kohæsion. Tilslagets gradering er også af afgørende betydning for, om der opstår problemer i forbindelse med den friske betons udstøbning og overfladebehandling. Dermed har tilslagets gradering indirekte betydning for den hærdede betons egenskaber. En frisk betonblanding, som

potentielt kunne producere en stærk, økonomisk og holdbar hårdnet beton, vil i realiteten give anledning til fremstilling af en porøs, inhomogen og derfor svag og uholdbar hårdnet beton, såfremt den friske beton er vanskelig at komprimere, eller der sker vandudskillelse eller afblanding af stenene.

Lige så vigtigt som valget af en hensigtsmæssig kornkurve er det imidlertid, at kornkurven holder sig konstant under den løbende betonproduktion. Hvis kornkurven svinger under produktionen, vil betonens konsistens også variere fra sats til sats, selv om vandtilsætningen forbliver den samme. Da det er sædvanlig praksis at korrigere for tilfældige variationer i betonens konsistens under en løbende produktion ved at justere vandtilsætningen uden samtidig at justere cementindholdet, vil betonens vand-cement forhold og styrke derfor også variere fra sats til sats. En svingende kornkurve er en af de vigtigste årsager til styrkevariationer hos hårdnet beton.

Af økonomiske grunde må beton imidlertid såvidt muligt fremstilles af lokalt forekommende råmaterialer, som skal oparbejdes på billigst mulig måde. Dette sætter en praktisk grænse for, hvor strenge krav man kan stille til kornkurvens beliggenhed og dens variation. Det er som regel muligt at finde frem til et rimeligt kompromis mellem tekniske og økonomiske krav. Men valg af tilslagsmaterialer og metoder til oparbejdning af tilslag, såvel som sammensætning af tilslagsfraktioner med forskellig gradering til et acceptabelt slutprodukt, er vigtige problemer i forbindelse med enhver betonproportionering. Det er afgørende for betonens økonomi og kvalitet, at disse problemer løses på en fornuftig måde. Dette kræver en vis praktisk erfaring og bør ikke overlades til ukvalificeret personale, hvilket desværre ofte sker.

### 3.2.3.1 Regneeksempel nr. 1. Beregning af kornkurver

Måleresultaterne fra en sigteanalyse af et sand- og et stenmateriale, som er udført i henhold til DS 405.9, er angivet i søjlerne 2 og 5 i tabel 3.0. Resultaterne er angivet som de vægtmængder materiale, der er tilbageholdt på hver enkelt sigte. Det bemærkes, at summen af de vægtmængder, der er tilbageholdt på de enkelte sigter, skal være lig

med den samlede vægt af den oprindelige prøve, idet der højst tillades en afvigelse på  $\pm 1\%$ . Hvis fejlen er større end  $\pm 1\%$ , må sigteanalysen gentages. Fejl mellem 0% og 1% fordeles jævnt på alle sigter.

Som første skridt i analysen beregnes den samlede vægtmængde materiale, som passerer hver enkelt sigte (se søjlerne 3 og 6). Derefter beregnes den procentuelle vægtmængde materiale, der passerer den enkelte sigte (se søjlerne 4 og 7).

I eksemplet passerer 19 g sand 0.125 mm sigten. 19 g sand befinder sig derfor i sigtesættets bundkar. Den samlede mængde materiale, der passerer 0.25 mm sigten, består dels af det materiale, der er tilbageholdt på 0.125 mm sigten, dels af materialet i bundkarret, d.v.s. 44 g + 19 g = 63 g. Således regner man videre op igennem tabellen, indtil man når den første sigte, på hvilken intet materiale er tilbageholdt.

Den procentuelle passerende vægtmængde materiale beregnes som den samlede vægtmængde, der passerer hver enkelt sigte, udtrykt i procent af prøvens samlede vægt. I eksemplet er den procentuelle passerende vægtmængde for 1 mm sigten således:

$$\frac{783}{1000} \times 100 = 78.3\% \text{ eller } 78\%.$$

Når tabellen er udfyldt, afsættes de procentuelle passerende vægtmængder som ordinatorer i et såkaldt sigtediagram over hver af de sigtestørrelser, der er angivet på abscisseaksen (se figur 3.0).

Inddelingen af abscisseaksen er valgt således, at der er lige stor afstand mellem de enkelte sigter, selv om forskellen i sigtestørrelse fordobles fra sigte til sigte. Dette opnås ved at benytte en logaritmisk skala langs abscisseaksen. Et logaritmisk sigtediagram giver bedre end et lineært diagram en opfattelse af kornstørrelsesfordelingen hos den fine del af materialet, der er af væsentlig større betydning for den friske betons egenskaber end kornstørrelsesfordelingen hos den grove del af materialet.

Til slut optegnes kornkurven ved at forbinde de enkelte punkter i diagrammet med rette linier som vist i figur 3.0.

Et tomt skema 3.0 er indføjet sidst i kompendiet. Dette skema kan eventuelt fotokopieres og bruges ved senere praktisk betonproportionering.

Tabel 3.0 Eksempel på sigteanalyse for sand og sten

1 Sigte, fri maskevidde mm	2		3		4		5		6		7
	tilbageholdt		gennemfald		gennemfald		tilbageholdt		gennemfald		
	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	
64											100
32											40
16											5
8	(check)		1000	100			1800	100	3000		0
4	4	996	996	100			1050	100	1200		0
2	28	968	968	97			150	0	150		0
1	185	783	783	78			0	0	0		0
0.5	475	308	308	31			0	0	0		0
0.25	245	63	63	6			0	0	0		0
0.125	44	19	19	2			0	0	0		0
bundkar							0	0	0		0
Sum								3000 (check)			

En vis karakterisering af beliggenheden af et materiales sigtekurve, og derved af grusmaterialets finhed, fås i det såkaldte finhedsmodul FM. Som finhedsmodul benyttes her i landet en talstørrelse svarende til det areal på sigtediagrammet, der ligger over kornkurven og til højre for sigteordinaten 0.125 mm, idet arealet mellem to nabosigter benyttes som enhed for FM. Såfremt sigtekurven regnes retliniet fra sigte til sigte, er dette areal lig summen af  $d_e$ , i alt over hver enkelt sigte, tilbageholdte mængder (den totale mængde, der er grovere) i procent, divideret med 100, idet dog den tilbageholdte mængde over 0.125 mm sigten kun medregnes halvt.

For sandet i tabel 3.0 findes finhedsmodulen således:

$$\begin{aligned} \text{Bidrag fra 0.125 mm sigte} &= \frac{100-2}{100 \times 2} = 0.49 \\ \text{Bidrag fra 0.25 mm sigte} &= \frac{100-6}{100} = 0.94 \\ \text{Bidrag fra 0.50 mm sigte} &= \frac{100-31}{100} = 0.69 \\ \text{Bidrag fra 1 mm sigte} &= \frac{100-78}{100} = 0.22 \\ \text{Bidrag fra 2 mm sigte} &= \frac{100-97}{100} = 0.03 \\ \text{Bidrag fra 4 mm sigte} &= \frac{100-100}{100} = 0.00 \\ \hline \text{FM} &= 2.37 \end{aligned}$$

Tilsvarende findes finhedsmodulen for stenene i tabel 3.0 således:

$$\begin{aligned} \text{Bidrag fra 0.125 mm sigte} &= \frac{100-0}{2 \times 100} = 0.50 \\ \text{Bidrag fra 0.25 mm sigte} &= \frac{100-0}{100} = 1.00 \\ \text{Bidrag fra 0.50 mm sigte} &= \frac{100-0}{100} = 1.00 \\ \text{Bidrag fra 1 mm sigte} &= \frac{100-0}{100} = 1.00 \\ \text{Bidrag fra 2 mm sigte} &= \frac{100-0}{100} = 1.00 \\ \text{Bidrag fra 4 mm sigte} &= \frac{100-0}{100} = 1.00 \\ \text{Bidrag fra 8 mm sigte} &= \frac{100-5}{100} = 0.95 \\ \text{Bidrag fra 16 mm sigte} &= \frac{100-40}{100} = 0.60 \\ \text{Bidrag fra 32 mm sigte} &= \frac{100-100}{100} = 0.00 \\ \hline \text{FM} &= 7.05 \end{aligned}$$

Finhedsmodulet giver et udtryk for grusets grovhed i et enkelt tal, men det giver ikke noget billede af kornfordelingen. To grus kan således have samme FM, men forskellig kornkurveforløb, således at det ene grus måske er bedre egnet til betonfremstilling end det andet. Anvendelsen af FM er derfor begrænset, men f.eks. kan et givet grus's variationer i kornfordelingen fastlægges ved hjælp af FM.

Det bemærkes, at tilslagsmaterialets finhedsmodul ikke benyttes i den proportioneringsmetode, som kompendiet er baseret på. Finhedsmodulen indgår imidlertid i mange fremmede landes normer og bestemmelser.

### 3.2.3.2 Stenmaterialets kornstørrelsesfordeling

Nærmere undersøgelse af alle grusmaterialer, der er tilgængelige inden for en rimelig afstand fra en given byggeplads, vil som regel resultere i, at man vælger en bestemt geologisk forekomst eller grusgrav som værende optimal for produktion af tilslag set fra et økonomisk og teknisk synspunkt. Alt andet lige, vil man vælge det billigste tilslag, som opfylder kravene i DS 411 og DS 401, og som ved prøveblandinger viser sig at give anledning til fremstilling af en tilfredsstillende beton.

Ved meget primitiv betonproduktion, for eksempel i lempet kontrolklasse, kan entreprenøren vælge at bruge et naturligt forekommende usorteret grusmateriale, såkaldt rågrus, som det forekommer i grusgraven, eller som det leveres fra et knuseværk uden nogen form for sortering. Korn, der er større end en vis foreskrevet største tilladelige stenstørrelse, eller som i praksis ikke kan bringes til at passere mellem armeringsjernene, skal dog altid bortsigtes.

I praksis bruges en del tilslag, hvor leverandøren først ved sigtning har opdelt rågruset i sand og sten for derefter atter at blande materialet i et andet og mere passende forhold. I Danmark er betongrus handelsbetegnelsen for et sådant graderet betontilslagsmateriale med en nominal maksimal kornstørrelse mellem 8 og 16 mm. Ved sådan genblanding af sand og sten kan man delvis løse problemerne i forbindelse med variationer i den naturlige gradering af rågruset. Der vil imidlertid stadig være risiko for afblanding af forskellige kornstørrelser under transport, lagring og afvejning af tilslaget.

Selv i sådanne tilfælde, hvor det måtte være tilladt at bruge rågrus eller betongrus, bør entreprenøren sikre sig, at grusets gradering ligger inden for de grænser, der er angivet i tabel 3.1.

Tabel 3.1 Krav til gradering af betongrus (tilpasset efter BS 882-1973)

Nominel sigtestørrelse i mm		Vægtprocent materiale passerende sigte	
BS sigter	ISO sigter	40 eller 32 mm nominel størrelse	20 eller 16 mm nominel størrelse
75	64	100	
40	32	95-100	100
20	16	45-80	95-100
5	4	25-50	35-55
0.6	0.5	8-30	10-35
0.150	0.125	0-6	0-6

Når der bruges betongrus ved betonfremstillingen, vil kornkurvens beliggenhed ofte ændre sig en hel del fra sats til sats. Det er derfor sædvanlig praksis ved fremstilling af kvalitetsbeton i skærpet og normal kontrolklasse at opdele tilslaget ved sigtning i mindst to fraktioner, sand og sten, og at afveje fraktionerne hver for sig. Hverken sortering af tilslaget i sand og sten, eller en videre opdeling af stenene i flere fraktioner, frembyder større tekniske vanskeligheder.

Sten eller groft tilslag defineres i den kontinentale del af Europa som et materiale, der hovedsagelig består af korn større end 4 mm. I England og U.S.A. defineres sten som et materiale, der hovedsagelig består af korn større end 3/16 inch eller 4.8 mm. Sand eller fint tilslag defineres som et materiale, der hovedsagelig består af korn mindre end 4 mm henholdsvis 3/16 inch eller 4.8 mm.

Når sand og sten afvejes hver for sig, reduceres variationerne i kornkurven ganske betydeligt, og det bliver muligt at justere vægtforholdet mellem sand og sten, således at den fremstillede beton får de bedst mulige egenskaber, der kan opnås med de foreliggende materialer. For eksempel er et korrekt valg af vægtforholdet mellem sand og sten nødvendigt for at sikre betonens kohæsion, som vi senere skal få at se.



Hvis det samlede stenmateriales kornkurve falder inden for de grænser, der er angivet i tabel 3.2 eller 3.3, siger man, at tilslaget er graderet, og det vil sandsynligvis være brugbart til fremstilling af beton, forudsat at beliggenheden af kornkurven ikke forandrer sig nævneværdigt med tiden, og forudsat at der ikke sker nogen afblanding af grove fra fine partikler under transport, oplagring og afvejning. Figur 3.1 til 3.7 viser grænserne for kornkurvens beliggenhed svarende til talværdierne i tabellerne 3.2 og 3.3.

Tabel 3.2 Krav til graderet stenmateriale i henhold til BS 882-1973 (se også figurerne 3.1 til 3.4)

Nominel BS sigte mm	Vægtprocent materiale passerende BS sigte (nominelle størrelser graderet stenmateriale)			
	40-5 mm	20-5 mm	14-5 mm	10-5 mm
75	100			
40	95-100	100		
20	35-70	95-100	100	
14	-	-	90-100	100
10	10-40	30-60	50-85	85-100
5	0-5	0-10	0-10	0-25
2.5	-	-	-	0-5

Tabel 3.3 Krav til graderet stenmateriale tilpasset fra BS 882-1973 (se også figurerne 3.5 til 3.7)

Nominel ISO sigte mm	Vægtprocent materiale passerende ISO sigter (nominelle størrelser graderet stenmateriale)		
	32-4 mm	16-4 mm	8-4 mm
64	0		
32	95-100	0	
16	33-68	95-100	0
8	8-38	24-54	85-100
4	0-5	0-10	0-25
2			0-5

Jo færre stenfraktioner, der bruges ved fremstilling af beton, og jo større variationer, der forekommer i graderingen efter transport, oplagring og afvejning af materialet, desto vanskeligere vil det være at holde

betonproduktionen under kontrol. Spredningen af trykstyrkeresultaterne og derfor betonens nødvendige proportioneringsstyrke og det nødvendige cementindhold øger med variationerne i tilslagets gradering. Betonen bliver uøkonomisk og af uensartet kvalitet, hvis tilslagets gradering ikke holdes rimeligt konstant. Kvalitetsvariationerne vil ikke blot have en negativ indflydelse på betonstyrken, men også på dens udseende og holdbarhed. Dette øger naturligvis de senere omkostninger i forbindelse med bygværkets vedligeholdelse og reparation. Derfor er det sædvanlig praksis at opdele stenmateriale til fremstilling af kvalitetsbeton i flere enkeltfraktioner. De enkelte fraktioner transporteres, oplagres, afvejes og doseres hver for sig i de ønskede vægtforhold. På denne måde sikrer man sig, at afblanding kun kan ske inden for de snævre grænser, der er fastlagt for hver enkelt fraktion.

Talmæssigt kan kvalitetsvariationer i en betonproduktion illustreres ved forskellige variationskoefficienter (afsnit 2.2.1) for beton, som fremstilles under forskellige forhold. Amerikanske erfaringer karakteriserer kvaliteten af beton som vist i tabel 3.4. Indflydelsen af tilslagets kvalitet fremgår af tabel 3.5

Tabel 3.4 Standard of Concrete Control (fra ACI Standard 314-65)

Class of Operation	Coefficient of variation for different control standards, in percent			
	Excellent	Good	Fair	Poor
General Construction	below 10.0	10.0-15.0	15.0-20.0	above 20.0
Laboratory Control	below 5.0	5.0-7.0	7.0-10.0	above 10.0

Det fremgår af tabel 3.5, at kvalitetsbeton kun kan fremstilles, såfremt stenmaterialet sammensættes af mindst to fraktioner, og der samtidig bruges et velgraderet sand, hvis kornkurve holder sig inden for ret snævre grænser.

Det fremgår af tabel 3.4 og 3.5, at stenmaterialet bør opdeles i enkeltfraktioner, når der skal fremstilles beton i skærpet og normal kontrolklasse, selv om dette ikke udtrykkeligt kræves i DS 411.

Tabel 3.5 Forholdet mellem tilslagetets kvalitet og den forventede variationskoefficient for en betonproduktion. (Efter G. Graham and F.R. Martin, "The Construction of High-Grade Quality Paving for Modern Transport Aircraft", J.Inst.Civ.Engr. Vol. 26, No. 6, pp. 117-190, London, April 1946)

Tilslagetets kvalitet	Forventet variationskoefficient i %
Tre stenfraktioner og sand, graderet inden for meget snævre grænser	5-10
To stenfraktioner og sand, graderet inden for meget snævre grænser	10-12
To stenfraktioner og sand, graderet inden for forholdsvis snævre grænser	12-15
En stenfraktion og sand uden nogen videre kontrol med graderingen	15-20
Rågrus eller genblandet betongrus	> 20

Traditionelt markedsføres følgende stenfraktioner i Danmark:

Singels	32-64 mm
Nøddesten	16-32 mm
Ærtesten	8-16 mm
Perlesten	2- 8 mm

Det er beklageligt, at DS 401 definerer perlesten som størrelsesfraktionen mellem 2 mm og 8 mm; DS 401 burde definere perlesten som fraktionen mellem 4 mm og 8 mm, som det er tilfældet i alle andre landes normer. På grund af denne ejendommelighed ved den danske sand- og grusnorm vil det ved betonproportioneringen altid være nødvendigt at korrigere for mængden underkorn hos stenmaterialet mindre end 4 mm. Fremgangsmåden ved denne korrektion illustreres i regneeksempel nr. 5 i afsnit 3.2.3.10.

I England og U.S.A. opdeles stenmaterialet som regel i følgende nominelle fraktioner: 5-10 mm, 10-20 mm og 20-40 mm. Forskellen mellem europæisk og britisk-amerikansk praksis beror på, at man i den kontinentale del af Europa bruger de såkaldte ISO-sigter, som er baseret på metriske enheder, medens BS og ASTM-sigterne er baseret på engelske enheder. Standard sigtestørrelserne for de to systemer er vist i tabel 3.6. Proportioneringsmetoden i dette kompendium er tilrettelagt således, at den kan benyttes, uanset hvilke standardsigter der bruges ved analysen af tilslaget.

Når specielle forhold gør sig gældende, kan det ved sigteanalysen være nødvendigt at indskyde de supplerende sigter, der er vist i parentes i tabel 3.6. Det vil for eksempel være tilfældet, når betonens sammensætning skal tilpasses en bestemt tykkelse af dæklaget over armeringsjernene i betonelementer med små dimensioner, eller når man af arkitektoniske grunde ønsker at opnå en snæver kornstørrelsesfordeling af sten til beton med blottet tilslag. Det kan også være nødvendigt at bruge de mellemliggende sigter i forbindelse med en normal sigteanalyse, for eksempel for at afsløre et uønsket partikelspring i stenmaterialets kornkurve. Det er imidlertid sjældent, at de mellemliggende sigter bruges ved normal sigteanalyse af betontilslag.

Når stenmaterialet sammensættes af flere fraktioner, bør graderingen af de enkelte fraktioner ligge inden for de grænser, der er angivet i tabel 3.7.

De gunstigste blandingsforhold for sammensætning af enkelte stenfraktioner til et tilslag med optimale egenskaber afhænger af stenpartiklernes form og det formål, som betonen skal bruges til. Meget groft kan man regne med, at et blandingsforhold på 1:2 efter vægt vil være tilfredsstillende for en blanding af 8 og 16 mm, henholdsvis 10 og 20 mm, materiale, medens et blandingsforhold på 1:1.5:2.5 vil være tilfredsstillende for en blanding af 8, 16 og 32 mm, henholdsvis 10, 20 og 40 mm, materiale. Hvis stenmaterialet sammensættes af to fraktioner, f.eks. 10-20 mm og 5-10 mm, vil de procentuelle mængder efter vægt af det samlede tilslag således være 67% og 33%. Hvis der bruges tre fraktioner, f.eks. 20-40 mm, 10-20 mm og 5-10 mm, vil de tilsvarende procentuelle vægtmængder være 50%, 30% og 20%.

Tabel 3.6. Sammenligning mellem sigtestørrelser og terminologi for betontilslag i forskellige dele af verden

Betegnelse i in., eller sigte nr.	ASTM sigter		ISO sigter i mm	Dansk Standard	Beton terminologi (engelsk)	Beton terminologi (dansk)
	Nærmeste ækvivalente sigte i mm	Nominal betegnelse i mm				
(3 in.)	(76)		(64)	(63)		Paksten < 125 mm
(2½ in.)	(63.5)	(60)				Groft betontilslag (sten)
(2 in.)	(50.8)	(50)	(45)	31.5		
1½ in.	37.5	40	32			Fint betontilslag (betonsand)
(1 in.)	(25.4)	(25)	(22.6)	16		
¾ in.	19.0	20	16			Ler og Silt
(½ in.)	(13.2)	(14)	(11.3)	8		
3/8 in.	9.5	10	8			Ler
# 4	4.75	5	4	4		
# 8	2.36	2.5	2	2		
# 16	1.18	1.2	1	1		
# 30	0.60	0.6	0.5	0.5		
# 50	0.30	0.3	0.25	0.25		
# 100	0.15	0.15	0.125	0.125	Fines	Filler
# 200	0.075	#200	0.062	0.075	Silt	Silt
-	0.002	0.002	0.002	0.002	Clay	Ler
-	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002		

Sjældnere benyttede sigter er angivet i parentes.

Tabel 3.8 giver mere detaljerede retningslinier for sammensætning af stenfraktioner. Idet man antager, at kornkurver for stenmaterialer starter ved en nedre kornstørrelse på 3/16 in. (4.8 mm), respektive 4 mm, altså at stenene ikke indeholder korn mindre end 3/16 in. (4.8 mm), respektive 4 mm, fås talværdierne i tabel 3.8 af følgende formler:

a. Kornkurven starter ved 3/16 in. (4.8 mm):

$$P = \frac{\sqrt{d} - \sqrt{3/16}}{\sqrt{D} - \sqrt{3/16}} \quad (3.0)$$

b. Kornkurven starter ved 4 mm:

$$P = \frac{\sqrt{d} - \sqrt{4}}{\sqrt{D} - \sqrt{4}} \quad (3.0a)$$

hvor d = sigtestørrelse i inches respektive mm

D = maksimal stenstørrelse i inches respektive mm

P = samlet procentuelt gennemfald

De således beregnede kornkurver er de såkaldte Fuller-kurver, der angiver den i praksis tættest muligt opnåelige tilfældige lejring af kugleformede stenpartikler. Fuller-kurverne vil samtidig give den mest økonomiske gradering af et stenmateriale, fordi den tættest mulige lejring af stenene i praksis vil kræve den mindst mulige mængde af den dyre cementmørtel for at udfylde hulrummene mellem stenpartiklerne i betonen.

Det bemærkes i denne forbindelse, at man kun bør bruge Fuller-kurven ved sammensætning af stenmaterialet. Fuller-kurven bør ikke benyttes ved sammensætning af det samlede tilslagsmateriale, d.v.s. af sten og sand. Fuller-kurven vil nemlig give så tæt en pakning af kornene i det samlede tilslagsmateriale, at de enkelte korn vil gnide mod hinanden, hvorved betonen bliver vanskelig at bearbejde; man siger, at betonen bliver strid. I stedet bør man sørge for, at et stenmateriale, som er graderet i henhold til Fuller-kurven, ved proportionering af betonen kommer til at indeholde et rimeligt overskud af smøremiddel, d.v.s. af cementmørtel. Det vil blive beskrevet i afsnit 3.2.3.9, hvordan man kan afgøre, hvor stor en procentdel af det samlede tilslag som skal bestå af sand, den såkaldte optimale sandprocent, for at betonen skal opnå den bedst mulige bearbejdelighed.

Endelig skal det betones, at de blandingsforhold, der er angivet i tabel 3.8, kun skal betragtes som vejledende. Disse blandingsforhold kan komme til anvendelse, når tekniske eller økonomiske forhold ikke taler for væsentlige afvigelser. Hvad angår betonens bearbejdelse og kohæsion, er optimum for stenmaterialets gradering imidlertid forholdsvis fladt. Det vil sige, at et bredt bånd af kornkurver vil give en bearbejdelig og økonomisk beton. Dog bør kornkurven for et stenmateriale altid holde sig inden for de grænser, der er angivet i tabel 3.2 og 3.3. Hvis stenmaterialets kornkurve ligger uden for de i tabel 3.2 og 3.3 angivne grænser, kan proportioneringsmetoden føre til utilfredsstillende resultater.

Til trods for at stenmaterialer med meget forskellig kornkurve alle kan lede til fremstilling af tilfredsstillende beton, må man gøre sig klart, at når man først har besluttet sig til at bruge et materiale med en bestemt kornkurve, bør man træffe foranstaltninger for at sikre, at kornkurven varierer så lidt som muligt under den løbende betonproduktion. Den amerikanske sand- og grusnorm, ASTM C-33, kræver således, at sandet enten skal forkastes eller, at der skal foretages en omproportionering af betonen, hvis sandets finhedsmodul afviger mere end 0.20 fra den værdi, der er forudsat ved den oprindelige proportionering.

I den tekniske litteratur anbefales det ofte at bruge stenmaterialer med en diskontinuerlig gradering, en såkaldt spring-gradering, hvor der mangler visse fraktioner i det samlede stenmateriale. Det hævdes, at en sådan gradering kræver mindre cement og sand og dermed mørtel i betonen end tilslag med en kontinuerlig gradering. For at dette skal være tilfældet, må stenmaterialet imidlertid opdeles i ganske bestemte og meget snævrere enkeltfraktioner, end sand- og grusindustrien normalt er i stand til at levere. Disse snævre enkeltfraktioner skal atter blandes efter et ganske bestemt og kompliceret system (se f.eks. Bährner, "Skeletbetong", Cement och Betong, 1951, No. 2). I modsætning til en sådan kontrolleret spring-gradering, vil tilfældige spring i stenmaterialets gradering ofte give anledning til fremstilling af en strid og dårligt bearbejdelig beton, med tilbøjelighed til afblanding af stenene. Dette vil kun kunne forhindres, hvis sandprocenten og dermed mørtelmængden i betonen øges betydeligt. Ved tilfældig spring-gradering opnår man altså det stik modsatte af, hvad lærebøgerne hævder. Det giver således anledning til misforståelser, at et stenmateriale med tilfældige

spring i graderingen også betegnes som værende spring-graderet. Under normale forhold bør man undgå at bruge sådant spring-graderet tilslag til betonfremstilling. Proportioneringsmetoden i dette kompendium vil give det bedste resultat, når tilslagsmaterialet er kontinuerligt graderet.

Tabel 3.7. Anbefalet gradering af enkeltfraktioner stenmateriale, tilpasset efter BS 882-1973

Nominel sigte størrelse mm	Vægtprocent materiale passerende nominel sigte (nominel størrelse af enkeltfraktioner)			
	40 mm eller 32 mm	20 mm eller 16 mm	14 mm eller 12 mm	10 mm eller 8 mm
75 eller 64	100			
40 eller 32	90-100	100		
20 eller 16	0- 25	90-100	100	
14 eller 12	-	-	85-100	100
10 eller 8	0- 5	0- 25	0- 50	85-100
5 eller 4	-	0- 5	0- 10	0- 25
2.5 eller 2	-			0- 5

Tabel 3.8. Anbefalede blandingsforhold for enkeltfraktioner til et sammensat stenmateriale. De anbefalede graderinger er vist som punkterede linier i figurerne 3.1 til 3.7.

Nominel sigte størrelse mm	Procentuelt gennemfald nominel maksimal stenstørrelse, mm							
	40	32	25	20	16	14	10	8
40	100							
32		100						
25	72		100					
20	55		77	100				
16		55			100			
14	35		48	63		100		
10	23		32	41		65	100	
8		23			41			100
5	0		0	0		0	0	
4		0			0			0

3.2.3.3 Regneeksempel nr. 2. Sammensætning af tre velafgrænsede stenfraktioner i foreskrevne blandingsforhold

I dette eksempel søger man at sammensætte tre enkeltfraktioner af stenmateriale i sådanne blandingsforhold, som vil bevirke, at det sammensatte stenmateriale bliver bedst muligt egnet til betonfremstilling. Kornstørrelsesfordelingen af enkeltfraktionerne er angivet i tabel 3.9. Det fremgår af tabellen, at hver af de nominelle fraktioner 40-20 mm (I), 20-10 mm (II) og 10-5 mm (III) leveres med 5% overkorn og 5% underkorn. Samtlige fraktioner er graderet inden for de grænser for enkeltfraktioner, der er angivet i tabel 3.7.

Ifølge tabel 3.8 anbefales det i forbindelse med betonfremstilling at bruge 100-55 = 45% 40-20 mm materiale (I), 55-23 = 32% 20-10 mm materiale (II) og 23% 10-5 mm materiale (III).

Ordinaterne y for stenmaterialets kornkurve, sammensat i blandingsforholdene a% materiale I til b% materiale II til c% materiale III, kan beregnes ved hjælp af ligning 3.1

$$y = \frac{a}{100} \times y_I + \frac{b}{100} \times y_{II} + \frac{c}{100} \times y_{III} \quad (3.1)$$

hvor y er ordinaten for den sammensatte kornkurve ved en given sigtestørrelse,  $y_I$ ,  $y_{II}$  og  $y_{III}$  er ordinaterne for de individuelle kornkurver I, II og III ved samme givne sigtestørrelse, og  $a + b + c = 100$ .

Tabel 3.9 viser, hvorledes den sammensatte kornkurve kan beregnes for den ovenfor angivne blanding af de tre enkeltfraktioner. Den resulterende kornkurve IV er vist i figur 3.8. Det fremgår af tabel 3.9 og figur 3.8, at kornkurven for det sammensatte materiale ligger inden for de grænser for graderet tilslag, som er anbefalet i tabel 3.2. Det er derfor sandsynligt, at det sammensatte stenmateriale kan bruges til fremstilling af en tilfredsstillende beton. Dette må naturligvis eftervises ved fremstilling af prøveblandinger.

Tabel 3.9. Numerisk eksempel, som illustrerer beregning af ordinaterne for en sammensat kornkurve, når tre enkeltfraktioner stenmateriale med kendte kornkurver sammensættes i vægtforholdene 45% til 32% til 23%

Sigtestørrelse mm	Sammensat stenmateriale IV			
	Sten (I) 19-38 mm	Sten (II) 9.6-19 mm	Sten (III) 4.8-9.6 mm	45% (I) + 32% (II) + 23% (III)
	tilbageholdt %	tilbageholdt %	tilbageholdt %	gennemfald $\frac{45}{100} \times y_I$
76	100	100	100	gennemfald $\frac{32}{100} \times y_{II}$
38	95	100	100	gennemfald $\frac{23}{100} \times y_{III}$
19	5	95	100	gennemfald $\lambda\% Y_{IV}$
9.6	0	5	95	sammensat stennat.
4.8	0	0	5	100
2.4	0	0	0	98
				55
				24
				1
				0

3.2.3.4 Regneeksempel nr. 3. Sammensætning af tre eller flere, mere eller mindre tilfældigt graderede sand- eller stenfraktioner til et betontilslag med ønsket gradering

Det antages, at der leveres tre stenfraktioner til en byggeplads, nemlig (C) 32-16 mm, (B) 16-8 mm og (A) 8-4 mm. Det var oprindeligt forudsat, at der højst måtte forekomme 5% over- og underkorn i hver enkelt fraktion. Det fremgår imidlertid af tabel 3.10, at denne forudsætning ikke er opfyldt. Problemet er nu at sammensætte de tre fraktioner, som de i virkeligheden leveres, til et acceptabelt 32 - 4 mm stenmateriale med en gradering, der så tæt som muligt følger den anbefalede gradering i tabel 3.8. En grafisk metode til løsning af det generelle problem, nemlig at sammensætte et ubegrænset antal tilslagsfraktioner med mere eller mindre tilfældig gradering til det bedst muligt betontilslag, er beskrevet og illustreret i det følgende.

Tabel 3.10 angiver graderingen af de tre stenfraktioner A, B og C, medens D angiver den ønskede gradering af det samlede stenmateriale, således som den fremgår af tabel 3.8.

Tabel 3.10. Gradering af tre stenfraktioner, A, B, og C, samt ønsket gradering af samlet stenmateriale

Sigtestørrelse mm	Procentuelt gennemfald			
	A	B	C	D ønsket
32	100	100	100	100
16	100	93	30	55
8	100	12	0	23
4	18	0	0	0

Opgaven løses på følgende måde:

- På et stykke millimeterpapir tegnes et koordinatsystem, f.eks. som vist på figur 3.9. Ordinataksen inddeles i 0-100% vægtmængde materiale, som passerer de forskellige sigter (procentuelt gennemfald).
- Der trækkes en ret line fra punkt a i det ene hjørne af koordinatsystemet til punkt h i det andet hjørne, som vist i figur 3.9.

- På ordinataksen afmærkes de vægtprocenter, som man ønsker skal passere de forskellige sigter for det samlede stenmateriale (D), således her 0%, 23%, 55% og 100%. Derefter trækkes vandrette linier fra disse punkter på ordinataksen til skæring med den skrå linie a-h i punkterne a, b, d og h, som vist i figur 3.9.
- Der trækkes nu lodrette linier fra punkterne a, b, d og h til skæring med abscisseaksen i punkterne a, e, f og g. Disse punkter identificeres med sigtestørrelsen svarende til det ønskede procentuelle gennemfald. I figur 3.9 således a = 4 mm (0%), e = 8 mm (23%), f = 16 mm (55%) og g = 32 mm (100%). Inddelingen af abscisse-aksen bliver således helt tilfældig.
- For hver enkelt stenfraktion afsættes vægtprocenten materiale, som passerer de enkelte sigter, lodret over a, e, f og g som sorte punkter i figur 3.9. Derefter indtegnes den skrå linie gennem disse punkter for hvert enkelt fraktion (hvis der er flere end to punkter for hver fraktion, indtegnes den stejlest mulige linie gennem punkterne). På figur 3.9 er disse linier betegnet med bogstaverne A, B og C.
- Der tegnes nu en punkteret ret linie mellem punkt P, som er det punkt, hvor den stejlest mulige linie for det fineste materiale A skærer den vandrette linie for 100 vægtprocent passerende materiale, og punkt Q, hvor den stejlest mulige linie for det næstfineste materiale B skærer den vandrette linie for 0 vægtprocent passerende materiale. Der tegnes en lignende punkteret ret linie fra punkt R, hvor den stejlest mulige linie for det næstfineste materiale B skærer den vandrette linie for 100 vægtprocent passerende materiale, og punkt S, hvor den stejlest mulige linie for det groveste materiale skærer den vandrette linie for 0 vægtprocent passerende materiale.
- Endelig trækkes vandrette linier fra skæringspunkterne mellem linierne PQ og RS, og linien a-h (d.v.s. fra punkterne v og w), og hvor disse vandrette linier skærer ordinataksen (d.v.s. i punkterne x og z) aflæses de procentuelle mængder af de tre individuelle stenfraktioner, som skal blandes, for at det sammensatte materiales virkelige kornkurve skal ligge så tæt som muligt ved den ønskede kornkurve.

I vort eksempel er de således aflæste værdier  $x = 18\%$  og  $z = 46\%$ . Det betyder, at vi for at opnå en kornkurve, der ligger tættest muligt ved den ønskede gradering, skal bruge 18% af stenfraktion A,  $46 - 18 = 28\%$  af stenfraktion B og  $100 - 46 = 54\%$  af stenfraktion C.

Resultatet kan kontrolleres ved at multiplicere værdierne for de procentuelle gennemfald for de enkelte stenfraktioner fra tabel 3.10 med 18, 28 og 54, som vist i tabel 3.11.

Tabel 3.11 Beregning af sammensat kornkurve for stenmateriale i henhold til grafisk metode

Sigtestørrelse mm	Procentuelt gennemfald				
	18% A	28% B	54% C	D <sub>opnået</sub>	D <sub>ønsket</sub>
32	18	28	54	100	100
16	18	26	16	60	55
8	18	3	0	21	23
4	3	0	0	3	0

Det fremgår af tabel 3.11, at den bedst mulige kornkurve, som kan opnås for det sammensatte stenmateriale, D<sub>opnået</sub>, ligger rimeligt tæt ved den ønskede kornkurve, D<sub>ønsket</sub>.

Den grafiske metode, som er beskrevet i dette afsnit, udmærker sig ved, at man hurtigt kan vurdere, hvorledes et vilkårligt antal foreliggende sand- og stenfraktioner med vilkårlig gradering bedst kan sammensættes, således at den resulterende kornkurve ligger tættest muligt ved den ønskede kornkurve for et samlet tilslagsmateriale. Metoden er altså ikke begrænset til tre materialer; blot må linier som A, B og C ikke krydse hinanden.

### 3.2.3.5 Stenmaterialets kornform

Stenpartiklernes form er af stor betydning for betonens bearbejdelse. Kantede, spidse, aflange og flade partikler giver anledning til fremstilling af beton, som kræver en høj sandprocent og derfor et højt cementindhold for at blive vel bearbejdelig. Kornformen og den procentuelle vægtmængde knust materiale i tilslaget bestemmes som angivet i DS 405.6 og DS 405.5. Der foreskrives imidlertid sjældent absolutte grænser for det tilladelige indhold af partikler med ugunstig kornform. Uden yderligere tilskyndelse vil en entreprenør nemlig både af økonomiske og tekniske grunde søge at undgå at bruge tilslag med dårlig kornform, såvidt dette overhovedet er muligt. I praksis vil entreprenørens valgmuligheder imidlertid ofte være stærkt begrænsede. De fleste naturligt forekommende stenmaterialer er nemlig uregelmæssige og indeholder en vis procentdel kantede og knuste partikler. Desuden består knust tilslag, såkaldte skærver, altid af kantede partikler med et større eller mindre indhold af flager eller aflange partikler. Råmaterialets sammensætning og struktur, såvel som den type knusemaskineri, der benyttes ved nedknusningen, er afgørende for, hvor store mængder ugunstigt formede partikler

der dannes. Hammermøller giver som regel den bedste kornform, medens kæbe- og rundknusere med et højt forhold mellem størrelse af tilført materiale og produkt giver den dårligste kornform. Ved at foreskrive absolutte grænser for tilslagsets indhold af knuste eller ikke-kubiske partikler risikerer man derfor at tvinge entreprenøren til at anskaffe specialudrustning, eller til at transportere tilslag over lange afstande. Begge dele virker fordyrende på betonen.

Proportioneringsmetoden i dette kompendium er opbygget på en sådan måde, at det er muligt at tage hensyn til, om der bruges naturligt forekommende og afrundet, eller knust og kantet stenmateriale ved betonfremstillingen.

### 3.2.3.6 Sandets kornstørrelsesfordeling

Sandets kornkurve og ensartetheden i sandets gradering er af langt større betydning for den friske betons bearbejdelse og kohæsion, end det er tilfældet for stenmaterialets vedkommende. Dette beror på, at mørtelen, d.v.s. blandingen af sand, cement og vand, fungerer som smøremiddel for den friske beton, og dermed er afgørende for bearbejdelse og kohæsion af betonblandingen som helhed. Stenmaterialet har hovedsagelig en volumenudfyldende funktion, og har derfor mindre indvirkning på disse forhold.

Kornkurven for naturligt forekommende sandmaterialer er sjældent ideel og kræver som regel en vis form for justering. De fleste naturligt forekommende sandmaterialer er enten for grovkornede eller for finkornede, idet de i naturligt forekommende tilstand enten har for lille eller for stor procentuel mængde korn under 0.5-0.6 mm.

I dårligt sorterede flod- og alluvialaflejringer mangler der som regel korn mellem 1 og 6 mm, og i særlig grad mellem 2 og 4 mm. Øjensynligt sker der en naturlig udvaskning af korn i disse fraktioner, når partiklerne sedimenterer. Danske sandmaterialer er som regel dårligt sorteret fra naturens hånd og mangler ofte korn over 1 mm. På den anden side af sagen mangler velsorterede flodaflejringer mange steder i verden filler og fine partikler op til 0.5 mm.

Den mest økonomiske og derfor mest almindelige måde, på hvilken man kan korrigerer et sandmateriales kornkurve, består i at indblende et fint blandings-sand, når udgangsmaterialet er for groft, og et groft blandings-sand, når udgangsmaterialet er for fint graderet. Sand kan dog også opdeles i to eller flere fraktioner i særlige vaskeanlæg, såkaldte klassiflers. De enkelte fraktioner kan derefter atter sammenblandes i andre blandingsforhold, således at betonsandet får en bedre og mere konstant gradering. Brug af sådanne mere raffinerede metoder resulterer imidlertid i et dyrere produkt.

Vanskeligheder med at fremskaffe velgraderet sand og begrænsede sandforekomster har ledt til en ændring af den britiske sand- og grusnorm, BS 882, med henblik på at tillade så bredt et spektrum af sandkornkurver som overhovedet muligt. Ved på passende måde at justere forholdet mellem sten og sand (sandprocenten) i betonen er det nemlig muligt at fremstille brugbar beton, selv om sandets gradering ligger langt fra den ønskelige.

BS 882 bygger på ovennævnte praktiske erfaring, at sandmaterialer naturligt deler sig ved det procentuelle gennemfald på 0.6 mm sigten. Sand klassificeres derfor ifølge BS 882 i fire zoner, således at der ikke forekommer nogen overlappning i det procentuelle gennemfald på 0.6 mm sigten for de forskellige zoner. Kravene til gradering for disse fire zoner, som benævnes 1, 2, 3 og 4, er vist i figurerne 3.10 til 3.13. Et sand siges at høre til den zone, som svarer til dets procentuelle gennemfald på 0.6 mm sigten i henhold til disse figurer.

Ethvert sandmateriale, hvis kornkurve i sin helhed ligger inden for grænserne for en enkelt zone, anses for at være brugbart, men ikke nødvendigvis ideelt til fremstilling af beton. Dog tillades kornkurven at falde 5% uden for grænserne for andre sigter end 0.6 mm sigten. Disse 5% kan fordeles vilkårligt over de andre sigtestørrelser, så længe summen af afvigelserne for hver enkelt sigte ikke overskrider 5%. Det vil sige, at graderingen kan falde 5% uden for grænsen for en enkelt sigte, eller for eksempel 1% uden for grænserne for to sigter, og 3% uden for grænsen for en tredje sigte. Dog må sandets kornkurve aldrig ligge over den øvre grænse for zone 4 eller under den nedre grænse for zone 1. Den eneste undtagelse fra regelen er sand, som fremstilles ved knusning, hvor 20% af materialet tillades at passere 0.15 mm sigten for alle zoners vedkommende.

Ethvert sand, som krydser over fra en zone til en anden, eller som krydser over flere zoner, anses for at være uanvendeligt til betonfremstilling. Sådant sand vil ofte give anledning til fremstilling af en strid og ubearbejdelig beton på grund af tilstedeværelsen af et overskud af partikler i visse fraktioner. Et sådant overskud i visse størrelsesfraktioner kan give anledning til en fastlåsning af den indre bevægelse i betonmassen på grund af friktion mellem tilslagsmaterialerne, såkaldt partikelinterferens.

Sand i zone 2 er ideelt graderet og kan bruges ved enhver form for betonfremstilling. Når man har mulighed for at blande fint og groft sand, bør man altid søge at fremstille et betonsand i zone 2.

I hvert enkelt tilfælde må det bedømmes ved prøveblanding, om der kan fremstilles en brugbar beton med et foreliggende sandmateriale, som måtte være graderet i zone 4. Der er to problemer forbundet med en sådan fremstilling. For det første har beton, der fremstilles med meget fint sand, et betydeligt større vandbehov end beton, der fremstilles med sand i den anbefalede zone 2, hvis de to betoner skal have samme konsistens. Derfor vil cementbehovet for beton, som fremstilles med sand i zone 4, også være meget højere, hvis de to betoner skal have samme styrke. For det andet vil der være en vis risiko for afblanding af større sten i den friske beton, fordi det samlede tilslag altid bliver springgraderet, når fint sand i zone 4 blandes med sten. Størstedelen af sandet i zone 4 er nemlig mindre end 0.6 mm, medens alt stenmaterialet er større end 4 mm. Der mangler altså korn i det kritiske område mellem 0.6 mm og 4 mm. Beton, som fremstilles med springgraderet tilslag er som tidligere nævnt altid mere tilbøjelig til afblanding af stenene end beton, som fremstilles med et kontinuerligt graderet tilslag. Hvis betonen proportioneres korrekt, som det senere er vist, kan problemerne imidlertid løses i mange tilfælde, og sand i zone 4 vil ofte kunne bruges til fremstilling af brugbar beton.

På den anden side vil et groft sand i zone 1 som regel give anledning til fremstilling af en strid betonblanding. I dette tilfælde vil et forholdsvis højt sandindhold være nødvendigt, for at betonen skal få en tilfredsstillende bearbejdelighed. Sand i zone 1 kan være fuldt til-



fredsstillende i fede betonblandinger, d.v.s. betonblandinger med højt cementindhold eller et højt flyveaskeindhold, hvor netop det høje indhold af fine cement- og flyveaskepartikler kompenserer for manglen på partikler i de finere sandfraktioner. For at sand i zone 1 skal fungere tilfredsstillende, må betonen imidlertid også have en forholdsvis stiv konsistens. Hvis sand, som er graderet i zone 1, bruges til fremstilling af magre og bløde blandinger, vil betonen være vanskelig at bearbejde, og der vil være stor risiko både for afblanding af sten og for udskillelse af vand.

Sand i zone 3 har visse af de uheldige egenskaber, som vi finder hos sand i zone 4, men de er mindre udprægede. Ved en fornuftig proportionering vil det som regel være muligt at fremstille tilfredsstillende og rimelig økonomisk beton med sand i zone 3.

Hvis sandets kornkurve ændrer sig fra for eksempel at følge den nedre grænse for zone 1 til at følge den øvre grænse for zone 4, må der tilsættes ca. 25 kg/m<sup>3</sup> mere vand, for at betonen skal bibeholde sin konsistens. Hvis cementindholdet forbliver konstant, vil dette typisk resultere i en forøgelse af vand-cement forholdet på 0.08 og et tilsvarende fald i betonstyrken på ca. 10 MPa. Vandbehovets store afhængighed af sandets gradering er grunden til, at man med alle midler må søge at reducere variationer i sandets kornkurve under betonproduktionen. Selv små ændringer i sandets gradering giver anledning til betydelige variationer i betonstyrken. Variationer i betonens bearbejdelighed korrigeres nemlig i praksis ved, at blademesteren ændrer vandtilsætningen uden samtidig at korrigere cementindholdet. I praksis får vand-cement forholdet således lov til at variere. Som vi senere skal få at se, giver store variationer i styrkeresultaterne automatisk anledning til krav om, at betonen skal proportioneres for en højere middelstyrke. Forekomsten af store styrkevariationer betyder derfor, at betonen må fremstilles med et højere cementindhold for at overholde kravet om en vis karakteristisk styrke.

### 3.2.3.7 Filler

Hvis en frisk betonblanding skal blive kohæsiv og velbearbejdelig; hvis man skal undgå afblanding af sten og udskillelse af vand; og hvis man ønsker, at den hærdnede beton skal blive vandtæt, må man sørge for, at sandet indeholder tilstrækkeligt store mængder filler. I britisk og

amerikansk terminologi bruges betegnelsen "fines" for tilslagsmaterialer, som er finere end 0.3 mm. I henhold til dansk terminologi bruges betegnelsen "filler" for materiale, som er finere end 0.25 mm. Da cementpartiklerne bidrager til denne kornstørrelsesfraktion, kræver en fed betonblanding mindre filler i tilslaget end en mager blanding.

Filler skal helst bestå af regulære mineralkorn og bør kun indeholde små mængder silt, d.v.s. materiale mellem 0.06 og 0.002 mm, og slet intet ler, d.v.s. materiale under 0.002 mm.

For at undgå udskillelse af vand fra den friske beton og for at sikre, at den hærdnede beton bliver vandtæt, bør man kræve, at vægtforholdet mellem vand og cement plus fint materiale under 0.15 mm, henholdsvis 0.125 mm (f.eks. mineralsk filler, flyveaske og mikrosilica\*) aldrig er større end 0.45 for en blød betonblanding med sætmål større end 60 mm, og større end 0.50 for en stiv betonblanding med sætmål mindre end 60 mm. Tabel 3.12 giver visse supplerende retningslinier i henhold til DIN 1045 for betonens optimale indhold af mineralsk filler (inkl. flyveaske og mikrosilica). Det bemærkes, at tabel 3.12 gælder for materiale mindre end 0.30 og 0.25 mm, ikke som det var tilfældet ved den ovenfor nævnte regel for materiale mindre end 0.15 og 0.125 mm. Når der bruges luftindblandende tilsætningsstoffer ved fremstilling af beton, er det optimale indhold af cement plus filler i betonen noget lavere end de i tabel 3.12 angivne værdier. Det beror på, at de små indblandede luftbobler har samme gunstige virkning på blandingens egenskaber som mineralsk fillermateriale.

Ved fremstilling af vandtæt beton er det af særlig betydning, at sandet indeholder tilstrækkeligt store mængder filler. Svenske bestemmelser kræver således for vandtæt beton, at mindst 15% af sandet skal passere 0.25 mm sigten. I DS 411 kræves, at vandtæt beton skal indeholde mindst 375 kg/m<sup>3</sup> cement plus filler (inkl. flyveaske og mikrosilica) passerende 0.25 mm sigten. De danske krav er således mindre strenge end de tilsvarende tyske krav i tabel 3.12.

Det er vigtigt, at sandet indeholder tilstrækkeligt store mængder fint materiale; men det er lige så vigtigt, at sandets kornkurve ikke overskrider de øvre zonegrænser i BS 882. Store mængder filler, ud over

\* Flyveaske og mikrosilica behandles nærmere i afsnit 3.3.1.

hvad der er nødvendigt for at opnå god bearbejdelighed og kohæsion hos den friske beton, og ud over hvad der er nødvendigt for at sikre vandtætheden hos den hårdnede beton, ødelægger produktionsøkonomien og har en negativ indvirkning på mange af betonens tekniske egenskaber. Vandbehovet øger nemlig kraftigt med fillerindholdet for uforandret betonbearbejdelighed. Dermed bliver betonens cementbehov større for uforandret betonstyrke. Et højt cementindhold øger imidlertid betonens varmeudvikling og svind og dermed risikoen for, at der skal opstå revner.

Tabel 3.12. Nødvendigt fillerindhold, mindre end 0.3 mm eller 0.25 mm, for optimal kohæsion hos frisk beton og god vandtæthed hos hårdnet beton (udarbejdet på grundlag af den tyske betonnorm, DIN 1045)

Maksimal stenstørrelse i mm	Anbefalet mængde cement plus filler (incl. flyveaske og mikrosilica) under 0.25 mm pr. m <sup>3</sup> beton, i kg
10 eller 8	525
20 eller 16	450
40 eller 32	400
75 eller 64	325

Hvis sandet ikke i sig selv indeholder tilstrækkeligt store mængder filler, hjælper det ikke blot at øge sandprocenten i tilslaget. Hvis man forøger sandprocenten, vil dette nemlig automatisk medføre et overskud af materiale i de mellemliggende fraktioner. Dette vil vise sig som et stejlt trin i kornkurven for det samlede tilslag. Et overskud af materiale i visse mellemliggende fraktioner kan resultere i en fastlåsning af tilslagspartiklerne og fremstilling af strid beton, som er vanskelig at komprimere. Det er meget almindeligt, at vasket sand har et underskud af filler, idet det naturligt forekommende fillermateriale forsvinder med vaskevandet. Filleret kan kun genvindes ved at lade vaskevandet passere gennem en såkaldt hydrocyklon.

Hvis sandet af en eller anden grund ikke indeholder tilstrækkeligt store mængder filler, bør denne mangel afhjælpes ved, at man tilsætter et blandingssand, det i en hydrocyklon genvundne naturlige filler, et inert

mineralsk filler som f.eks. finmalet kalksten, eller et pulverformigt pozzolanmateriale som f.eks. flyveaske eller mikrosilica. Luftindblanding vil også kunne forbedre betonens bearbejdelighed og kohæsion og dermed reducere risikoen for afblanding af sten eller udskillelse af vand hos frisk beton, når denne fremstilles med sand, der indeholder for lidt filler.

Sandmaterialer med snæver korngradering, f.eks. strand- og ørkensand, har en stejl kornkurve, som krydser over to eller flere zoner. Sådanne sandmaterialer giver altid anledning til fremstilling af strid beton på grund af partikelinterferens. Kornkurven må derfor justeres, således at den i sin helhed bringes til at falde inden for en af de anbefalede BS-zoner. Hvis dette ikke kan lade sig gøre, kan det i visse tilfælde hjælpe, at man justerer blandingen, således at stenene får et overskud af 4-8 mm, henholdsvis 5-10 mm materiale.

#### 3.2.3.8 Regneeksempel nr. 4. Fremstilling af betonsand med gradering inden for en af BS zonerne ved blanding af groft og fint sand

Det følgende eksempel viser, hvorledes to forskellige sandmaterialer (V) og (VI), som hver for sig er uanvendelige til betonfremstilling, kan blandes til et tilfredsstillende sand med en kornkurve, der i sin helhed forløber inden for zone 2. De oprindelige kornstørrelsesfordelinger er vist i tabel 3.13 og i sigtediagrammet i figur 3.14. Sand V er for fint med en kornkurve, der ligger over den øvre grænse for zone 4. Sand VI er til gengæld for groft med en kornkurve, der ligger under den nedre grænse for zone 1. Man ønsker at blande de to sandmaterialer i sådanne forhold, at kornkurven for slutproduktet i sin helhed falder inden for grænserne for zone 2.

Når der foreligger to tilslagsmaterialer med forskellig gradering, kan man altid få opfyldt et ønske om, at kornkurven for et blandet tilslag skal passere gennem ét vilkårligt valgt punkt i diagrammet, såfremt dette punkt ligger mellem kornkurverne for de to udgangsmaterialer. Når der foreligger tre tilslagsmaterialer med forskellige kornkurver, kan man altid få opfyldt et ønske om, at kornkurven for det blandede tilslag skal passere gennem to vilkårligt valgte punkter, beliggende mellem kornkurverne for de tre udgangsmaterialer. For fire udgangsmaterialers vedkommende kan man altid få opfyldt et ønske om, at kornkurven for det blandede tilslag skal passere gennem tre punkter, o.s.v.

Når der skal fremstilles et tilslag ved blanding af to udgangsmaterialer, er det lettest at bestemme blandingsforholdene ved beregning, som vist i dette eksempel. Når tilslaget skal fremstilles ved blanding af flere udgangsmaterialer, kræver beregningsmetoden imidlertid, at man løser flere ligninger med flere ubekendte, og det vil som regel være hurtigere at løse problemet ved hjælp af den grafiske metode, som er demonstreret i regneeksempel nr. 3.

Som udgangspunkt i det foreliggende eksempel kan man passende kræve, at den sammensatte kornkurve skal passere gennem et punkt svarende til, at 45% af det blandede materiale skal passere 0.6 mm sigten. De blandingsforhold mellem sand V og sand VI, der er nødvendige for at opfylde dette krav, kan beregnes på følgende måde:

På grundlag af ligning (3.1) fås

$$45 = Y_V \frac{x}{100} + Y_{VI} \frac{(100-x)}{100} \quad (3.1a)$$

hvor x er ukendt mængde sand V i procent af mængden blandet sand,  $Y_V$  er procentuelt gennemfald på 0.6 mm sigten for sand V, og  $Y_{VI}$  er procentuelt gennemfald på 0.6 mm sigten for sand VI.

Idet vi indsætter de numeriske værdier fra tabel 3.13, nemlig  $Y_V = 85$ , svarende til 85% gennemfald for sand IV på 0.6 mm sigten, og  $Y_{VI} = 10$ , svarende til 10% gennemfald for sand VI på 0.6 mm sigten, får vi:

$$45 = 85 \frac{x}{100} + 10 \frac{(100-x)}{100}$$

Ved løsning af ligningen fås:

$$x = 47\%$$

Der kræves altså en blanding af 47% sand V og  $(100 - 47) = 53\%$  sand VI, for at kornkurven for det blandede materiale skal få et gennemfald på 45% på 0.6 mm sigten. Tabel 3.13 viser, hvorledes kornkurven for det blandede tilslag kan beregnes på grundlag af disse blandingsforhold.

Tabel 3.13. Regneeksempel, som illustrerer beregningen af ordinater for en samlet kornkurve, når et fint sand V og et groft sand VI med kendte kornkurver blandes i forholdet 47:53

Sigte størrelse mm	Sand VI Gennemfald $\sum \%$ $Y_V$	Sand V Gennemfald $\sum \%$ $Y_{VI}$	Sammensat (VII) 47% V + 53% VI		
			Gennemfald $\sum \%$ $\frac{47}{100} \times Y_V$	Gennemfald $\sum \%$ $\frac{53}{100} \times Y_{VI}$	Gennemfald $\sum \% Y_{VII}$ Sammensat
9.6	100	100	47	53	100
4.8	100	100	47	53	100
2.4	100	62	47	33	80
1.2	100	30	47	16	63
0.6	85	10	40	5	45
0.3	60	0	27	0	27
0.15	30	0	14	0	14
0.075	0	0	0	0	0

Den sammensatte kornkurve er vist i figur 3.14. Det fremgår, at kurven i sin helhed ligger inden for grænserne for zone 2, med undtagelse af et overskud på 4% af fint materiale mindre end 0.15 mm. Da kornkurvens samlede afvigelse fra grænserne for BS zone 2 er mindre end 5%, opfylder det sammensatte sandmateriale således de stillede krav.

### 3.2.3.9 Blandingsforholdet mellem sand og sten (sandprocenten)

Fastlæggelse af den optimale sandprocent indgår som et betydningsfuldt led i enhver betonproportionering. Den optimale sandprocent vil med et minimum af vand og derfor med et minimum af cement give anledning til fremstilling af en beton med den foreskrevne styrke, uden at stenene afblandes eller vandet udskilles.

Sandprocenten må ikke være så lav, at mørtelen er ude af stand til fuldstændigt at udfylde hulrummene mellem stenpartiklerne. Hvis blandingen ikke indeholder en tilstrækkelig stor mængde sand, siger man, at den er undersandet. Større sten afblandes let fra undersandede betonblandinger. Dette gælder i særlig grad, når sådanne blandinger er tørre og stive. Undersandede blandinger er vanskelige at udstøbe og komprimere. Der dannes let stenreder, hvor hulrummene mellem stenpartiklerne ikke er udfyldt med mørtel. Dette resulterer i en uæstetisk, porøs og uholdbar beton. Ved visuel bedømmelse er det let at afgøre, om en beton er undersandet. Hvis dette er tilfældet, vil der ikke være tilstrækkeligt med mørtel til at dække alle stenpartiklerne. Sætmålskeglen sønderfalder, når man slår let på den med sætmålets stikstang. Blandingen har ingen kohæsion, når den knuges i hånden; og det er vanskeligt eller umuligt at afglatte betonen til en jævn overflade.

På den anden side af sagen må sandprocenten heller ikke være så høj, at stenpartiklerne helt forsvinder i mørtelen. Hvis dette er tilfældet, siges blandingen at være oversandet. Oversandede betonblandinger er som regel kohæsive, men samtidig kan de være klæge og vanskelige at komprimere. Oversandede blandinger kan være stride, hvis de indeholder et overskud af materiale i sandfraktionen mellem 0.15 og 0.6 mm. En oversandet betonblanding er vanskeligere at afsløre visuelt end en undersandet blanding. Som regel får den oversandede beton dog små pyramideformede totte, når sætmålskeglen fjernes, fordi betonen klæber til metallet. Desuden får den oversandede betonoverflade et kornet udseende, når den glittes.

En oversandet blanding kræver mere vand for at opnå samme bearbejdelighed som en blanding med optimal sandprocent. Hvis de to blandinger skal få samme vand-cement forhold og styrke, må en oversandet blanding derfor være federe, d.v.s. indeholde mere cement, end en tilsvarende blanding med optimal sandmængde. På grund af det højere cementindhold er en oversandet, frisk betonblanding mindre økonomisk, og den hærtnede beton vil få højere svind og krybning, lavere slidstyrke, og være mere tilbøjelig til at revne og krakelere, end en blanding med optimal sandprocent.

Sandprocenten bør vælges således, at stenpartiklerne i den friske beton er dækket af et mørtellag, men mange partikler skal stadig være synlige i massen. Ved afglatning skal alle mellemrum mellem stenpartiklerne let udfyldes med mørtel, og der skal uden vanskelighed kunne frembringes en glat overflade. Den optimale sandprocent afhænger af sandets kornform, de enkelte partiklers kantethed og overfladestruktur, største forekommende stenstørrelse, sand- og stenmaterialets gradering, cementindholdet, og betonens konsistens. Den optimale sandprocent er karakteriseret ved, at den frembringer en kohæsiv beton med foreskrevet konsistens ved tilsætning af den mindst mulige mængde vand.

Det er vanskeligere at vælge korrekt sandprocent, jo nærmere sandkurven ligger den øvre grænse for den fine zone 4 og den nedre grænse for den grove zone 1. Det endelige valg af sandprocent kan først træffes i forbindelse med prøveblandinger. Figur 3.24 giver visse retningslinier for valg af en foreløbig sandprocent, der kan bruges ved proportionering af en udgangsblanding. Ved brug af figur 3.24 er det muligt at tage hensyn til de vigtigste parametre såsom den zone, i hvilken sandet ligger, betonens konsistens, det frie vand-cement forhold og den største forekommende stenstørrelse.

For hver af sandzonerne 1-4 er der angivet et område i figur 3.24, inden for hvilket sandprocenten bør vælges. Hvis sandets kornkurve ligger lavt i den pågældende zone, eller hvis stenene indeholder mange kantede, spidse, aflange eller flade partikler, eller hvis stenene er ru, bør sandprocenten vælges nær den øvre grænse af området. Hvis sandets kornkurve ligger højt i den pågældende zone, eller hvis stenene er afrundede, kugleformede og glatte, bør sandprocenten vælges nær den nedre grænse af området.

En sandprocent, der er aflæst af figur 3.24, vil som regel give anledning til fremstilling af beton, der har tilfredsstillende bearbejdelighed og kohæsion allerede ved den første prøveblending. Hvis dette undtagelsesvis skulle vise sig ikke at være tilfældet, kan betonblandingen justeres ved forprøvningen, på grundlag af de principper, der fremgår af afsnit 4.4.5 til 4.4.8.

I en løbende betonproduktion bør man kompensere for sådanne variationer i betonens bearbejdelighed, som måtte opstå på grund af en ændring af sandets gradering, ved at justere sandprocenten, snarere end ved at justere vandindholdet. Figur 3.24 viser, hvorledes sandprocenten kan reduceres, når sandet bliver finere, og forøges, når sandet bliver grovere.

Det fremgår af figur 3.24, at den optimale sandprocent antager en ekstrem værdi på 80% for en beton, der fremstilles med 10 mm maksimal kornstørrelse, et effektivt vand-cement forhold på 0.80, et sætmål på 6-18 cm, og som fremstilles med groft sand i zone 1. Den anden yderlighed er en 15% optimal sandprocent for en beton, som fremstilles med en maksimal stenstørrelse på 40 mm, et vand-cement forhold på 0.30, et sætmål på 0-1 cm, og som fremstilles med fint sand i zone 4.

Når kornkurven for det samlede tilslag er beregnet, bør den indtegnes i den af figurerne 3.15 til 3.20, der svarer til den foreskrevne maksimalt tilladelige stenstørrelse. Det kontrolleres derefter, om kornkurven er rimelig jævn og iøvrigt ligger inden for de anbefalede zonegrænser. Uregelmæssigheder i den samlede kornkurve, eller store afvigelser fra de anbefalede zoner, er tegn på, at den friske beton sandsynligvis er uøkonomisk og muligvis vil være vanskelig at bearbejde. Et nærmere studie af kornkurven kan give et fingerpeg om, hvorledes problemerne bedst kan løses. Dette spørgsmål behandles nærmere i afsnit 4.4.5 til 4.4.8.

Grænsekurverne, som er mærket med tallet 1 i figur 3.15 til 3.17 og kurverne A i figur 3.18 til 3.20, angiver den groveste gradering for det samlede tilslag, som kan anbefales til brug ved fremstilling af beton. Et tilslag med en kornkurve, der nærmer sig grænserne 1 eller A, bør kun bruges, såfremt vand-cement forholdet er lavt, blandingen er fed, og såfremt det kan påvises ved prøvestøbning, at der ikke sker afblanding eller vandudskillelse eller begge dele i den friske beton. Den

anden yderlighed, et tilslag med en kornkurve i nærheden af grænserne 4 eller C i figur 3.15 til 3.20, repræsenterer en ekstremt fin gradering, som sandsynligvis vil give anledning til fremstilling af en kohæsiv, men ikke nødvendigvis en velbearbejdelig og økonomisk beton. I den forbindelse bør det bemærkes, at et overskud af sand i fraktionerne mellem 1 og 5 mm vil give en strid beton. Det vil ofte være tilfældet, når stenmaterialet indeholder store mængder underkorn, for hvilke der ikke korrigeres.

Der skal bruges betydeligt mere vand for at opnå samme bearbejdelighed, når en beton fremstilles med tilslag, der har en kornkurve i nærheden af grænsekurverne 4 eller C, end når betonen fremstilles med tilslag, der har en kornkurve i nærheden af grænsekurverne 1 eller A. Dette betyder, at førstnævnte beton vil have lavere styrke for samme cementindhold. Hvis der kræves samme styrke af de to betoner, skal cementindholdet være væsentligt større for betonen med det fint graderede tilslag end for betonen med det groft graderede tilslag.

Det kan anbefales, omend det ikke er absolut nødvendigt, at kornkurven for det samlede tilslag i sin helhed forløber inden for en og samme zone, og om muligt mellem grænsekurverne 2 og 3 i figur 3.15 til 3.17, eller mellem grænsekurverne A og B i figur 3.18 til 3.20. Hvis kornkurven krydser over en eller flere zonegrænser, vil der være risiko for afblanding af stenene. Risikoen for afblanding øger, hvis der mangler flere størrelsesfraktioner.

Risikoen for afblanding er særlig stor for spring-graderet tilslag, hvor kornkurven har et eller flere vandrette trin. På den anden side af sagen vil blandingen være strid og vanskelig at komprimere, hvis der forekommer et overskud af visse størrelsesfraktioner. Dette leder nemlig til partikelinterferens. Et lodret trin i kornkurven for det samlede tilslag bør således altid opfattes som en advarsel om, at betonen kan blive strid. Disse problemer diskuteres i afsnit 4.4.5 til 4.4.8, hvor almindeligt forekommende fejl i friske betonblandinger behandles nærmere.

3.2.3.10 Regneeksempel nr. 5. Korrektion for under- og overkorn

Stenmaterialer leveres ofte med en forholdsvis stor mængde underkorn, mindre end 4-5 mm, og sand leveres undertiden med en vis mængde overkorn, større end 4-5 mm. Ved proportionering af beton, efter den i dette kompendium angivne metode, er den sandprocent, der bestemmes på grundlag af figur 3.24, defineret som den reelle mængde materiale i procent af det samlede tilslag, som skal passere 4 eller 5 mm sigten. For at bestemme de vægtmængder af de leverede sand- og stenmaterialer, der skal bruges ved betonfremstillingen for at opnå denne reelle sandprocent, er det nødvendigt at korrigere for underkorn i stenene og for overkorn i sandet. Denne korrektion foretages som vist i det følgende.

Ordinaterne for et tilslagsmateriales kornkurve, som er sammensat i blandingforholdene Sa% sand til St% sten, kan beregnes ved hjælp af ligning 3.2.

$$Y_{\text{tilslag}} = \frac{Sa}{100} \times Y_{\text{sand}} + \frac{St}{100} Y_{\text{sten}} \quad (3.2)$$

$Y_{\text{tilslag}}$  = ordinaten for den sammensatte kornkurve ved 4 mm eller 4.8 mm sigten, beroende på om der bruges ISO eller ASTM sigter.  $Y_{\text{tilslag}}$  svarer til den optimale vægtprocent materiale mindre end 4 mm eller 4.8 mm i det samlede tilslagsmateriale, som aflæst af figur 3.24. Hvis en foreliggende beton i henhold til figur 3.24 kræver en reel sandprocent på 36, indsættes  $Y_{\text{tilslag}} = 36$ .

$Y_{\text{sand}}$  = ordinaten for det foreliggende sandmateriales kornkurve ved 4 mm eller 4.8 mm sigten. Hvis det foreliggende sand således indeholder 2 vægtprocent overkorn, indsættes  $Y_{\text{sand}} = 100 - 2 = 98$ .

$Y_{\text{sten}}$  = ordinaten for det foreliggende stenmateriales kornkurve ved 4 mm eller 4.8 mm sigten. Hvis det foreliggende samlede stenmateriale indeholder 7% underkorn, indsættes  $Y_{\text{sten}} = 7$ .

St = den vægtprocent af det foreliggende stenmateriale, som betonen skal fremstilles med, for at det sammensatte tilslagsmateriale kan opnå den ønskede reelle vægtprocent materiale mindre end 4 mm eller 4.8 mm.

Sa = den vægtprocent af det foreliggende sandmateriale, som betonen skal fremstilles med, for at det sammensatte tilslagsmateriale kan opnå den ønskede reelle vægtprocent materiale mindre end 4 mm eller 4.8 mm. Sa kaldes også den tilsyneladende sandprocent.

Da  $St = 100 - Sa$  fås af ligning 3.2

$$Y_{\text{tilslag}} = \frac{Sa}{100} \times Y_{\text{sand}} + \frac{100 - Sa}{100} Y_{\text{sten}} \quad (3.3)$$

og løses ligning 3.3 med hensyn til Sa, fås

$$Sa = \frac{Y_{\text{tilslag}} - Y_{\text{sten}}}{Y_{\text{sand}} - Y_{\text{sten}}} \times 100 \quad (3.4)$$

Hvis det foreliggende sandmateriale således indeholder 2 vægtprocent overkorn, og det foreliggende stenmateriale indeholder 7 vægtprocent underkorn, og hvis en foreliggende beton kræver en reel sandprocent på 36 i henhold til figur 3.24, fås en tilsyneladende sandprocent på 32 ved indsætning i 3.4, som følger:

$$Sa = \frac{36 - 7}{98 - 7} \times 100 = 32 \text{ vægtprocent}$$

Det vil sige, at den foreliggende beton skal fremstilles med 32 vægtprocent af det foreliggende sandmateriale for at opnå en reel sandprocent på 36. Den resterende del af materialet mindre end 4 mm eller 4.8 mm tilføres automatisk tilslaget i form af underkorn i stenmaterialet.

3.2.3.11 Regneeksempel nr. 6. Sammensætning af sten og sand til et velgraderet betontilslagsmateriale

Ved en forudgående betonproportionering har en entreprenør, på grundlag af figur 3.24, skønnet, at den optimale sandprocent er 33%. Entreprenøren ønsker at sammensætte sit tilslag af det sammensatte sand VII, som han beregnede i regneeksempel nr. 4, og det sammensatte stenmateriale IV, som han beregnede i regneeksempel nr. 2. Graderingen for sand og sten er angivet i tabel 3.14. Ved korrektion for overkorn i sandet og underkorn i stenene fås den tilsyneladende sandprocent Sa:



Tabel 3.14. Regneeksempel, som illustrerer, hvorledes ordinaterne for den samlede kornkurve beregnes, når sand VII og sten IV blandes i forholdene 32% sand VII til 68% sten IV

Sigte størrelse mm	Sammensat sand (VII) gennemfald Σ %	Sammensat stenmateriale (IV) gennemfald Σ %	Samlet tilslag (VIII) 32% sand + 68% sten		Gennemfald Σ % samlet tilslag VIII
			Gennemfald Σ % $\frac{32}{100} \times \text{sand}$ VII	Gennemfald Σ % $\frac{68}{100} \times \text{sten}$ IV	
76	100	100	32	68	100
38	100	98	32	67	99
19	100	55	32	37	69
9.6	100	24	32	16	48
4.8	100	1	32	1	33
2.4	80	0	26	0	26
1.2	63	0	20	0	20
0.6	45	0	14	0	14
0.3	27	0	9	0	9
0.15	15	0	5	0	5
0.075	0	0			

$$S_a = \frac{y_{\text{tilslag}} - y_{\text{sten}}}{y_{\text{sand}} - y_{\text{sten}}} \times 100 = \frac{33 - 1}{100 - 1} \times 100 = 32\%$$

Tabel 3.14 viser, hvorledes den samlede kornkurve kan beregnes under de givne forudsætninger. Den sammensatte kornkurve er indtegnet på figur 3.21. Det fremgår af figuren, at kornkurven i det store og hele falder i zone B mellem grænsekurverne 2 og 3 som angivet i figur 3.17. Kornkurven for det sammensatte tilslag er således den bedst tænkelige og vil antagelig ikke give anledning til problemer. Vi bemærker, at den virkelige sandprocent for det sammensatte tilslag er 33% som ønsket.

#### 3.2.4 Tilsætningsstoffers betydning for betons konsistens

Tilsætningsstoffer kan iblandes den friske beton med formål at forbedre betonens bearbejdelse. De virkninger, som dette måtte have på den hårdnede betons holdbarhed og styrke, diskuteres nærmere i afsnit 3.3.5, 3.4.4 og 3.6.1 til 3.6.3. Mere generelle retningslinier for anvendelse af tilsætningsstoffer i beton findes i Dansk Ingeniørforenings "Anvisning i brug af tilsætningsstoffer til beton", NP-111-R.

Luftindblanding forbedrer både betonens konsistens i almindelighed og bearbejdelsen af stride betonblandinger. Desuden modvirker luftindblanding tendens til afblanding af sten og udskillelse af vand.

Hvis der indblandes 4% luft i en beton, vil dette rundt regnet øge betonens konsistens til den næst-højere kategori i tabel 3.32. Dette betyder for eksempel, at en luftindblandet beton, som skal have et sætmål på 30-60 mm, vil have et vandbehov svarende til en tilsvarende ikke-luftindblandet beton med et sætmål på 10-30 mm i henhold til tabel 3.32. Samtidig vil blandingen blive mere kohæsiv og udvise mindre tendens til afblanding af sten og udskillelse af vand. Blanding vil derfor være lettere at transportere, udstøbe og komprimere.

Desværre reduceres betonens trykstyrke samtidig med ca. 5.5% for hver procent luft, der indblandes. I hvert enkelt tilfælde må blandingsforholdene korrigeres under hensyntagen til denne styrkereduktion ved omproportionering af betonen. De dermed forbundne problemer diskuteres nærmere i afsnit 3.6.

Når der bruges luftindblandende tilsætningsstoffer ved betonfremstillingen, kræves der en strengere betonkontrol, end det er tilfældet ved fremstilling af almindelig beton. Luftindholdet i frisk beton måles i henhold til DS 423.11. Se i øvrigt afsnit 4.4.2.

Vand-reducerende eller plastificerende tilsætningsstoffer, som de også kaldes, kan enten blandes i betonen med formål at reducere betonens vandbehov uden at ændre dens konsistens, eller med formål at øge betonens konsistens uden at ændre dens vandbehov. Den betydning, som dette kan have for betonens holdbarhed og styrke, diskuteres i afsnit 3.3.5 og 3.4.4. Efter deres funktion inddeles disse tilsætningsstoffer i (1) vand-reducerende, (2) vand-reducerende og afbindingsforsinkende og (3) vand-reducerende og styrke-accelererende. ASTM Standard C 494 stiller krav til ydeevnen for vand-reducerende tilsætningsstoffer, både for hvad angår størrelse af vandreduktionen og indflydelsen på betonens styrke efter 3, 7 og 28 døgn, samt efter 6 måneder og efter 1 år.

I lighed med, hvad der er tilfældet ved tilsætning af luftindblandende tilsætningsstoffer, øges betonens konsistens også ved tilsætning af 0.2-0.4 vægtprocent normale plastificeringsstoffer til næst-højere kategori i tabel 3.32. Det betyder, at en plastificeret beton, som skal have et sætmål på 30-60 mm, vil have et vandbehov svarende til en ikke-plastificeret beton med et sætmål på 10-30 mm i henhold til tabel 3.32. I modsætning til, hvad der er tilfældet ved tilsætning af luftindblandende tilsætningsstoffer, sker der imidlertid ingen reduktion af betonens styrke ved tilsætning af plastificeringsstoffer, for så vidt som vand-cement forholdet holdes konstant. Ej heller forbedres betonens kohæsion. Almindelige plastificeringsstoffer kan imidlertid ikke tilsættes betonen i større mængder end 0.2-0.4% af cementvægten, uden at dette får uheldige indvirkninger på betonens afbinding.

Særligt aktive, såkaldte superplastificeringsstoffer kan derimod tilsættes betonen i mængder på 0.8-2 vægtprocent af cementvægten, uden at der optræder alvorlige bivirkninger. Alt andet lige vil tilsætning af superplastificeringsstoffer kunne reducere betonens vandbehov med op til 30%. Hvis betonens cementindhold reduceres tilsvarende, d.v.s. hvis det frie vand-cement forhold bibeholdes uforandret, så vil betonens styrke

også forblive uforandret. Hvis betonens cementindhold derimod forbliver uforandret, reduceres vand-cement forholdet, og betonens styrke forøges. Ved meget lave vand-cement forhold  $< 0.35$  kan denne virkning af superplastificeringsstoffer udnyttes til fremstilling af højstyrkebeton. En nærmere diskussion af højstyrkebetoner ligger dog uden for rammerne af dette kompendium.

Modsvarende, hvis der tilsættes betonen superplastificeringsstoffer svarende til 0.8-2 procent af cementvægten, og hvis sandprocenten samtidig øges med 5%, kan der fremstilles kohæsive, såkaldte flydebetoner med udbredelsesmål mellem 55 og 63 cm, der med lethed kan pumpes, og som er selvkomprimerende og selvnivellerende uden brug af vibratorer. En nærmere diskussion af flydebetoner ligger også uden for rammerne af dette kompendium.

En forsinkelse af betonens afbindingstid kan opnås ved at blande et retarderende eller afbindingsforsinkende tilsætningsstof i betonen. Afbindingsforsinkende tilsætningsstoffer bruges ved støbning af beton i varmt vejr. Ved høje temperaturer kan betonens normale afbindingstid nemlig reduceres så meget, at man ikke kan nå at transportere, udstøbe, komprimere og overfladebehandle betonen, inden den taber sin bearbejdelighed. Retarderende tilsætningsstoffer finder også anvendelse ved glideformsstøbning, og når frisk beton skal transporteres over lange afstande. Ved brug af retarderende tilsætningsstoffer kan betonens bearbejdelighed bibeholdes op til et døgn eller længere. Man skal imidlertid være opmærksom på, at afbindingsforsinkende tilsætningsstoffer også kan forsinke eller, hvis de bruges i for store mængder, helt kan forhindre betonens naturlige afbinding og styrkeudvikling. Derfor skal den nødvendige mængde og virkningen af ethvert afbindingsforsinkende tilsætningsstof fastlægges i forbindelse med prøvestøbninger, hvor betonen fremstilles med de foreliggende delmaterialer.

Styrke-accelererende tilsætningsstoffer fremskynder betonens tidlige styrkeudvikling og bruges undertiden ved vinterstøbning, dels for at modvirke den forsinkende indvirkning af lave temperaturer på betonens styrkeudvikling, dels for at sikre, at betonen hurtigt bliver så stærk, at den kan tåle frost. Visse styrkeaccelererende tilsætningsstoffer

som f.eks. klorider har imidlertid den kedelige bivirkning, at de samtidig accelererer betonens afbinding, således at den hurtigere taber sin bearbejdelighed og stivner. Accelererende tilsætningsstoffers betydning for betonens holdbarhed og styrke diskuteres nærmere i afsnit 3.3.5 og 3.4.4.

### 3.3 Betons holdbarhed

God beton skal være velbearbejdelig og have tilstrækkelig holdbarhed og styrke. Kravene til holdbarhed bliver ofte tilsidesat i praksis, fordi holdbarheden er vanskelig at måle. Det kan tage mange år, før eventuelle mangler viser sig under indvirkning af det naturlige vejrlig, og de fleste accelererede prøvemethoder er upålidelige. Det burde imidlertid være indlysende, at kravene til betonens holdbarhed skal tages lige så alvorligt som kravene til styrke og bearbejdelighed. Det er meningsløst at fremstille en velbearbejdelig beton, som opfylder styrkekravene, hvis betonen forvitrer i løbet af nogle år. Det er tankevækkende, at mange flere betonkonstruktioner skades på grund af forvitring end på grund af overbelastning.

Mange faktorer bidrager til betonens holdbarhed. Blandingsforholdene, primært vand-cement forholdet og det samlede indhold af cement og filler, er afgørende for tætheden hos betonens mikrostruktur, men også afgørende for, om betonen kan komprimeres ordentligt, således at man undgår utætheder i makrostrukturen. Procedurerne i forbindelse med blanding, transport, støbning, komprimering og efterbehandling af betonen, såvel som omgivelsernes indvirkning under byggeprocessen og konstruktionernes senere brug, er også af stor betydning for betonens holdbarhed. Det samme gælder cementtypen, tilslaget's fysiske og kemiske holdbarhed og dets indhold af urenheder, samt valget af tilsætningsstoffer.

Holdbarhed af beton, som udsættes for vejrliget, beror først og fremmest på betonens vandtæthed og på tykkelsen af dæklaget over armeringen. Hvis betonen ikke er rimeligt vandtæt, vil der trænge vand ind i den indre struktur, og dette vand vil fryse og med tiden sprænge, opløse og udvaske mineralerne i den hærdnede cement. Derfor er kravet om vandtæthed uomgængeligt for en holdbar beton. Men i mange tilfælde er det

ikke tilstrækkeligt, at kravet om vandtæthed er opfyldt, for at sikre betonens holdbarhed. Såfremt betonen for eksempel ud over sol og regn, også udsættes for gentagne påvirkninger af frost og tø, må den friske beton tilsættes luftindblandende tilsætningsstoffer, hvis den hærdnede beton skal forblive holdbar. Er der desuden tale om påvirkning af grundvand med stort sulfatindhold, havvand, tørsalte eller andre aggressive kemikalier, må der stilles særlige krav til cement og tilslagsmaterialer.

#### 3.3.1 Miljømæssigt betingede krav til betonens sammensætning

For at opnå god holdbarhed må der altså fremstilles tæt beton. Betons tæthed mod gennemtrængning af vand og andre skadelige stoffer beror imidlertid på dens sammensætning, herunder specielt vand-cement forholdet. Betons tæthed er også i høj grad afhængig af betonens komprimeringsgrad. Tætheden forringes således væsentligt, hvis der forekommer vandseparation i den friske beton. Vandseparation kan f.eks. modvirkes ved brug af luftindblandende tilsætningsstoffer eller ved tilsætning af flyveaske, mikrosilica eller andre finkornige mineralske tilsætningsstoffer. Flyveaske og mikrosilica diskuteres mere detaljeret senere i dette afsnit.

Tabel 3.15 angiver de maksimalt tilladelige karakteristiske vand-cement forhold, som det er tilladt at foreskrive for beton i de tre miljøklasser, der optræder i DS 411-84. I praksis vil kravene til de maksimalt foreskrevne værdier for vand-cement forhold i første kolonne af tabel 3.15 være opfyldt, såfremt betonen proportioneres og fremstilles med vand-cement forhold, der ligger 0.05 lavere end de foreskrevne værdier, således som det fremgår af anden kolonne i tabel 3.15.

Tabel 3.15. Krav til effektivt vand-cement forhold, v/c, og karakteristisk styrke,  $f_{ck}$ , i henhold til DS 411-84

Miljøklasse	Max. værdi af v/c ved kontrol	Max. værdi af v/c ved proportionering og fremstilling	Min. værdi af foreskrevne $f_{ck}$ (MPa)
Aggressiv	0.50	0.45	30
Moderat	0.60	0.55	25
Passiv			15*

\* gælder kun for armeret beton.

Hvis der, for eksempel på grund af anvendelse af tørsalte, stilles usædvanligt strenge krav til betonens tæthed, bør blandingsforholdet fastlægges, således at det maksimale effektive vand-cement forhold holdes under 0.40, d.v.s. at betonen i praksis bør proportioneres og fremstilles med et effektivt vand-cement forhold på højst 0.35. Ved brug af plastificerende tilsætningsstoffer er det muligt at opnå meget lave vand-cement forhold, samtidig med at betonen forbliver så plastisk, at den kan komprimeres på betryggende måde.

Der sker en hurtig forbedring af betonens tæthed, efterhånden som cementens kemiske hærdningsproces skrider fremad. Denne proces går imidlertid i stå, hvis betonen tørrer ud. Derfor er mindst 14 døgn fugtig lagring efter udstøbningen, eventuelt under hærdningsmembran, en absolut betingelse for fremstilling af holdbar beton. Af samme grunde bør betonveje tidligst saltes to måneder efter udstøbning.

Ved beregning og kontrol af vand-cement forhold kan der i cementmængden indregnes mængden af tilsat flyveaske og mikrosilica multipliceret med en aktivitetsfaktor på 0.5 for flyveaske og 2 for mikrosilicas vedkommende. Dog må mængden af flyveaske ikke overstige 35% af den samlede vægtmængde af cement, flyveaske og mikrosilica. Tilsvarende må mængden af mikrosilica ikke overstige 10% af den samlede vægtmængde af cement, flyveaske og mikrosilica.

Flyveaske er den forbrændingsrest, som opsamles i kulstøvfyrede kraft- og varmeværkers røggasfiltre. Flyveaske består overvejende af jern- og aluminiumholdige silikat机场, der optræder i asken som kugleformede eller afrundede partikler fortrinsvis med en størrelse på 0-1 mm. Mikrosilica er et ekstremt finkornet stof, som opsamles i røggasfiltrene ved fremstilling af ferrosilicium og siliciummetaller. Mikrosilica består af kugleformede partikler af næsten rent, amorft kiselglas, fortrinsvis med en størrelse på 0-0.01 mm.

De anvendelsestekniske egenskaber hos flyveaske og mikrosilica beror især på den kemiske sammensætning og finheden.

Flyveaske og mikrosilica har begge puzzolanegenskaber. Ved puzzolaner forstås silikatholdige materialer, der ikke i sig selv har bindemiddelkarakter, men som i findelt form ved normale temperaturer vil reagere med den calciumhydroxyd, som udskilles i betonen, når cementen hærdner, og danne svært opløselige produkter med bindemiddelegenskaber.

Hvis beton skal blive, hvad vi kalder vandtæt, skal den mindst tilfredsstillende kravet til effektivt vand-cement forhold for aggressiv miljøklasse i tabel 3.15. Desuden skal betonens indhold af cement plus flyveaske, mikrosilica og mineralsk filler f.eks. i sandet, d.v.s. partikler i betonen ud over cementen med kornstørrelser under 0.25 mm, mindst udgøre 375 kg/m<sup>3</sup>.

Når betonens blandingsforhold er fastlagt, vil det ofte i praksis være hensigtsmæssigt at styre vanddoseringen efter betonens konsistens, d.v.s. dens sætmål, vebemål eller udbredelsesmål, der måles som angivet i DS 423.12, DS 423.13 og DS 423.14. Betonens vand-cement forhold beregnes og kontrolleres derefter ud fra resultaterne fra måling af de doserede mængder cement, flyveaske, mikrosilica, vand og tilslag samt måling af tilslagsets vandindhold.

DS 411-84 foreskriver, at såfremt betonens overflade kan blive udsat for vekselvis frysning og optøning i vandmættet tilstand, skal der anvendes et luftindblandende tilsætningsstof. Denne situation kan f.eks. forekomme i vandlinien i vandbygningskonstruktioner såsom bro piller, kajmure, moler etc., i forbindelse med opadvendende betonoverflader med ingen eller ringe fald eller afløb, såsom udendørs betonbelægninger af enhver art, afdækningsplader, altanplader etc., samt i det hele taget på dele af en udendørs konstruktion, hvor der kan opstå fugtansamlinger.

Ved anvendelse af luftindblandingsstoffer afhænger den frostbeskyttende virkning blandt andet af betonens største stenstørrelse og cementindhold. I øvrigt henvises til tabel 3.37 samt afsnittene 3.6.1 og 4.4.9.1 vedrørende krav om fint fordelte luftmængder, som normalt bør tilstræbes, når der skal fremstilles frostbestandig beton. Proportionering af luftindblandet beton behandles iøvringt i afsnit 3.6.

Miljømæssigt betingede krav til beton med hensyn til valg af cementtype og tilslagsmaterialer behandles i afsnittene 3.3.3 og 3.3.4.

### 3.3.2 Miljømæssigt betingede krav til dæklagets tykkelse

For at hindre korrosion skal armeringsstænger, herunder også bøjler, dækkes af et betonlag, hvis foreskrevne tykkelse mindst skal være som angivet i tabel 3.16. Ved lempet kontrol skal den foreskrevne dæklags-tykkelse dog forøges med 5 mm.

Tabel 3.16. Dæklag for slap og førspændt ikke-bundtet armering ved normal og skærpet kontrol i henhold til DS 411-84 (tolerancetillægget bør ikke vælges mindre end 5 mm).

Miljøklasse	Dæklag	
	Mindste tykkelse ved kontrol	Mindste tilladelige værdi for foreskrevet tykkelse (mm)
Aggressiv	30 mm	30 mm + 5 mm tolerancetillæg
Moderat	20 mm	20 mm + 5 mm tolerancetillæg
Passiv	10 mm	10 mm + 5 mm tolerancetillæg

Når der støbes mod jord, bør det foreskrevne dæklag forøges med mindst 50 mm, og samtidig bør jorden afdækkes, f.eks. med plastfolie. Dette ekstra dæklag kan erstattes med et 50 mm tykt renselag, som skal være afbundet, før armeringen udlægges.

Hvis der stilles usædvanligt strenge krav til betonens tæthed, f.eks. på grund af påvirkning af grundvand med stort sulfatindhold, havvand, optøningsmidler eller aggressive kemikalier, bør der foreskrives en dæklagstykkelse på 40 mm + et tolerancetillæg på ikke mindre end 5 mm.

### 3.3.3 Valg af cementtype under hensyntagen til betons holdbarhed

Alle rene Portland cementer indeholder de samme kemiske bestanddele, og det er de relative mængder, i hvilke disse såkaldte klinkerkomponenter forekommer, der er afgørende for egenskaberne hos de forskellige cementtyper. De vigtigste klinkerkomponenter i Portland cement er tricalciumsilikat (forkortet  $C_3S$ ), dicalciumsilikat ( $C_2S$ ), tricalciumaluminat ( $C_3A$ ) og tetracalciumaluminoferrit ( $C_4AF$ ).

Tabel 3.17 inddeler Portland cementer i fem typer efter et system, der er fastlagt af American Society of Testing Materials (ASTM). Tabel 3.17 angiver først en typisk sammensætning af en såkaldt ASTM-Type I, Ordinary Portland Cement. Denne cement er sammensat således, at den i de fleste tilfælde kan bruges uden problemer ved fremstilling af beton. Tabel 3.17 angiver også begrænsningerne i sammensætning af en ASTM-Type II, såkaldt Modified Portland Cement, der udvikler mindre varmemængder under hærdningsprocessen, og som er rimeligt bestandig mod svagere sulfatangreb. ASTM-Type III er en hurtigt hårdende cement med hurtigere styrkeudvikling end Type I. Den bruges med fordel ved vinterstøbning. ASTM-Type IV er en lav-varme cement med væsentligt langsommere og mindre varmeudvikling end de andre typer. Den bruges med fordel ved støbning af massive betonkonstruktioner. Endelig er ASTM-Type V en sulfatbestandig cement, der med fordel kan bruges, hvor betonen kommer i kontakt med stærkt sulfatholdig jord eller vand.

Som forklaring til tabel 3.17 kan nævnes, at cementer med højt  $C_3S$ -indhold i forhold til  $C_2S$ -indhold hydratiserer hurtigt og opnår en høj tidlig styrke. De fordele, man derved opnår, er i visse tilfælde mere end tilstrækkeligt til at retfærdiggøre den noget højere pris for Type III cement. Til gengæld udvikler  $C_3S$ -komponenten i Type III cement store mængder varme ved tidlig alder, og denne cement bør derfor ikke bruges ved fremstilling af beton til massive konstruktioner, hvor termiske spændinger kan give anledning til revnedannelser.

På den anden side af sagen udvikler cementer med højt  $C_2S$ -indhold i forhold til  $C_3S$ -indhold mindre hydratationsvarme, og de udvikler denne varme forholdsvis langsomt. Derfor er Type IV cementer velegnede ved fremstilling af beton til massive konstruktioner. At sådanne cementer samtidig har en langsom styrkeudvikling, er uden betydning i massive konstruktioner, der sjældent er hårdt belastede ved tidlig alder.

Når cementens  $C_3A$ -indhold er lavere end 5%, anses cementen for at være bestandig mod sulfatangreb. ASTM-Type V cement er udviklet med dette formål for øje. Hvis  $C_3A$ -indholdet er højere end 8%, vil der være potentiel risiko for, at sulfater, som udefra trænger ind i betonen, kan reagere med cementens tricalciumaluminat og danne et voluminøst reaktionsprodukt, som kan sprænge betonen.

Tabel 3.17. ASTM Standard Types of Portland Cement and Their Composition

ASTM Type	I Ordinary	II Modified	III Rapid Hardening	IV Low Heat	V Sulphate Resistant
Main areas of application	All-purpose	All-purpose (Mass concrete, sea water)	Winter concreting. Repair work Early form removal and early load application	Mass concrete.	Sea water or exposure to sulphate bearing water or soil
Characteristics		Moderate heat development. Moderately sulphate resistant	Rapid strength development. Rapid and large heat development	Low heat development. Slow strength development	Sulphate resistant
C <sub>3</sub> S	53	max. 50		max. 35	max. 50
C <sub>2</sub> S	24			min. 40	
C <sub>3</sub> A	9	max. 8	max. 15	max. 7	max. 5
C <sub>4</sub> AF	7				

I ASTM-Type II har man forsøgt at optimere Portland cementens sammensætning under hensyntagen til en rimeligt hurtig styrkeudvikling og lav varmeudvikling, samt en rimelig sulfatbestandighed. Denne cement vil med fordel kunne bruges under de fleste forhold, hvor der ikke stilles krav om ekstremt lav varmeudvikling, meget hurtig styrkeudvikling eller holdbarhed ved påvirkning af sulfater i høje koncentrationer.

Tre dansk-producerede cementer, Rapid-Cement PC(R), Lav Alkali Sulfatbestandig Cement PC(A/L/S) og Hvid Portland Cement PC(R/L/S/H), har sammensætning og egenskaber, som påmindrer om ASTM-cementerne. Rapid-Cement og Hvid Portland-Cement minder om Type III, og Lav Alkali Sulfatbestandig Cement ligner ASTM-Type V cement, idet den dog ud over at opfylde kravene til sammensætning af Type V cement er karakteriseret ved et begrænset alkaliindhold på 0-0.5%.

Den fjerde af de dansk-producerede cementer, Standard Cement PFC(A) minder i egenskaber om ASTM Type I Ordinary Portland Cement og bruges til samme formål. Standard-Cement er imidlertid ikke en ren Portland-cement. Det er en blandingscement, som fremstilles af Portland-klinker og gips med tilsætning af 20-25% flyveaske. Standard-cementens tricalciumsilikat og dicalciumsilikat hydratiserer i betonen på samme måde som i ren Portland cement og udskiller calciumhydroxyd. Derefter reagerer flyveasken med den udskilte calciumhydroxyd og danner tricalciumsilikathydrat ved den såkaldte puzzolaneeffekt. Det er samme binderkomponent som i Portland cement. Standard-Cement har derfor i det store og hele samme egenskaber som en almindelig Portland cement.

Danske cementers typiske indhold af klinkerminerale i vægt-% (angivet på flyveaskefri basis) samt deres typiske indhold af Na<sub>2</sub>O-ækv., CaSO<sub>4</sub> og flyveaske i % er vist i tabel 3.18.

Som det vil fremgå af de følgende afsnit, skal der for at sikre betonens holdbarhed tages hensyn til tre forhold, når der vælges cementtype. De tre forhold er risikoen for sulfatangreb, risikoen for alkali-kiselreaktioner og risikoen for revner som følge af varmespændinger.



Tabel 3.18. Cementens kemiske sammensætning angives sædvanligvis som dens beregnede indhold af klinkermaterialerne tricalciumsilikat ( $C_3S$ ), dicalciumsilikat ( $C_2S$ ), tricalciumaluminat ( $C_3A$ ) og tetracalciumaluminatferrit ( $C_4AF$ ). Ud over disse klinkerminerale indeholder cementen en lille mængde alkali-forbindelser samt gips og eventuelt flyveaske tilsat under formalingen. Som en orientering kan benyttes tabellens angivelser af omtrentlige indhold af klinkerminerale i danske cementer

Cementnavn	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	$Na_2O$ -ækv.	$CaSO_4$	Flyveaske
Standard-Cement	55	20	10	9	0.6	3.0-5.0	20-25
Rapid-Cement	55	20	10	9	0.7	3.0-5.0	< 5
Lavalkali Sulfatbestandig Cement	60	26	1-2	10	0.4	2.0	spor
Hvid Portland-Cement	75	12	4	1	0.2	2.0-3.0	0

Hvis betonen kommer i kontakt med sulfatholdig jord eller grundvand, vil opløste sulfater kunne reagere med den hydratiserede tricalciumaluminatfase i hårdnet beton. Som tidligere nævnt, er de resulterende reaktionsprodukter mere voluminøse end udgangsprodukterne, og der kan ske en indre sprængning af betonen, hvis disse produkter dannes i tilstrækkelig store mængder. Man kan kun sikre betonen mod denne form for ødelæggelse ved at fremstille den med en cement, der har et begrænset indhold af  $C_3A$ . Når sulfatkoncentrationen i grundvand er højere end ca. 400 mg  $SO_4^{2-}$ /l vand, eller når der er mere end 4000 mg  $SO_4^{2-}$ /kg i jorden, vil det være nødvendigt at bruge en såkaldt sulfatbestandig cement, d.v.s. ASTM-Type V, dansk Lavalkali Sulfatbestandig Cement, eller en tilsvarende cement, som indeholder mindre end 5%  $C_3A$ .

Vandtæt beton, som fremstilles med almindelig Portland-Cement, har ofte i praksis vist sig at være sulfatbestandig i havvand. Alligevel må det anses for at være god praksis at bruge ASTM-Type V, dansk Lavalkali Sulfatbestandig Cement, eller i det mindste ASTM-Type II, Modified Portland Cement, i hvilken  $C_3A$ -indholdet er begrænset til 8%, når beton under senere brug vil blive udsat for påvirkning af havvand.

Når alkaliindholdet i en cement er højere end 0.6%, beregnet som  $Na_2O + 0.658 K_2O$  (natriumoxyd-ækvivalent), foreligger der risiko for, at cementens alkalier vil angribe silikaten i visse særligt reaktive tilslagsmaterialer. I Danmark er porøs, hvid flint særdeles reaktiv. De porøse, hvide flintkorn forekommer i større eller mindre mængder i alle danske bakkematerialer og i mindre udstrækning i danske sømaterialer. Bakke-materialer er en fælles betegnelse for alt materiale indvundet på land, medens sømaterialer er en fælles betegnelse for alle materialer indvundet fra havbund eller forstrand.

I andre dele af verden skal man være opmærksom på opal og alle andre former for amorfe eller mikrokrySTALLINSKE, mere eller mindre porøse eller vandholdige silikatmaterialer, der ofte giver anledning til alkaliangreb (se iverdigt afsnit 3.3.4). Den alkalisilikatgel, der dannes ved disse reaktioner, er mere voluminøs end udgangsprodukterne, og den udvider sig yderligere ved optagelse af vand. På samme måde som sulfatangreb kan alkaliangreb lede til revnedannelse og sprængning og derfor alvorlig ødelæggelse af betonen.

Standard-Cement og Rapid-Cement har højere alkaliindhold end den kritiske værdi på 0.6%. Hvis disse cementer bruges i forbindelse med danske bakkematerialer, vil der altid være risiko for alkalireaktioner i udsatte konstruktioner.

Risikoen for alkaliangreb reduceres betydeligt, når der bruges cement med lavere alkaliindhold end 0.6%, som f.eks. dansk Lavalkali Sulfatbestandig Cement eller Hvid Portland Cement. Disse cementer indeholder begge mellem 0 og 0.5% alkalier. I betragtning af de omfattende skader, der i tidens løb er sket på danske betonkonstruktioner på grund af alkalireaktioner, må det anbefales at bruge Lavalkali Sulfatbestandig Cement i forbindelse med både bakke- og sømaterialer til fremstilling af al beton i aggressive og moderate miljøklasser.

I massive betonkonstruktioner og i beton i isolerede forme kan den varme, der udvikles, når cementen hydratiserer, give anledning til meget høje temperaturer i betonen i dagene umiddelbart efter udstøbningen. Når betonen atter afkøles efter opvarmningen, kan der opstå store termiske differentialspændinger i konstruktionen, som både kan give anledning

til overfladekrakelering og dannelse af mere dybtgående revner. Sådanne revner vil naturligvis forringe betonens holdbarhed. Varmeudviklingen kan nedsættes, hvis man bruger en lav-varme cement af ASTM typerne V eller II, eller en lignende cement, hvor  $C_3A$ -indholdet er begrænset til 8% og  $C_3S$ -indholdet helst til 35%, men i hvert fald til 50%.

### 3.3.4 Valg af tilslag under hensyntagen til betons holdbarhed

Visse tilslagsmaterialer er uegnede til betonfremstilling, fordi de reagerer kemisk i betonen og skader denne. Sådanne tilslagsmaterialer siges at være kemisk ustabile. Andre tilslagsmaterialer er ikke velegnede til betonfremstilling, fordi de gennemgår store volumenforandringer eller smuldrer, når de udsættes for fysiske påvirkninger såsom mekanisk belastning, frysning og optøning, opvarmning og afkøling eller udtørring og genopfugtning. Sådanne tilslagsmaterialer siges at være fysisk ustabile.

Ofte vil kun en erfaren petrograf med sikkerhed kunne fastslå, om et foreliggende tilslagsmateriale indeholder skadelige bestanddele. Derfor bør man altid lade en anerkendt prøveanstalt vurdere tilslagsmaterialer, hvis egenskaber man ikke kender fra tidligere arbejder, før man bruger dem i en betonproduktion.

Det kræver stor erfaring at vurdere resultater af de standardundersøgelser, som er foreskrevet i mange landes normer, med formål at bedømme om et tilslag er kemisk og fysisk stabilt. Resultater fra holdbarhedsundersøgelser, som er udført i laboratoriet, kan kun supplere, men aldrig erstatte, en sund ingeniørmæssig vurdering af tilslagets kvalitet og en bedømmelse af materialets opførsel i eksisterende konstruktioner. Ingen af de foreliggende prøvemethoder kan klart skelne mellem brugbare og uanvendelige tilslagsmaterialer i holdbarhedsmæssig henseende. Det er derfor sjældent berettiget at fastsætte absolutte grænseværdier for godkendelse eller forkastelse af tilslagsmaterialer. Hvis grænserne sættes så lavt, at alle brugbare materialer godkendes, vil man med sikkerhed også komme til at godkende mange uanvendelige materialer. Hvis grænserne sættes så højt, at alle uanvendelige materialer forkastes, vil man med sikkerhed også komme til at forkaste mange brugbare materialer. Derfor lægger man i praksis meget stor vægt på materialernes "Service Record", d.v.s. deres opførsel i eksisterende konstruktioner.

### 3.3.4.1 Kemisk ustabil tilslag

Visse tilslagsmaterialer er ubrugelige til betonfremstilling, fordi partikler eller urenheder reagerer kemisk i betonen og ødelægger den. Sådanne materialer siges at være kemisk ustabile. Nogle reaktioner giver anledning til ekspansioner, revnedannelse og ødelæggelse af betonens indre struktur. Som resultat af andre reaktioner dannes produkter, der har en ugunstig indflydelse på betonens afbinding og hærkning, eller som giver anledning til skønhedsfejl eller misfarvning af betonoverfladerne. Atter andre tilslagsmaterialer indblander utilsigtet luft i betonen.

Reaktiv silikat i form af porøs, hvid flint, sulfider, organiske urenheder og uorganiske salte forekommer ofte som kemisk ustabile komponenter i danske tilslagsmaterialer.

Tilslagsmaterialer, som indeholder silikat ( $SiO_2$ ) i nogen anden form end store krystaller, kan som tidligere nævnt reagere med de alkalier, som går i opløsning, når Portland cement hydratiserer. Derved dannes alkalisilikathydrater. Sådanne hydrater er i sig selv voluminøse og udøver derfor et indre tryk på den omgivende cementmørtel i betonen. Dette er imidlertid sjældent tilstrækkeligt til at ødelægge betonen; men i udsatte miljøer fortsætter alkalisilikathydraterne med at optage vand fra omgivelserne. De omdannes derved til en gummiagtig gel med endnu større volumen end udgangsproduktet. Derved øges den indre belastning på mørtelmatricen, og i ugunstige tilfælde dannes overfladespringere og indre revner, som fuldstændigt kan ødelægge sammenhængen i betonen. Jo mere amorf, mikrokrySTALLinsk, porøs og vandholdig bjergartens eller mineralets struktur måtte være og jo højere betonens porøsitet, temperatur og vandmætningsgrad, desto hurtigere vil alkalireaktionerne forløbe, og desto alvorligere vil skaderne på betonen blive. Da der hersker en vis usikkerhed blandt bygningsingeniører med hensyn til, hvilke tilslagsmaterialer der er potentielt alkalireaktive, skal der i det følgende redegøres nærmere for dette spørgsmål.

Mikrokrystallinsk silikat og amorf silikat i form af glas og gel er særlig reaktiv, medens makrokrystallinsk silikat i form af kvarts, og silikat, som er fuldstændig bundet til andre kationer, som det f.eks. er tilfældet i feldspat, reagerer langsommere eller slet ikke med alkali ved normale temperaturer.

Man skal i særlig grad være opmærksom på to forskellige geologiske forekomster. For det første de hurtigt afkølede, vulkanske, sure overfladebjergarter med middel til højt silikatindhold som f.eks. mikrokrystallinsk rhyolit og andesit, og i mindre grad meget finkornet granit og diorit. Vulkanske bjergarter og aflejringer indeholder også i mange tilfælde reaktivt silikatholdigt glas i form af obsidian, begsten, perlit eller pimpsten. Glas er her defineret som enhver form for ildfødt silikatholdig magma, der er afkølet så hurtigt, at massen er størknet uden at krystallisere.

For det andet skal man være opmærksom på silikatmaterialer, som er udfældet af vandige opløsninger. Sådanne materialer vil ofte befinde sig i mikrokrystallinsk- eller gelform. Gel defineres her som en homogen stiv substans, der er dannet ved koagulation af hydratiserede silikatmaterialer ved afkøling, fordampning eller udfældning fra en vandig opløsning. Silikat-gel er et dispergeret to-fase system bestående af små kolloidale partikler, som er jævnt fordelte og meget nært forenede med en vandholdig fase. Det farligste mineral i denne gruppe er opal, og den farligste bjergart er chert. Flint kan betragtes som en variant af chert.

Opal er et mineral med mikroskopiske og submikroskopiske porer, som består af amorf silikat, der indeholder mellem 1 og 20% vand. Det store vandindhold afspejler sig i formlen  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Opal udfældes i rindende vand i form af noder, stalaktiter, årer eller belægninger. Opal forekommer ofte som en naturlig bestanddel af vulkanske bjergarter i områder med varme kilder, men det udskilles også af levende organismer som diatomeer og radiolarier, og det forekommer derfor i vid udstrækning som bindemiddel i sedimentære bjergarter. I Tyskland har man således store problemer ved fremstilling af beton med opalsandsten. Det

har dog vist sig, at densiteten af de farlige korn er meget lav, 2100-2200 kg/m<sup>3</sup>. Det er derfor i mange tilfælde muligt at oparbejde opalholdige råmaterialer til et brugbart tilslag ved densitetssortering af råmaterialet.

Betegnelsen chert dækker over flere varianter, f.eks. flint, jasper, kalcedon og agat. Chert er en bjergart, der hovedsagelig består af meget finkornet kvarts i forening med større eller mindre mængder frit vand, der befinder sig i spredte sfæriske hulrum. Jo mere vand strukturen indeholder, desto lavere er densiteten. Kvartsen forekommer i to former: dels som mikrokrystallinsk kvarts, der består af uregelmæssige korn af størrelsen 0.001 til 0.01 mm i diameter; dels som bundter eller fibre af kalcedonisk kvarts, 0.02 til flere mm lange. Chert forveksles let med sandsten. I chert er kvarts imidlertid kemisk udfældet. I sandsten er kvartspartiklerne mekanisk udfældede. Chert og flint dannes som noder i kalksten og i dolomit på havbunden. Silikaten stammer fra den almindelige forvitring af bjergarter på landjorden. Silikaten føres i opløsning ud i havet i meget store mængder, hvor den substituerer karbonaterne i de oprindelige aflejringer, medens disse endnu er bløde. Resterne af levende organismer tjener ofte som en slags katalysatorer. Da chert og flint er hårde og kemisk modstandsdygtige materialer, bliver de tilbage, når kalkstenen med tiden nedbrydes. Bølgelaget koncentrerer så chert og flint i store mængder i strandaflejringer, som vi kender det fra Danmarks kyster. Under senere indvirkning af vejr og vind forvitrer partiklerne. De bliver derved porøse og mere vandholdige.

Chert og flint er modstandsdygtige over for angreb af de fleste kemiske stoffer. Desværre danner stærke alkaliopløsninger en undtagelse, således som de forekommer i cementpasta. Jo mere porøse og vandholdige tilslagsmaterialerne er, desto hurtigere forløber alkaliangrebet. Når den tætte, mørke flint forvitrer, dannes der et lysegråt eller hvidt porøst lag på partiklernes overflader. Det er i Danmark hovedsagelig denne såkaldte lyse flint, der giver anledning til alkalireaktioner, medens den mørkegrå, brune eller sorte, uforvitrede flint er mindre farlig.

Som tidligere nævnt, indeholder de fleste danske bakkematerialer lys flint. Da belægningerne af lys flint slides af stenpartiklerne ved mekanisk påvirkning og koncentrerer i sandet, er både stenene og det der af resulterende sand potentielt reaktivt og bør ikke bruges til fremstilling af beton i miljøklasserne aggressiv og moderat. Risikoen for ødelæggelser øger væsentligt, når der tilføres alkali fra omgivelserne. Det vil for eksempel være tilfældet, når betonen udsættes for havvand eller tørsalte.

Når beton i aggressiv eller moderat miljøklasse fremstilles med tilslag, der indeholder lys flint, bør der ubetinget bruges Lavalkali Sulfatbestandig Cement.

Sømaterialer er som regel mindre forvitrede end bakkematerialer og indeholder derfor mindre mængder lys flint end bakkematerialer. Sømaterialer bør imidlertid også betragtes med mistro, da de kan være afledede af moræner, som tidligere har ligget på land og som derfor har været udsat for vejr og vind. Sømaterialer er ofte af meget ujævn kvalitet, idet de indvindes over store områder, beroende på skiftende vejrforhold.

Tidligere foreskrev man brug af knust klippemateriale i form af skærver og kvartssand, når man ville sikre sig mod alkalireaktioner. Det har imidlertid vist sig, at det hovedsagelig er lys flint med densitet mindre end  $2200 \text{ kg/m}^3$ , der er skadelig. Da det bliver stadig vanskeligere og dyrere at skaffe tilslagsmaterialer, som fra naturens hånd er resistente mod alkaliangreb, er man nu begyndt at densitetssortere danske stenmaterialer ved tungvæske-separation eller pulsationsseparering. Dette har i mange år været almindelig praksis i store dele af U.S.A.

Ved tungvæskesortering (heavy media separation) føres stenene ind i et langsomt roterende sorterapparat, der indeholder en væske med en forudvalgt densitet. Sten tungere end denne densitet synker til bunds. Lettere sten flyder ovenpå. De to stenfraktioner udtages automatisk hver for sig og rengøres for vedhængende væske. Som tung væske anvendes en vandig opslemning af finformalet magnetit og ferrosilicium eller begge dele.

Ved pulsationsseparering (jigging) føres stenene ind i et apparat, der vibrerer dem over en hældende, perforeret bund i en opstigende vandstrøm. Under vibrationen søger små og/eller lette korn op til overfladen af laget, mens store og/eller tunge korn synker ned i laget. For enden af separatoren deles laget i to af et skot. Højdeindstillingen kan justeres således, at det ønskede sorteringsresultat opnås, såfremt stenene er egnede til denne art sortering.

Ved begge metoder vil ske en vis formsortering, idet flade korn vil have en tendens til at flyde ovenpå og dermed komme ud med den lette fraktion.

Ved densitetssortering opstår en tung stenfraktion, der er bedre end materialet var før sorteringen, og en let fraktion, der er dårligere end materialet var før sorteringen. Den lette fraktion er oftest lysere end udgangsmaterialet.

Ingen af disse metoder er imidlertid egnede til sortering af sand med kornstørrelser mindre end ca. 4 mm.

Mineralsortering af sand vil muligvis komme på tale i fremtiden. Der findes i dag teknologi til at fjerne såvel lette som tunge mineraler fra enskornede sandmaterialer.

Indtil videre er man imidlertid i praksis henvist til at bruge sandmaterialer, som fra naturens hånd indeholder en passende lav mængde skadelige partikler, ved betonfremstilling i moderat og aggressiv miljøklasse.

Sulfidminerale som f.eks. svovlkis (pyrit) og strålkis (markasit) er sekundære materialer, der ofte forekommer som urenheder i sand og stenmaterialer. Disse mineraler forvitrer hurtigt ved iltning under påvirkning af vejrliget. Hvis denne forvitring sker, efter at materialet er indstøbt i betonen, kan der dannes rustpletter og springere på betonoverfladerne. Ved forvitring taber partiklerne samtidig deres styrke. Det er som regel partikler af størrelsesordenen 5-10 mm, der giver anledning til problemer. Man kan undersøge et foreliggende materiale for

sulfidreaktivitet ved at anbringe det i en mættet opløsning af kalciumhydroxyd. Hvis materialet er reaktivt, vil der dannes en blå-grøn geleagtig masse af ferrosulfat i løbet af nogle få minutter. Denne masse ændrer sig til brun ferrihydroxyd, når den udtørres i luft. Hvis disse reaktioner ikke sker, er materialet brugbart til betonfremstilling.

Hvis tilslagsmaterialet indeholder muld eller andre organiske urenheder, som indvirker på betonens afbinding og hærkning, er det uegnet til fremstilling af beton. Sådanne organiske urenheder indeholder nemlig ofte forrådnede plantedele, der udskiller humus- og garvesyrer. Det er disse syrer og de deraf afledede produkter, der stiller til fortræd. Det er mere sandsynligt at finde skadelige mængder organiske urenheder i sandend i stenmaterialer. Derfor skal alt sand rutinemæssigt undersøges for organisk forurening ved omrystning i natriumhydroxyd, før det bruges til fremstilling af beton. Prøvemethoden er beskrevet i DS 405.3. Et negativt prøveresultat (lys farve) er et sikkert bevis for, at sandet ikke indeholder organiske urenheder i skadelige mængder. En positiv reaktion (mørk farve) betyder derimod ikke nødvendigvis, at sandet er ubrugeligt. Det er ikke sikkert, at det bestemte organiske stof, der tilfældigvis forekommer i sandet, har nogen skadelig indvirkning på cementens afbinding. Det er heller ikke sikkert, at misfarvningen af natriumhydroxydopløsningen skyldes organiske stoffer i sandet. Den kan skyldes et indhold af ganske uskadelige jernholdige mineraler. I tilfælde af en positiv reaktion bør sandet sendes til en anerkendt prøveanstalt for videre undersøgelse. Eventuelt bør der udføres en såkaldt sammenlignende mørtelundersøgelse, som beskrevet i ASTM C87-69. Hvis resultatet stadig er negativt, må sandet vaskes.

Der kan forekomme uorganiske salte i tilslagsmaterialerne som f.eks. klorider, sulfater, karbonater eller fosfater af forskellig art. Nogle af disse salte reagerer med cementen og danner voluminøse reaktionsprodukter, eller de ændrer og forhindrer det normale afbindings- og hærkningsforløb. Andre salte er skadelige, fordi krystallerne langsomt går i opløsning i betonen og taber deres styrke. Atter andre som f.eks. klorider giver anledning til korrosion af armeringsjernene.

Når sand indvindes fra havbunden, fra forstranden, fra flodmundinger med tidevand eller i ørkenområder, indeholder det som regel klorider. Aflejringer lige over tidevandszonen eller over grundvandsspejlet kan indeholde mellem 5 og 10 vægtprocent klorid. Hvis denne klorid ikke fjernes ved at vaske sandet, eller hvis der bruges havvand ved fremstilling af betonen, vil kloriderne for det første absorbere vand fra omgivelserne, og betonoverfladerne vil få et permanent fugtigt udseende, eventuelt med uregelmæssige hvide saltudfældninger. Men, hvad der er mere alvorligt, når betonen fremstilles med et kloridindhold, der overstiger 1-2% af cementvægten, vil der være risiko for korrosion af armeringen med revnedannelse og ødelæggelse af betonen til følge selv i et ellers passivt miljø. Sådant beton er næsten umuligt at reparere, og det er sjældent muligt at forhindre fortsat korrosion.

Hvis gips eller andre sulfater forekommer i mængder, ud over hvad der tilsættes cementen for at regulere bindetiden, kan disse salte reagere med cementens tricalciumaluminat og give anledning til sulfatreaktioner. Hvis tilslaget indeholder gips eller anhydrit, kan saltene vanskeligt fjernes ved at vaske materialet, fordi de fleste sulfater er tungt opløselige i vand. Problemet kan som regel løses ved brug af sulfatbestandig cement til fremstilling af betonen.

Hvis man har grund til at formode, at tilslaget indeholder klorid, sulfat eller andre uorganiske salte, bør en repræsentativ prøve af materialet sendes til en anerkendt prøveanstalt for videre undersøgelse.

#### 3.3.4.2 Fysisk ustabil tilslag

Visse tilslagsmaterialer er uegnede til betonfremstilling, fordi partikler eller urenheder mangler styrke eller smuldrer eller giver anledning til store volumenforandringer ved gentagen frysning og optøning, opvarmning og afkøling eller befugtning og udtørring. Sådanne materialer siges at være fysisk ustabile. Volumenforandringer hos et fysisk ustabil tilslag kan give anledning til forskellige former for ødelæggelse af betonen, varierende fra dannelse af lokale overfladespringere til omfattende afskalninger, revnedannelse og sprængning af betonens indre struktur med smuldring til følge.

Fysisk ustabile tilslagsmaterialer falder i to kategorier beroende på arten og virkningen af de volumenforandringer, de giver anledning til. Letsmuldrende materialer som f.eks. blød kalksten, okker, glimmer, ler og lerklumper, samt stærkt forvitrede partikler er skadelige, fordi de bryder sammen i betonen og mister deres styrke ved mekanisk belastning eller under hydrotermisk påvirkning. Beroende på det procentuelle indhold af sådanne partikler i tilslaget kan der enten ske en lokal nedbrydning af betonen omkring de enkelte partikler, hvorved betonens styrke reduceres i større eller mindre grad, eller sammenhængen i betonens struktur kan i værste fald helt ødelægges. Mængden af letsmuldrende partikler i et tilslagsmateriale bestemmes som angivet i DS 405.7. Når indholdet af sådanne partikler overstiger 3% i sandet og 5% i stenene, bør tilslaget forkastes.

Glimmer er en ofte forekommende forurening hos betontilslag. Det er skadeligt på grund af dets bløde, lagdelte struktur, der gør det tilbøjeligt til at sønderdeles i spaltningsretningen. Derved reduceres både betonens styrke og holdbarhed. Glimmers tilbøjelighed til at absorbere store vandmængder forøger også betonens vandbehov for given konsistens. Hvis sandet indeholder glimmer i form af små glitrende partikler, bør en prøve sendes til en anerkendt prøveanstalt for videre undersøgelse. Eventuelt bør der udføres en sammenlignende mørtelundersøgelse.

Den ekstremt fine størrelsesfraktion hos sandet, der passerer 0.062 mm ISO-sigten, henholdsvis 0.075 mm ASTM-sigten (sigte nr. 200), betegnes på dansk som silt- og lerfraktionen. Materiale mellem 0.062 og 0.002 mm kaldes silt, og materiale mindre end 0.002 mm kaldes ler. Silt består som regel af mikroskopiske mineralkorn, medens ler består af kolloidale lermineraller. Der tillades kun en begrænset mængde silt og ler i sandet, fordi denne meget fine fraktion øger betonens vandbehov uforholdsmæssigt meget. Desuden kan et stort indhold af ler reducere både betonens styrke og dens holdbarhed. Det er i særlig grad de lagdelte montmorillonit lerarter, der er uønskede. De sveller nemlig stærkt under optagelse af vand og giver anledning til en kraftig reduktion af den friske betons bearbejdelighed og en øget tendens til svind hos den

hærdnede beton. DS 405.8 beskriver en prøvemethode til bestemmelse af tilslagets indhold af silt og ler. I normer og bestemmelser begrænses det maksimalt tilladelige indhold af silt og ler altid til 1 vægtprocent i stenfraktionen og normalt til 3 vægtprocent af sandfraktionen for beton, som vil blive udsat for mekanisk slid, og 5 vægtprocent af sandfraktionen for beton, som ikke vil blive udsat for mekanisk slid.

Tilslagspartikler, der giver anledning til store og ødelæggende volumenændringer i betonen, udgør en anden og farligere kategori af fysisk ustabil tilslag. Det gælder f.eks. tilslag, der indeholder store mængder porer, som er mindre end 0.004 mm. Når sådanne partikler fryser i vandmættet tilstand, vil de ofte øge så meget i volumen, at de sprænger betonen. I Danmark er det igen hovedsagelig de porøse hvide flintkorn, der findes i store mængder i bakkematerialet, som giver anledning til frostskafer.

Ved forvitring af magmabjergarter, der i uforvitret tilstand er stærke såvel som kemisk og fysisk stabile, dannes sekundære, svagere mineraler og til slut ler i større eller mindre mængder. Ligeledes kan sedimentære bjergarter som kalksten, dolomitisk kalksten og lerskifre dannes med ler som en integreret del af strukturen. Det er nødvendigt at kende et stenmateriales forvittringsgrad og lerindhold for at kunne bedømme materialets fysiske stabilitet. Som tidligere nævnt gennemgår visse lermineraller, og i særlig grad montmorillonit, store volumenændringer under udtørring og genopfugtning. Når sådanne lermineraller forekommer som en integreret del af stenenes struktur, vil betonens svind og dermed dens tendens til revnedannelse forøges. Når der sker store indbyrdes bevægelser mellem sten og mørtel i betonens indre struktur, vil der også være risiko for, at vedhæftningen mellem de to faser og dermed sammenhængen i strukturen ødelægges. Følgen vil være alvorlige revnedannelser og en drastisk reduktion både af betonens styrke og dens elasticitetsmodul. Noget lignende gør sig iøvrigt gældende, hvis der ved betonstøbningen bruges sten med fastsiddende ler på overfladerne. Derfor bør der altid stilles krav om, at stenmateriale til betonstøbning skal være fuldstændig rent.

Stærkt forvitrede magmabjergarter, der indeholder ler som en integreret del af strukturen, og tvivlsomme sedimentære bjergarter bør altid vurderes af en anerkendt prøvemaanstalt, før de bruges til fremstilling af beton. ASTM C88 (Test for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulphate or Magnesium Sulphate) vil som regel afsløre skadelige lereforekomster i et stenmateriale. Iøvrigt bør det nævnes, at stærkt svindende og svellende stenmaterialer ikke forekommer i Danmark, men at stenkul, brunkul, træstumper, kviste og blade kan medføre lignende skader på betonen. Stenmaterialet må derfor ikke indeholde sådanne urenheder.

I modsætning til volumenændringer, der skyldes frysning og optøning eller udtørring og genopfugtning, vil et stenmateriales volumenændringer til følge af opvarmning og afkøling sjældent give anledning til problemer, når materialet udsættes for klimatisk betingede temperaturforandringer. I tilfælde af brand kan stenene imidlertid sprænges som følge af et forøget indre damptryk. I forbindelse med brandskader skal det iøvrigt bemærkes, at kvarts ændrer struktur ved opvarmning til nogle få hundrede grader. Ved denne strukturændring sker der en kraftig volumenudvidelse af kvartsen, som kan medføre, at betonen sprænges.

Ingen foreliggende prøvemethode kan med sikkerhed skelne mellem fysisk stabilt og fysisk ustabil tilslag. Man får altid den sikreste indikation på eventuelle problemer ved at undersøge ældre betonkonstruktioner, der er fremstillet med det foreliggende tilslagsmateriale under samme miljøforhold.

Fysisk ustabilitet er imidlertid ofte forbundet med en porøs materialestruktur. Et porøst materiale vil altid have lavere densitet, styrke og elasticitet end et tilsvarende tæt materiale. Derfor bør alle tilslagsmaterialer, der indeholder lette eller bløde partikler, betragtes med skepsis og undersøges nærmere.

Den såkaldte "Scratch Hardness Test" (ASTM C235) kan bruges ved en foreløbig bestemmelse af et tilslagsmateriales procentuelle indhold af bløde korn. Hvis en undersøgelse ved hjælp af denne metode viser, at tilslaget indeholder mere end 5% bløde korn, bør der foretages en nærmere vurdering af materialet i laboratoriet.

Tilslagets gennemsnitlige densitet, som bestemt i henhold til DS 405.2, kan også bruges som et foreløbigt mål på dets indhold af lette, porøse korn. Praktisk taget alle naturligt forekommende, tætte og sunde bjergarter har en højere korndensitet end  $2500 \text{ kg/m}^3$ ; de bedste tilslagsmaterialer har densiteter højere end  $2600 \text{ kg/m}^3$ . Hvis den gennemsnitlige densitet af et foreliggende tilslagsmateriale derfor er mindre end  $2500 \text{ kg/m}^3$ , betyder dette næsten med sikkerhed, at tilslaget indeholder porøse korn og derfor er mindre velegnet, men ikke nødvendigvis ubrugeligt, til fremstilling af beton.

### 3.3.4.3 Formulering af krav til tilslagsmaterialers holdbarhed i danske normer og bestemmelser

Krav til danske betontilslagsmaterialer er fastlagt i Dansk Ingeniørfor- enings norm for sand-, grus- og stenmaterialer, DS 401. Følgende krav er specificeret nærmere:

Farvereaktionen ved bedømmelse af humusindholdet efter DS 405.3 må ikke være mørkere end standardfarven, med mindre det forsvarlige deri dokumenteres. Endvidere må klumper af ler, fastsiddende ler på stenoverflader, smuldrende sten samt bestanddele af organisk oprindelse ikke forekomme i et omfang, der har skadelig indflydelse på den friske eller den hærdnede beton.

Kornkurven for sand og sten bestemmes i henhold til DS 405.9. For sand måles gennemfaldsprocenten på 0.25, 1 og 4 mm sigter. For sten måles gennemfaldsprocenten for de kornstørrelser, der angives i DS 404.

Hver vare skal leveres med en deklARATION, der angiver øvre og nedre grænse for gennemfaldsprocenterne. En leverance skal ligge inden for de deklarerede grænser.

Stenmaterialers frostfarlighed skal deklarereres på basis af funktionsprøvning i beton i henhold til gældende dansk standard. For øjeblikket eksisterer der ikke nogen sådan standard.

Det bemærkes, at der ikke i normen er formuleret krav til sand- og stenmaterialers evne til at modstå alkaliangreb.



Det fremgår af ovenstående, at normens krav til betontilslag er meget vage og iøvrigt ikke er formuleret i form af talværdier. Det er for at råde bod på disse mangler, at Akademiet for de Tekniske Videnskaber har opstillet følgende forslag til klassifikation af sten og sand til fremstilling af beton i forskellige miljøklasser\*.

#### 3.3.4.4 Klassifikation af stenmaterialer til betonfremstilling

Med teknologi til densitetssortering af sten er det muligt at oparbejde mange danske stenmaterialer til et kvalitetsniveau svarende til nedknust klippegranit i henseende til risiko for frostskaader og alkalireaktioner, men betonteknologisk bedre på grund af mere hensigtsmæssig kornform.

Sten klassificeres efter bjergartssammensætning og densitet som følger:

Materialeklasse III til fremstilling af beton i passiv miljøklasse. Der stilles ingen krav.

Materialeklasse II til fremstilling af beton i moderat miljøklasse:

- Højst 3 vægtprocent under  $2300 \text{ kg/m}^3$ . Dette svarer til normale søsten af god kvalitet.

Materialeklasse I til fremstilling af beton i aggressiv miljøklasse:

- Højst 5 vægtprocent under  $2500 \text{ kg/m}^3$ , maksimum 1% under  $2400 \text{ kg/m}^3$
- Mængden af flint med hvid skorpe begrænses, f.eks. højst 10 vægtprocent af det samlede materiale, og højst 1 vægtprocent absorption for fraktionen bestående af flint med hvid skorpe.

\* "Detailkrav til holdbar beton", Rapport udarbejdet af en projekt-Byggeteknik, Teknologisk Institut, Juli 1984. Denne rapport danner baggrund for udarbejdelse af en såkaldt "Basisbetonbeskrivelse (BBB 85)" til brug i den danske bygningssektor, som udkommer i 1985.

Densitetssortering af stenmaterialer foretages i laboratoriet i henhold til DS 405.4, "Prøvningsmetoder for sand-, grus- og stenmaterialer - indhold af lette korn", eller TI-B76, "Densitetssortering af stenmaterialer".

Det bemærkes, at porøs flint vil farves blå i en blanding af 1 gram 2% methylblåt 150 g koncentreret saltsyre og 1000 g vand, medens andre lyse bjergarter som f.eks. kalksten ikke vil farves ved sådan behandling. Efter farvning vaskes stenene i vand. Anvendes denne fremgangsmåde på densitetssorterede sten, kan der derefter mineralsorteres efter granit, tæt flint, flint med mere eller mindre hvid skorpe, kalk og andet.

Sortering af stenmaterialer efter bjergart foretages i henhold til TI-B77, Sortering af flint og hvid kalk.

#### 3.3.4.5 Klassifikation af sand til betonfremstilling

Som for stenenes vedkommende knytter den største bjergartsmæssige interesse i sandet sig også til mængden og arten af flint. I stenfraktionerne udvikler porøs flint i det væsentlige frostspringere. I sandfraktionen er disse korn alkali-kiselreaktive.

I modsætning til hvad der er tilfældet for stenenes vedkommende, kan der imidlertid med nuværende kendt teknologi ikke gøres indgreb i sandets petrografiske egenskaber, med mindre de er knyttet til bestemte kornstørrelsesfraktioner som f.eks. for lerindholdets vedkommende.

I praksis er man derfor henvist til ved betonfremstilling i moderat og aggressiv miljøklasse at bruge sandmaterialer, som fra naturens hånd indeholder en passende lav procentuel mængde porøse flintpartikler.

Skelnen mellem tæt og porøs flint er mulig, men kun ved hjælp af tyndslibsmikroskopi, og der er ingen entydig sammenhæng mellem sandets procentuelle indhold af porøs flint og dets evne til at skade betonen.

Sand klassificeres i samme materialeklasser som sten, men i forhold til miljøklasse og cementtype efter alkalireaktivitet som vist i tabel 3.19.

Tabel 3.19 Absolutte krav til sand i de tre materialeklasser

Materiale- klasse	Alkalisk reaktivitet	Portland cement med normalt alkaliindhold		Portland cement med særlig lavt alkali- indhold (< 0.6%)	
		Ekspansion o/oo-tid	Reaktive korn vol.%	Ekspansion o/oo-tid	Reaktive korn vol.%
I		< 1 o/oo 8 uger	maks. 2%	< 1 o/oo 8 uger	maks. 2%
II		< 2 o/oo 8 uger	maks. 3%	ingen krav	ingen krav
III		ingen krav	ingen krav	ingen krav	ingen krav

Det fremgår, at kravene til sandet kan formuleres i forbindelse med måling af mørtelprismekspansion i henhold til TI-B51, "Sands alkaliskreaktivitet". Alternativt kan kravene formuleres i forbindelse med måling af mængden alkaliskreaktive korn ved tyndslibsmikroskopi i henhold til TI-B52, "Petrografisk undersøgelse af sand".

I saltbelastede miljøer er det eksperimentelt vist, at udviklingen af alkaliskreaktioner er uafhængig af cementens alkaliindhold. Derfor foreslås enslydende krav til materialeklasse I, uafhængigt af cementtypen.

I ikke-saltbelastede miljøer er cementens alkaliindhold og fugtbelastningen afgørende. De foreslåede krav skulle sikre, at revnedannelser ikke opstår som følge af alkaliskreaktioner, bl.a. fordi al dansk cement er relativt alkalifattig.

For samtlige materialeklasser kræves, at humusglasset skal være lysere end standardfarven ved prøvning efter DS 405.3, "Prøvningsmetoder for sand-, grus- og stenmaterialer - humusindhold".

### 3.3.5 Valg af tilsætningsstoffer under hensyntagen til betons holdbarhed

Ifølge DS 411 skal der blandes luftindblandende tilsætningsstoffer i beton, der udsættes for frysning og optøning. Sådanne tilsætningsstoffer

forbedrer betonens holdbarhed på flere måder. De gør det for det første muligt at reducere betonens vandbehov for given konsistens. Derved forbedres den hærdnede betons vandtæthed og som følge heraf dens holdbarhed, forudsat at man ikke reducerer betonens cementindhold svarende til reduktionen af betonens vandindhold.

For det andet bryder de indkapslede luftporer kapillarporesystemet i den hærdnede cementpasta og reducerer derved vandabsorptionen. Dette har også en gunstig indvirkning på betonens holdbarhed. For det tredje fungerer luftporerne som en slags sikkerhedsventiler, der kan optage det vand, der bliver i overskud, når porevandet fryser og derved udvider sig i betonen. Tilstedeværelsen af luftporer i betonen betyder således, at der aldrig ved frysning opbygges så stort et indre tryk, at betonen sprænges.

Der skal indblandes en vis mindste mængde luft i betonen, for at den skal blive frostbestandig under hård miljøpåvirkning. Afsnit 3.6.1 giver mere detaljerede anvisninger angående størrelsen af det krævede luftindhold.

Det er imidlertid ikke ligegyldigt, hvorledes luftporerne fordeler sig i betonen. Ved valg af luftindblandingsstof skal det under hensyntagen til de øvrige anvendte delmaterialer tilstræbes, at porerne indgår i den hærdnede betons struktur som et jævnt fordelt system med en afstandsfaktor mindre end 0.25 mm. Afstandsfaktoren er en fiktiv størrelse, der kan beskrives som den maksimale afstand fra et punkt i cementpastaen til den nærmeste bobleoverflade beregnet ud fra forudsætningen, at alle porer er lige store og fordelt i et simpelt kubisk mønster i pastaen. Luftporemålingen foregår ved mikroskopering med 50 ganges forstørrelse af en slebet flade af hærdnet beton i henhold til ASTM C457\*.

Plastificerende tilsætningsstoffer forbedrer kun betonens holdbarhed, såfremt betonens vandindhold reduceres, uden at cementindholdet samtidig sættes ned. Betonen fremstilles derved med et mindre vand-cement forhold og bliver derfor mere vandtæt og holdbar. Derimod forbedres betonens holdbarhed ikke, hvis sådanne tilsætningsstoffer bruges til at frembringe en mere plastisk beton, uden at vandindholdet samtidig nedsættes. Tværtimod øger risikoen herved for vandudskillelse og afblanding af tilslaget med en nedsat betonholdbarhed til følge. Det bemærkes,

\* Se iøvrigt afsnit 4.4.9.1.

at plastificerende tilsætningsstoffer ikke har samme stabiliserende indvirkning på den friske betonblanding som luftindblandende tilsætningsstoffer. Tværtimod har visse plastificerende tilsætningsstoffer den modsatte virkning, d.v.s. de reducerer betonens kohæsion og øger derfor risikoen for afblanding af sten og udskillelse af vand. Dette har naturligvis en ugunstig virkning på betonens holdbarhed.

Mange styrke-accelererende tilsætningsstoffer indeholder klorider. Klorid i enhver form øger risikoen for korrosion af armeringsjernene i beton. Armeringskorrosion nedsætter altid betonens holdbarhed. Det samlede indhold af klorider må ifølge DS 411 ikke overstige 0.5%, 1.5% og 2.5% af cementvægten i henholdsvis spændbeton, slapt armeret beton og uarmeret beton. Heri skal indregnes den klorid, som eventuelt findes i tilslaget eller som på fabrikken tilsættes visse udenlandske hurtigt-hærdende cementer. Det kan anbefales at bruge dansk Rapid Cement i stedet for at tilsætte kloridholdige acceleratorer for at fremme betonens styrkeudvikling ved vinterstøbning.

Forskriftsmæssig brug af afbindingsforsinkende tilsætningsstoffer, såkaldte retardatorer, har normalt ikke nogen ugunstig indvirkning på betonens holdbarhed.

### 3.4 Betons styrke

#### 3.4.1 Betons lagringsforhold og alder ved prøvning

Hvis beton lagres fugtigt, øger dens styrke først hurtigt og senere langsomt i løbet af mange måneder og år. Ifølge DS 411 skal betonens styrke imidlertid kontrolleres på støbte, cylinderformede prøvelegemer med en diameter på 150 mm og en højde på 300 mm. Kontrollen skal ske efter 28 døgn for beton fremstillet af alle cementer. Prøvnningen foretages i henhold til DS 423.23. Prøvelegemerne fremstilles og opbevares indtil prøvningen under vand ved 20° C ± 4° C, som angivet i DS 423.21.

Tabel 3.20 giver eksempler fra den britiske betonnorm på typisk styrkeudvikling som funktion af alderen for betoner på forskellige karakteristiske styrkeniveauer. Tabel 3.20 bygger på forudsætningerne om brug

Tabel 3.20. Karakteristisk styrke af beton ved forskellig alder, efter den britiske betonnorm, CP 110 (omregnet til cylinderstyrke)

Karakteristisk 28 døgn styrke, MPa	Karakteristisk styrke ved alder:				
	7 døgn MPa	2 mdr. MPa	3 mdr. MPa	6 mdr. MPa	1 år MPa
20.0	13.5	22	23	24	25
25.0	16.5	27.5	29	30	31
30.0	20	33	35	36	37
40.0	28	44	45.5	47.5	50
50.0	36	54	55.5	57.5	60
60.0	45	64	65.5	67.5	70

af almindelig Portland cement og fugtigt lagret beton ved 20° C. Hvis betonen lagres ved højere temperaturer, øger hastigheden af cementens kemiske reaktioner, og dermed accelereres betonens styrkeudvikling. Ved lavere lagringstemperaturer foregår styrkeudviklingen til gengæld langsommere. For at styrkeudviklingen skal ske normalt, må betonen ikke tørre ud, og temperaturen må ikke være lavere end 0° C. Ved udtørring og ved temperaturer under frysepunktet stopper cementens kemiske reaktioner, og betonens styrkeudvikling går i stå.

#### 3.4.2 Valg af cementtype under hensyntagen til betons styrke

Tabel 3.21 giver en række nøgledata for alle danske cementtyper. Tabellen omfatter gennemsnitsværdier for 1, 3, 7, 17 og 28 døgn styrker for 150 x 300 mm betoncylindre fremstillet med de forskellige cementtyper, med typiske danske tilslagsmaterialer og med et effektivt vand-cement forhold på 0.50. Hvis den i dette kompendium beskrevne metode skal bruges ved proportionering af beton, som fremstilles med udenlandske cementer og tilslagsmaterialer eller efter udenlandske normer, må tilsvarende styrkedata fremskaffes for de i de udenlandske normer krævede former og størrelser af prøvelegemer. For at fremskaffe relevante nøgledata kan det være nødvendigt at udføre en række forførsøg.

Iøvrigt henvises til den generelle diskussion af Portland cements egen-skaber i afsnit 3.3.3.

3.4.3 Valg af tilslagsmaterialer under hensyntagen til betons styrke

Tilslaget art og tilstand har indflydelse på betonens styrke. Således vil et naturligt forekommende stenmateriale med glatte overflader og velafrundede korn som regel give en lavere betonstyrke end et tilsvarende knust materiale. Ligeledes vil et porøst tilslag med lav densitet, og tilslag med et stort indhold af bløde forvitrede partikler, give en beton med lavere styrke end en tilsvarende beton, som fremstilles med tætte, hårde og stærke korn. Den negative virkning af bløde, porøse og forvitrede partikler vil være større, jo højere betonstyrke man tilsigter. Det vil dog som regel være muligt at fremstille beton med middelstyrker op til 45 MPa med usorterede danske bakke- og sømaterialer. For at opnå højere betonstyrker må man bruge sortererede materialer eller knuste klippematerialer.

DS 405 angiver metoder til vurdering af stenenes kvalitet. De fleste af disse metoder har dog til hensigt at sikre betonens holdbarhed, snarere end høj styrke. Prøveblandinger med en aktuel beton forbliver den eneste sikre måde, på hvilken man kan bestemme et foreliggende tilslagsmateriales styrkemæssige egenskaber. Skulle det ved forprøvningen vise sig, at tilslaget har dårligere styrkeegenskaber end antaget, må der kompenseres for dette ved at sænke vand-cement forholdet og omproportionere betonen som vist i afsnit 4.4.4.4.

Sandets kvalitet, stenstørrelsen og kornkurven har også betydning for betonens styrke; men disse faktorer ignoreres som regel ved selve proportioneringen. Der justeres i stedet for deres indvirkning på grundlag af resultaterne fra den senere forprøvning. Betydningen af disse faktorer vokser med betonens tilsigtede styrkeniveau.

3.4.4 Valg af tilsætningsstoffer under hensyntagen til betons styrke

Tilsætningsstoffer bruges sjældent med primært formål at øge betonens slutstyrke. Alligevel har tilsætningsstofferne på mange måder betydning for betonens styrke.

Tabel 3.21. Karakteristiske egenskaber for danske cementer. De i tabellen anførte tal må kun betragtes som vejledende. Styrketallene er ikke minimumsværdier, men typiske gennemsnitssværdier, hvorfor udsving i både opad- og nedadgående retning kan forventes afhængig af materiale typer, materialevariationer, arbejds- og prøvningens udførelse m.v.

Cement	Gennemsnitlige betonstyrker i MPa; v/c = 0.5 Cylindriske prøvelegemer med dimensioner 150/300 mm. Vandlagret ved 20° C					Bindetid, i timer beg-slut	Finhed specifik overflade i cm <sup>2</sup> /g	Kornhobs- densitet kg/m <sup>3</sup>	Korn- densitet kg/m <sup>3</sup>
	1 døgn	3 døgn	7 døgn	14 døgn	28 døgn				
Standard-Cement	12	24	32	35	40	2½-5	4400	1250	2900
Rapid-Cement	15	27	35	40	45	2-4	4300	1250	3100
Lavalkali Sulfatbestandig Cement	10	22	32	35	40	3-5	3000	1300	3150
Hvid Portland Cement	15	30	40	45	50	1½-4	4000	1200	3150

Luftindblandende tilsætningsstoffer bruges, som tidligere nævnt, til at forbedre betonens bearbejdelighed og frostbestandighed. Det er en utilrigtig bivirkning, at de samtidig reducerer betonens styrke med ca. 5.5% for hver procent luft, der indblandes. Typisk indblandes 6% luft for at øge betonens frostbestandighed. Styrkereduktionen på grund af luftindblanding kan således opgå til 35%. Dette må der nødvendigvis kompenseres for ved omproportionering af betonen som vist i afsnit 3.6.

Tilsætning af vandreducerende tilsætningsstoffer, samtidig med at betonens vandindhold reduceres, medens dens cementindhold og konsistens forbliver uændret, giver anledning til fremstilling af beton med lavere vand-cement forhold og dermed højere styrke og tæthed. Betonens trykstyrke øges svarende til reduktionen af vand-cement forholdet. Ved anvendelse af superplastificerende tilsætningsstoffer under samtidig forøgelse af betonens cementindhold kan man fremstille beton med styrker over 100 MPa. Dette kræver dog brug af tilslagsmaterialer med særlig høj egenstyrke. En nærmere diskussion af såkaldte højstyrkebetoner ligger imidlertid uden for rammerne af dette kompendium.

Ved tilsætning af vandreducerende tilsætningsstoffer kan betonens cementindhold naturligvis også reduceres, således at vand-cement forholdet og betonstyrken bibeholdes, uden at konsistensen ændres. Dette gøres sjældent af økonomiske grunde, fordi prisen på tilsætningsstoffet som regel overstiger besparelsen i cement; men mindre cement i en beton med høj styrke og derfor højt cementindhold reducerer både betonens svind, krybning og varmeudvikling. Dette er af betydning, hvis man skal undgå dannelse af termorevner i massive konstruktioner, eller når man ønsker at reducere forspændingstabene i forspændt beton, eller at reducere risiko for krakelering og revnedannelse i betongulve. Endelig kan man, som tidligere nævnt, ved hjælp af superplastificerende tilsætningsstoffer fremstille såkaldt flydebeton med højt udbredelsesmål, der selv efter pumpning uden yderligere bearbejdning flyder ud, omslutter armeringsjernene og indstiller sig med en jævn og vandret overflade.

Betonens tidlige styrke kan øges ved indblanding af et accelererende tilsætningsstof som for eksempel kalciumklorid. Acceleratorer bruges hovedsagelig ved vinterstøbning for at modvirke den ugunstige indvirkning af lave temperaturer på betonens styrkeudvikling. Derimod bør

acceleratorer ikke bruges ved normale eller høje udstøbningstemperaturer, fordi de reducerer betonens afbindingstid så meget, at man i mange tilfælde ikke kan nå at udstøbe og komprimere betonen i formene, og at arbejde overfladerne, inden den stivner. Iøvrigt aftager den procentuelle forøgelse af betonens tidlige styrke med øgende udstøbningstemperatur.

Betonens afbindingstid kan forlænges ved tilsætning af et afbindingsforsinkende eller retarderende tilsætningsstof til betonen. Retardatorer bruges med fordel ved betonstøbning i varmt vejr, når betonens normale afbindingstid kan blive så kort, at transport, udstøbning og komprimering af den friske beton er vanskelig eller umulig. Sådanne tilsætningsstoffer skal imidlertid bruges med stor forsigtighed, fordi betonens afbinding og hårdning helt kan forhindres ved overdosering. Virkningen af et foreliggende afbindingsforsinkende tilsætningsstof beror på cementens kemiske sammensætning. Doseringsmængden kan kun fastlægges på grundlag af forprøvning med foreliggende cement og tilslag.

#### 3.4.5 Sammenhæng mellem betons trykstyrke og vand-cement forhold

Bolomey's lov, der angiver sammenhængen mellem hårdnede betonblandingers vand-cement forhold og trykstyrke, bringes i erindring. Bolomey's lov udtrykker, at trykstyrken af hårdnede betonblandinger, der fremstilles af samme råmaterialer, under samme lagringsforhold, og som prøves ved samme alder, udelukkende beror på det effektive vand-cement forhold, medens trykstyrken er uafhængig af det absolutte vand- og cementindhold. Figur 3.22 viser den generelle sammenhæng mellem trykstyrke og effektivt vand-cement forhold hos beton. Kurverne, som hver for sig er uafhængige af betonens alder, er gennemsnitsværdier for et meget stort antal betonblandinger, fremstillet med mange forskellige nutidige Portland cementer og forskellige typer tilslag. For en given cement og et givet tilslagsmateriale vil kurveformen kunne afvige en smule fra de kurver, der er vist i figur 3.22, men afvigelserne er som regel så små, at man kan se bort fra dem ved betonproportioneringen.

Tabel 3.21 giver typiske data for beton med et effektivt vand-cement forhold på 0.50, som kan bruges til at fastlægge et referencepunkt i figur 3.22, svarende til den cement og alder på betonen, som er aktuell.

Disse styrkedata gælder for beton fremstillet med et middelstort indhold af danske cementer og danske sø- og bakkematerialer, og som er lagret ved 20° C. Den tidlige styrkeudvikling af federe blandinger sker hurtigere, således at 7-døgns styrken meget vel kan overstige 75% af 28-døgns styrken. Omvendt kan 7-døgns styrken af magre betonblandinger blive mindre end 65% af 28-døgns styrken.

### 3.4.6 Variationer i betons styrke

Vandindholdet, vand-cement forholdet, cementtypen og dens styrkeniveau, tilslaget art og gradering, betonens alder ved prøvningen og lagringsforholdene er nogle af de væsentligste faktorer, der tages hensyn til ved betonproportioneringen. Hvis disse faktorer imidlertid varierer under den løbende produktion, så vil betonens styrke naturligvis også variere.

Den samlede styrkevariation, der konstateres under en løbende betonproduktion, skyldes i hovedsagen:

- 1) Variationer i delmaterialernes kvalitet
- 2) Variationer i betonens blandingsforhold ved afvejningen
- 3) Variationer i prøveudtagningsprocedurer, lagringsforhold og prøvebetingelser.

Under den løbende produktion forekommer der altid variationer både i cementens og tilslagets egenskaber. Variationer i tilslagets gradering og kornform gør det nødvendigt løbende at justere betonens vandindhold for at opretholde konsistensen. Hvis cementindholdet ikke justeres samtidig med vandindholdet, således at vand-cement forholdet holdes konstant, hvilket sjældent er tilfældet i praksis, vil betonens styrke naturligvis også variere.

Variationer i betonens blandingsforhold kan dels skyldes fejl eller unøjagtigheder i produktionsanlægget; dels kan de skyldes den måde, på hvilken anlægget betjenes. Sådanne variationer fra sats til sats er meget større, når delmaterialerne afmåles efter volumen, end når de afmåles efter vægt.

Dette skyldes blandt andet fugtsvelning hos sandet.\* Derfor kræver DS 411, at al afmåling af delmaterialer med undtagelse af vand skal foregå efter vægt. Afsnit 3.5.16 beskæftiger sig mere indgående med problemer i forbindelse med afmåling af delmaterialer efter volumen. Volumenafmåling er endnu almindelig praksis i de fleste udviklingslande.

En del af variationerne i den målte betonstyrke skyldes forskelligheder i prøveudtagningsprocedurer og fremstilling, lagring og prøvning af betoncylindrene. Sådanne variationer forekommer, selv om forskrifterne i DS 423 følges omhyggeligt.

Man ved ikke med sikkerhed, hvorledes disse tre grupper af faktorer bidrager til betonens samlede styrkevariation. Men størrelsesordenen af den samlede variation er belyst ved talrige undersøgelser. Denne viden bruges i afsnit 3.5.1 til 3.5.6 ved beregning af betonens proportionsstyrke, d.v.s. den middelstyrke for hvilken betonen skal proportioneres for at opfylde normens krav til karakteristisk styrke.

### 3.4.7 Statistisk fordeling af styrkeresultater

Som nævnt i afsnit 2.2.1 vil resultaterne fra styrkeprøvningen af en beton tilnærmelsesvis være statistisk normalt fordelte. Som vist i figur 2.1 repræsenterer arealet under fordelingskurven det samlede antal prøveresultater. Den procentdel af resultaterne, der er mindre end en vis foreskrevet styrke, som kaldes den karakteristiske styrke, er repræsenteret ved arealet under kurven til venstre for en lodret linie gennem den karakteristiske styrkeværdi på absцisseaksen. Fordelingskurven er fuldstændigt karakteriseret ved to parametre, dens middelværdi,  $f_{cm}$ , og dens spredning,  $s$ .

Middelværdien,  $f_{cm}$ , beregnes på grundlag af ligning 3.5

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \tag{3.5}$$

\* Se iøvrigt T.C. Hansen, "Vejledning i elementær grusprøvning", LBM Teknisk Rapport 113/82.

Standardafvigelsen,  $s$ , beregnes på grundlag af ligning 3.6

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - f_{cm})^2}{n-1}} \quad (3.6)$$

hvor  $x$  er et enkelt prøveresultat,  $n$  er antal prøveresultater, og  $f_{cm}$  er middelværdien af  $n$  prøveresultater.

I sådanne tilfælde, hvor standardafvigelsen må omregnes, efterhånden som prøveresultaterne indløber, kan det være mere bekvemt at bruge ligning 3.7 ved beregning af standardafvigelsen:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x^2) - \frac{(\sum x)^2}{n}}{n-1}} \quad (3.7)$$

Alternativt kan enkeltresultaternes variation udtrykkes ved variationskoefficienten i stedet for spredningen. Variationskoefficienten, der betegnes  $\delta$ , er pr. definition spredningen divideret med middelværdien

$$\delta = \frac{s}{f_{cm}} \quad (3.8)$$

Iøvrigt foretages beregningen af  $f_{cm}$  og  $s$  mest bekvemt på en elektronisk lommeregner, der er forsynet med taster for statistiske funktioner.

Da betonens styrkeresultater er statistisk normalt fordelte, vil der altid være en vis sandsynlighed for at opnå prøveresultater, der ligger under den foreskrevne styrke. Derfor foreskrives betonens styrke i DS 411 ikke som en absolut minimestyrke, under hvilken der aldrig må forekomme prøveresultater. Dette ville være meningsløst. Derimod foreskrives betonstyrken som en såkaldt karakteristisk styrke, under hvilken der kun må forekomme en vis procentdel af prøveresultaterne, populært kaldet "undertramp", ved uendelig mange målinger.

Den karakteristiske styrke kan defineres for et vilkårligt procentuelt antal undertramp. DS 411 definerer således den karakteristiske styrke ved 10%-fraktilen, d.v.s. den styrkeværdi, under hvilken højst 10% af

prøveresultaterne vil befinde sig ved uendeligt mange målinger, såfremt betonen netop opfylder normens krav.

I betonnormen DS 411 af 1973 kontrollerede man betonens karakteristiske styrke. I betonnormen af 1984 er beslutningsreglen ændret, således at det i princippet er sikkerhedsniveauet, der kontrolleres. Samtidig har man valgt at udnytte et eventuelt forhåndskendskab til variationerne i betonproduktionen. Dette nye sikkerhedsgrundlag medfører, at kravet til betonens karakteristiske styrke afhænger af variationerne på betonstyrken, som udtrykt ved variationskoefficienten  $\delta$ .

Det ligger uden for rammerne af dette kompendium at forklare sikkerhedsfilosofien bag DS 411-84. Den interesserede læser henvises til C.F. Justesen "Betonkonstruktioner - DS 411, Ny Norm", Betonteknik 4/06/1984, C.T.O., Ålborg Portland 1984. Vi skal i stedet koncentrere os om at etablere et praktisk værktøj til brug ved proportionering og styrkekontrol af beton, som er i overensstemmelse med normens generelle retningslinier.

### 3.5 Proportionering af almindelig beton

#### 3.5.1 Beregning af betonens proportioneringsstyrke og godkendelse af beton i henhold til DS 411

Krav til betonens karakteristiske styrke formuleres af den rådgivende ingeniør på grundlag af de retningslinier, som er angivet i afsnit 2.2.1. Entreprenøren skal stille arbejdskraft og tilsyn til rådighed med en erfaring, der er i overensstemmelse med kravene i DS 411 for vedkommende kontrolklasse. Disse krav er angivet i tabel 2.4 og 2.5.

Som følge af kvalitetsvariationer i betonproduktionen og stikprøvekøntrollens usikkerhed skal betonens blandingsforhold fastlægges (man siger, at betonen skal "proportioneres") for en vis middelstyrke, den såkaldte proportioneringsstyrke,  $f_{cp}$ , der ligger noget over den foreskrevne karakteristiske styrke,  $f_{ck}$ . Proportioneringsstyrken beregnes på grundlag af følgende formel:



$$f_{cp} = k_p \cdot f_{ck} \quad (3.9)$$

hvor  $f_{cp}$  er proportioneringsstyrken,  $f_{ck}$  er den foreskrevne karakteristiske styrke, og  $k_p$  er en faktor, hvis størrelse beror på variationskoefficienten og den valgte påtalerisiko.

Spredningen,  $s$ , og variationskoefficienten,  $\delta$ , er som nævnt i afsnit 2.2.1 og 3.4.7 mål på betonproduktionens kvalitetsvariation.  $s$  og  $\delta$  kan beregnes på grundlag af  $n$  individuelle prøveresultater  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ved hjælp af følgende formler:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - f_{cm})^2}{n-1}} \quad (3.6) \quad \delta = \frac{s}{f_{cm}} \quad (3.8)$$

hvor  $x$  er individuelt prøveresultat,  $n$  er antallet af resultater,  $f_{cm}$  er middelværdien af  $n$  resultater, og

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.5)$$

Der er fire praktiske problemer forbundet med at beregne betonens proportioneringsstyrke på grundlag af ligning 3.9, når den karakteristiske styrke er foreskrevet:

- 1) Konstruktionen skal opdeles i kontrolafsnit
- 2) Antallet prøver  $n$  pr. kontrolafsnit skal fastlægges
- 3) Variationskoefficienten  $\delta$  skal vælges
- 4) Proportionerings  $k$ -værdien,  $k_p$ , skal bestemmes

### 3.5.2 Opdeling af en konstruktion i kontrolafsnit og fastlæggelse af antallet prøver pr. kontrolafsnit

Ifølge DS 411 kan den udførende vælge mellem selv at fremstille konstruktionsbeton, d.v.s. beton til bærende konstruktioner, på byggepladsen, såkaldt pladsfremstillet beton, eller at købe betonen fra en fabrik, der

er tilsluttet en anerkendt kontrolordning, såkaldt fabriksbeton. Dansk Fabriksbetonkontrol er den eneste anerkendte kontrolordning i Danmark, som garanterer, at kvalitetskontrollen med betonen er tilrettelagt og udføres i overensstemmelse med normens principper.

Hvis den udførende bruger pladsfremstillet beton, skal han ifølge Boligministeriets bygningsreglement selv føre kontrol både med delmaterialer og beton i den udstrækning, som det fremgår af tabel 2.4.

I henhold til DS 423.1, der omhandler kontrol ved stikprøveudtagning og statistisk vurdering af observationer, skal konstruktionen ved brug af pladsfremstillet beton opdeles i kontrolafsnit, og antallet af stikprøver  $n$  skal aftales for hvert kontrolafsnit.

Betonkonstruktionens opdeling i kontrolafsnit fastlægges af den udførende i samarbejde med tilsynet under hensyntagen til de enkelte konstruktionsdeles eller kontrolafsnits betydning for konstruktionernes sikkerhed og holdbarhed, samt under hensyntagen til risikoen for underkendelse af kontrolafsnittene, sammenholdt med støbetakt, tidsplan, o.s.v.

Et kontrolafsnit skal være et veldefineret konstruktionsafsnit af konstruktionsmæssigt samme type elementer som f.eks. etageadskillelser, søjler eller bjælker i en enkelt etage, eller et enkelt fag i en bro støbt med samme betonsammensætning.

Ifølge BPS (Byggeriets Planlægnings System) Publikation 15, "Typiske beskrivelsesafsnit inden for bygningsområdet - betonarbejde", Marts 1977, bør et kontrolafsnit ikke omfatte mere end en etage i et byggeafsnit, eller tre ugers støbearbejde, eller 100 m<sup>3</sup> beton. Maksimumstørrelse af et kontrolafsnit bør dog overvejes i hvert enkelt tilfælde og kan, hvis det findes hensigtsmæssigt, overstige de anførte grænser.

For hvert enkelt kontrolafsnit bør der udtages mindst fire betonprøver. Dog bør der udtages mindst én prøve pr. dag af hver betonsammensætning, der produceres i dagens løb og mindst én prøve for hver 50 m<sup>3</sup> beton. Hver prøve består af mindst to prøvecylindre.

Hvis der vælges kontrolafsnit med væsentligt flere end  $n = 4$  stikprøver, kræves det i henhold til betonnormens sikkerhedsfilosofi, at man dokumenterer, at middelværdiniveauet er det samme i hele kontrolafsnittet. En sådan kontrol kan foretages ved hjælp af statistiske kontrolkort; men da der i realiteten kun er ulemper forbundet med brug af store kontrolafsnit og høje værdier af  $n$ , kan det stærkt anbefales at vælge kontrolafsnit, som netop omfatter  $n = 4$  stikprøveresultater, såkaldte "grupper på fire".

Hvis der under arbejdets udførelse opstår begrundet formodning om, at der, ud over hvad der svarer til sædvanlige, tilfældige variationer, sker væsentlige ændringer i de materialeegenskaber eller produktionsbetingelser, som er forudsat holdt konstant, skal et nyt kontrolafsnit påbegyndes. Bortset fra sådanne tilfælde bør de fastlagte vedtagelser om kontrolafsnit og om antal observationer ikke ændres under arbejdets gang.

Hvis entreprenøren vælger at købe beton fra en fabrik, kan kontrollen med betonens delmaterialer og med betonen helt eller delvis baseres på resultater fra fabrikkens løbende kvalitetskontrol, såfremt denne er tilrettelagt og udføres i overensstemmelse med normens principper, og såfremt fabrikken er tilsluttet Dansk Fabriksbetonkontrol.

For beton fra en fabrik, der er tilsluttet Dansk Fabriksbetonkontrol kan entreprenørens modtagekontrol begrænses til at omfatte dels kontrol af køresedler for blandt andet at sikre, at transporttiden ikke har været for lang, dels en visuel bedømmelse af betonens konsistens og sammensætning for at få sandsynliggjort, at den leverede beton ikke afviger fra den forudsatte. Yderligere modtagekontrol på byggepladsen kan udelades, hvis parterne er enige om det. I visse tilfælde kan det dog være ønskeligt at lade modtagekontrollen være baseret på en kontrolregel, hvor såvel oplysninger fra produktionsstyringen som resultater fra en mindre stikprøve fra leverancen indgår i acceptkriteriet. Der kan her benyttes individuelle statistiske metoder, når blot det sikres, at det generelle krav til sikkerhedsniveauet overholdes. Sådanne statistiske metoder er under udarbejdelse, men foreligger ikke endnu.

Når der bruges fabriksbeton og visuel identifikationskontrol, skal konstruktionen ikke opdeles i kontrolafsnit, og entreprenøren skal normalt ikke udtage prøver på byggepladsen.

En kontrolleret betonfabriks produktionsprogram skal være fastlagt i henhold til DS 411 og mindst indeholde betontyper i styrkeklasserne 5-10-15-20-25-30 MPa samt betontyper, der opfylder DS 411's krav til alle miljøklasser, hvad angår vand-cement forhold, gruskvalitet og indhold af luft. Ovennævnte betontyper, eventuelt udvidet med styrkeklasserne 35-40-45-50 MPa, benævnes programbetoner. Betoner, til hvilke der er stillet krav, som ikke kan opfyldes ved anvendelse af programbetoner, benævnes specialbetoner. Specialbetoner er ikke omfattet af kontrolordningen og skal derfor betragtes som pladsfremstillet beton.

Med henblik på at opnå de tilsigtede egenskaber skal fabrikken føre løbende kontrol med den friske betons luftindhold, sætmål, rumvægt, vand-cement forhold, betonsammensætning og udbytte, samt med den hærtnede betons trykstyrke. For hver enkelt programbeton skal produktionen opdeles i kontrolafsnit, og antallet stikprøver  $n$  skal aftales for hvert kontrolafsnit. Som hovedregel kræver Dansk Fabriksbetonkontrol brug af kontrolafsnit, som omfatter  $n = 4$  stikprøveresultater.

Der udtages hver produktionsdag mindst én betonprøve for hver  $75 \text{ m}^3$  totalproduktion af programbetoner den pågældende dag. Dog skal fra hver af produktionsprogrammets styrkeklasser, og i hvert fald fra 5-30 MPa, udtages mindst fire prøver inden for en prøvningsperiode på seks måneder. Dog mindst én prøve hver anden måned.

Betonens styrke, luftindhold, sætmål og densitet skal bestemmes på hver udtagen prøve. Desuden skal vand-cement forholdet bestemmes på mindst alle prøver fra styrkeklasserne  $> 25 \text{ MPa}$ . Herudover skal der foretages kontrol af udbytte\* mindst én gang om måneden.

For at eftervise, at normens krav til styrke er opfyldt, udtages et sæt på mindst to prøvecylindre af hver prøve. Trykstyrken af hver af disse cylindre bestemmes og sættets gennemsnitsværdi beregnes. Denne gennemsnitsværdi, som kaldes et stikprøveresultat, anvendes ved den statistiske vurdering.

\* Med kontrol af udbytte menes fysisk kontrol af, at fabrikken virkelig leverer  $1 \text{ m}^3$  beton, når den hævder at fremstille  $1 \text{ m}^3$  beton på grundlag af sine blanderecepter.

Dokumentationen af, at kravene til karakteristisk styrke er opfyldt, udføres for hver styrkeklasse for sig og skal omfatte n = 4 stikprøve-resultater, og må højst omfatte en periode på seks måneder ad gangen.

Da det normalt ikke er praktisk muligt at bringe kontrolafsnitenes størrelse og antallet prøver pr. kontrolafsnit på en fabrik og en byggeplads i overensstemmelse med hinanden, må den udførende vælge mellem pladsfremstillet beton, hvorved han selv overtager kontrollen med betonen, eller fabriksbeton, hvorved ansvaret for betonens kvalitet helt overlades til fabrikken.

For at skabe sikkerhed for, at den på byggepladsen afleverede beton virkelig har samme kvalitet som den beton, der prøves på fabrikken, udtager fabrikkens personale fra tid til anden stikprøver af den afleverede beton, såkaldte byggepladsprøver. Der udtages mindst én prøve for hver 1000 m<sup>3</sup> produceret beton, dog mindst fire prøver om måneden, hvoraf mindst to af prøverne skal være fra styrkeklasser over 15 MPa. Prøverne undersøges af fabrikken i henseende til styrke, konsistens og luftindhold, og resultaterne sammenholdes med resultaterne fra fabrikkens løbende kontrol.

### 3.5.3 Beregning af k<sub>n</sub>-værdier for godkendelse af beton

Som tidligere nævnt, ligger det uden for rammerne af dette kompendium at forklare sikkerhedsfilosofien bag DS 411-84 og den statistiske baggrund for beslutningsreglerne i forbindelse med proportionering og godkendelse af beton. Disse emner er nærmere belyst af C.F. Justesen, "Betonkonstruktioner - DS 411, Ny Norm", Betonteknik 4/06/1984, C.T.O. Ålborg Portland, 1984. I det følgende anføres beslutningsreglerne uden nærmere forklaring.

I henhold til DS 411-84 godkendes et kontrolafsnit, hvis følgende ulighed er opfyldt for stikprøvens gennemsnit f<sub>cm</sub>:

$$f_{cm} > f_{cg} = k_n f_{ck} \quad (3.10)$$

hvor f<sub>cm</sub> = gennemsnit af styrkeresultater i stikprøven, i MPa

f<sub>cg</sub> = godkendelsesstyrken, i MPa

f<sub>ck</sub> = foreskrevet karakteristisk trykstyrke, i MPa

k<sub>n</sub> = faktor, der afhænger af stikprøvestørrelsen, n, og variationskoefficienten, δ<sub>g</sub>, for godkendelse af betonen. Reglerne for fastlæggelse af δ<sub>g</sub> er beskrevet i afsnit 3.5.4.

Idet der regnes med, at stikprøvegennemsnittet følger en logaritmisk normalfordeling, kan k<sub>n</sub> beregnes på grundlag af ligning 3.11

$$k_n = \exp\left[\left(\frac{1}{\sqrt{n}} + 2.28\right) \cdot \delta_g - 0.1875\right] \quad (3.11)$$

hvor exp = eksponentialfunktionen

n = antal prøveresultater i stikprøven, som repræsenterer kontrolafsnittet.

δ<sub>g</sub> = variationskoefficienten for godkendelse af betonen.

I tabel 3.22 er k<sub>4</sub> udregnet for n = 4 og en række forskellige værdier af δ<sub>g</sub>. For n ≠ 4 beregnes k<sub>n</sub> på grundlag af ligning 3.11.

Tabel 3.22. Faktoren, k<sub>4</sub>, som funktion af variationskoefficienten δ<sub>g</sub>. Værdierne er udregnet på grundlag af ligning 3.11

δ <sub>g</sub>	k <sub>4</sub>
0.05	0.953
0.06	0.980
0.07	1.007
0.08	1.036
0.09	1.065
0.10	1.095
0.11	1.126
0.12	1.158
0.13	1.190
0.14	1.223
0.15	1.258
0.16	1.294
0.17	1.330
0.18	1.368
0.19	1.406
0.20	1.446
0.21	1.487
0.22	1.529

Tabel 3.23. Forventede værdier for variationskoefficienten af styrkeresultater beroende på omfanget af materialekontrol og tilsyn

Variationskoefficient $i$ %	Kontrol med materialer		Afmåling af materialer	Tilsyn
	Tilslag	Vand		
5	Tre stenfraktioner og sand graderet inden for snævre grænser	Kontrolleret vand-cement forhold	Efter vægt	Laboratoriekontrol
10	Ditto	Ditto	Ditto	Streng kontrol på byggepladsen. Fabriksbeton. Betonelementfabrikation
12	Ditto	Ditto	Omhyggelig afmåling efter volumen med cement afvejjet	Streng pladskontrol
13	To stenfraktioner og sand graderet inden for snævre grænser	Ditto	Efter vægt	Ditto
14	To stenfraktioner og sand graderet inden for videre grænser	Ditto	Efter vægt	God pladskontrol
14-16	En stenfraktion med sand graderet inden for vide grænser	Ditto	Omhyggelig afmåling efter volumen med cement afvejjet	Ditto
16-20	Ditto	Ditto	Efter vægt	Ditto
20-25	Ditto	Tilsætning af vand overladt til blandedemesteren	Omhyggelig afmåling efter volumen	Pladskontrol nu og da
25-50	Ditto eller rågrus	Ditto	Unøjagtig afmåling efter volumen	Dårlig pladskontrol
			Ditto	Inkompetent eller manglende pladskontrol

Man bemærker, at  $k_4 < 1$  for  $\delta_g \leq 0.006$ , d.v.s. at betonen kan godkendes med en gennemsnitsstyrke, som er lavere end den foreskrevne karakteristiske trykstyrke. Dette forekommer umiddelbart overraskende, men det er korrekt. Det beror på en ejendommelighed i forbindelse med normens sikkerhedsfilosofi, som vi ikke skal komme nærmere ind på.

### 3.5.4. Bestemmelse af variationskoefficient for godkendelse af beton

Som det vil fremgå af det følgende, kan variationskoefficienten,  $\delta_g$ , som skal benyttes ved godkendelse af en betonproduktion, bestemmes efter to forskellige principper. Princip A involverer ikke nogen dokumentation, medens princip B kræver dokumentation.

#### 3.5.4.1 Fastlæggelse af variationskoefficient uden dokumentation (Princip A)

Det fremgår af tabel 3.23, at variationskoefficienten for en betonproduktion dels beror på omfanget af kontrollen med betonens delmaterialer, dels den måde på hvilken disse materialer afmåles og dels pålideligheden af tilsynet på byggepladsen.

Hvis der ikke foreligger nogen dokumentation for variationskoefficienten for en betonproduktion, kræver DS 411-84, at man bruger de  $\delta_g$ -værdier, der fremgår af tabel 3.24, i forbindelse med godkendelse af betonen i henhold til uligheden 3.10. Det bemærkes, at størrelsen af  $\delta_g$  beror på den karakteristiske betonstyrke  $f_{ck}$ . Det har nemlig vist sig, at disse værdier af  $\delta_g$  ligger på den sikre side, når der produceres beton under danske forhold.

Tabel 3.24.  $\delta_g$ -værdier, der skal benyttes, såfremt der ikke foreligger anden dokumentation (fra DS 411)

$f_{ck}$ - MPa	$\delta_g$
5	0.22
10	0.18
15	0.17
20	0.16
25	0.15
30	0.14
35	0.13
40	0.12
45	0.12
50	0.12

3.5.4.2 Bestemmelse af variationskoefficient med dokumentation  
(Princip B)

Såfremt der foreligger mindst 40 prøvningsresultater for blandinger med samme tilstræbte karakteristiske trykstyrke, og som er fremstillet med samme delmaterialer og samme personale, inden for højst 12 måneder, eller tilsvarende 100 prøvningsresultater inden for højst 24 måneder, kan den hertil hørende variationskoefficient  $\delta_g$  dokumenteres på følgende måde:

Prøvningsresultaterne deles i grupper på 4 i den kronologiske rækkefølge, hvori de forekommer. For hver gruppe udregnes gennemsnit og stikprøvespredning, som det fremgår af tabel 3.25 og regneeksempel nr. 7 i afsnit 3.5.4.3.

Tabel 3.25. Inddeling af prøvningsresultaterne i grupper på 4, kronologisk. Udregning af gennemsnit og spredning for grupperne

	Prøvningsresultater				Gennemsnit	Stikprøvespredning
Gruppe 1	$x_{11}$	$x_{21}$	$x_{31}$	$x_{41}$	$m_1$	$s_1$
Gruppe 2	$x_{12}$	$x_{22}$	$x_{32}$	$x_{42}$	$m_2$	$s_2$
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
Gruppe p	$x_{1p}$	$x_{2p}$	$x_{3p}$	$x_{4p}$	$m_p$	$s_p$

I tabel 3.25 er medtaget p grupper svarende til, at der i alt har været  $4 \cdot p$  prøvningsresultater. Den dokumenterede variationskoefficient  $\delta_g$  kan derefter udregnes af ligning 3.12

$$\delta_g = \sqrt{p \cdot \frac{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_p^2}{m_1 + m_2 + \dots + m_p}} \quad (3.12)$$

Denne værdi kan dog kun bruges i stedet for den "udokumenterede værdi" i tabel 3.24, såfremt den er mindst 18% mindre end den udokumenterede værdi, hvis beregningerne baseres på mellem 40 og 99 resultater, og mindst 11% mindre, hvis beregningerne baseres på mindst 100 resultater. Disse to procentsatser svarer til, at såfremt ændringerne er mindre, er der rent statistisk stor chance for, at ændringerne er ren og skær tilfældige. At der er forskellige grænseværdier, afhængig af om prøveantallet er 40-96 eller mindst 100, hænger statistisk set sammen med, at jo større det samlede prøveantal er, desto mere sikkert kan man udtale sig.

I tabel 3.26 er angivet den højst tilladelige værdi for den beregnede  $\delta_g$ , hvis princip B skal kunne anvendes.

Tabel 3.26. Maksimale værdier for  $\delta_g$ , princip B

Styrkeklasse, MPa	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\delta_g$ (DS 411 tabel)	0.22	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12
$\delta_g - 11\%$ (n = 100)	0.20	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.10	0.10
$\delta_g - 18\%$ (n = 40)	0.18	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09

3.5.4.3 Regneeksempel nr. 7. Dokumentation af variationskoefficient for en betonproduktion\*

Fra en betonproduktion foreligger i løbet af en 10-måneders periode 56 resultater for en 25 MPa beton. Resultaterne er opstillet i tabel 3.27 og her opgivet linievis med 4 i hver linie, således at man herved får den gruppeopdeling, som er nødvendig ved beregning af "dokumenteret"  $\delta_g$ .

$\delta_g$  udregnes efter formel 3.12.

\* Eksemplet er taget fra C.F. Justesen: "Betonkonstruktioner - DS 411 - Ny norm 4/06/1984, C.T.O. Ålborg Portland, 1984.

I dette eksempel er der 14 grupper, det vil sige  $p = 14$ , og  $(s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_p^2)$  er udregnet som summen af sidste søjle i tabel 3.27.

$(m_1 + m_2 + \dots + m_p)$  er udregnet som summen af gennemsnitssøjlen (trede sidste søjle i tabel 3.27). Herefter får man

$$\delta_g = \sqrt{14} \frac{\sqrt{31,56}}{387,85} = 0.054 \quad (3.12a)$$

Ifølge tabel 3.26 skal der uden dokumentation regnes med en variationskoefficient på 0.15 for en  $f_{ck}$  på 25 MPa. Den ovenfor bestemte værdi er således 64% mindre end tabelværdien. Den kan derfor anvendes som "dokumenteret variationskoefficient" i beslutningsreglen ved modtagekontrol af leverancer fra den pågældende betonproduktion, når det drejer sig om den samme 25 MPa beton.

Tabel 3.27. Behandling af 56 prøvningsresultater med henblik på udregning af dokumenteret variationskoefficient

Gruppe nr.	Prøveresultater				Gennemsnit MPa $m_i$	Spredning MPa $s_i$	(Spredning) <sup>2</sup> (MPa <sup>2</sup> ) $s_i^2$
	$x_{1i}$	$x_{2i}$	$x_{3i}$	$x_{4i}$			
1	30.2	26.9	27.2	29.7	28.50	1.69	2.86
2	29.9	24.9	29.3	28.6	28.18	2.25	5.05
3	27.9	29.2	25.9	25.8	27.23	1.62	2.62
4	28.4	27.4	27.0	26.4	27.30	0.84	0.71
5	30.0	29.2	27.3	30.3	29.20	1.35	1.82
6	28.0	30.0	30.6	28.2	29.20	1.30	1.68
7	27.8	27.0	27.7	29.3	27.95	0.97	0.94
8	25.8	25.4	27.2	28.4	26.70	1.37	1.88
9	26.3	28.0	26.8	28.1	27.30	0.89	0.79
10	26.1	26.7	27.9	27.1	26.95	0.75	0.57
11	27.0	31.1	28.0	27.8	28.48	1.80	3.25
12	27.0	28.7	29.9	24.8	27.60	2.21	4.90
13	25.5	27.2	27.5	29.9	27.53	1.81	3.28
14	26.9	24.6	25.0	26.4	25.73	1.10	1.21
Sum					387.85		31.56

### 3.5.5 Beregning af betons proportioneringsstyrke

Som tidligere nævnt beregnes betonens godkendelsesstyrke,  $f_{cg}$ , ved at multiplicere betonens karakteristiske styrke,  $f_{ck}$ , med  $k_n$  som angivet i ligningerne (3.10a) og (3.11).

$$f_{cg} = k_n f_{ck} \quad (3.10a)$$

$$k_n = \exp\left[\left(\frac{1}{\sqrt{n}} + 2.28\right) \delta_g - 0.1875\right] \quad (3.11)$$

I tabel 3.28 er godkendelseskravene,  $f_{cg}$ , til stikprøvegennemsnittet vist for 10 foreskrevne karakteristiske betonstyrker,  $f_{ck}$ , under forudsætning af udokumenteret variationskoefficient,  $\delta_g$ , og under forudsætning af at  $n = 4$ .

For dokumenteret  $\delta_g$ -værdi og for alle andre værdier af stikprøvestørrelsen  $n \neq 4$  må formlerne 3.10a og 3.11 benyttes ved beregning af godkendelsesstyrken.

Tabel 3.28. Betons godkendelsesstyrke som funktion af betons karakteristiske styrke under forudsætning af stikprøvestørrelse  $n = 4$  og udokumenteret variationskoefficient  $\delta_g$

$f_{ck}$ (MPa)	$\delta_g$	$k_n$	$f_{cg}$ (MPa)
5	0.22	1.529	7.7
10	0.18	1.368	13.7
15	0.17	1.330	20.0
20	0.16	1.294	25.9
25	0.15	1.258	31.5
30	0.14	1.224	36.8
35	0.13	1.190	41.7
40	0.12	1.158	46.4
45	0.12	1.158	52.2
50	0.12	1.158	57.9

Det er imidlertid ikke tilstrækkeligt at vælge proportioneringsstyrken, således at den ligger lige over det mindste nødvendige stikprøvegennemsnit for godkendelse. Gjorde man blot det, ville stikprøvegennemsnittet i ca. halvdelen af tilfældene give anledning til forkastelse. Tilfældighederne gør jo, at stikprøvegennemsnittet i ca. halvdelen af tilfældene falder over henholdsvis under proportioneringsstyrken.

Der må anvendes et passende styrketillæg, så gennemsnittet kun i en tilpas lille del af prøvetilfældene falder under. Sandsynligheden for, at gennemsnittet falder under, kaldes påtalerisiko, se figur 3.23.

Idet der som tidligere regnes med, at stikprøvegennemsnittet følger en logaritmisk normalfordeling, kan proportioneringsstyrken udregnes til:

$$f_{cp} = k_n \cdot f_{ck} \cdot \exp\left[\alpha \cdot \frac{\delta_p}{\sqrt{n}}\right] \quad (3.13)$$

hvor  $\alpha$  afhænger af den valgte påtalerisiko og tages fra tabel 3.29.

Tabel 3.29.  $\alpha$  angivet for fire forskellige påtalerisici

Påtalerisiko	1%	2.5%	5%	10%
$\alpha$	2.33	1.96	1.64	1.28

Det bemærkes, at  $k_p$  i ligning 3.9 kan udtrykkes, som vist i ligning 3.13a

$$k_p = \exp\left[\left(\frac{1}{\sqrt{n}} + 2.28\right) \delta_g - 0.1875\right] \times \exp\left[\alpha \frac{\delta_p}{\sqrt{n}}\right] \quad (3.13a)$$

I betragtning af de vanskeligheder, der er forbundet med at få forkastet et kontrolafsnit, vil en betonproducent som regel vælge en påtalerisiko på 1% eller mindre, svarende til at producenten kun løber en risiko for at få forkastet højst 1 ud af 100 kontrolafsnit.

Det bemærkes, at man opererer med to forskellige variationskoefficienter i formel 3.13 for beregning af betons proportioneringsstyrke:

$\delta_g$  som er den variationskoefficient, der kræves anvendt i beslutningsreglen for modtagekontrol, enten den så er udokumenteret (taget fra tabel 3.24 eller den er dokumenteret (udregnet efter formel 3.12)),

$\delta_p$  som er den variationskoefficient, man rent faktisk har i produktionen.

I praksis viser det sig nemlig, at middelværdiniveauet for en betonproduktion pludseligt kan ændre sig i løbet af produktionen. Dette kan for eksempel skyldes periodevis og uforudsigelige variationer i kvaliteten af den leverede cement.

Kun hvis producenten foretager accelereret prøvning, som kan give en pålidelig forudsigtelse af betonens 28-døgns trykstyrke, således at der hurtigt kan gribes ind, hvis der sker en utilsigtet ændring af middelværdiniveauet, kan producenten med rimelig sikkerhed bruge en  $\delta_p$ -værdi ved betonproportioneringen svarende til den dokumenterede variationskoefficient  $\delta_g$ . DS 423.26, "Trykstyrke bestemt efter 24 timers accelereret hærning", beskriver en sådan accelereret prøvningsmetode.

Hvis der ikke foretages accelereret prøvning, eller hvis forholdet mellem betonens trykstyrke efter 24 timer og 28 døgn ikke er fastlagt med sikkerhed på grundlag af forsøg med den foreliggende cement og de foreliggende tilslagsmaterialer, bør entreprenøren bruge væsentligt højere  $\delta_p$ -værdier ved beregning af betonens proportioneringsstyrke, således at de spring, man erfaringsmæssigt kan komme ud for i middelværdiniveau, ikke leder til underkendelse af et eller flere af de små kontrolafsnit, før man opdager, at der er noget galt.

I mangel på danske erfaringer vedrørende størrelsen af sådanne uforudsigelige og periodevis spring i middelværdiniveauet for typiske betonproduktioner henvises til britiske undersøgelser (D.C. Teychenné, R.E. Franklin, and H.C. Erntroy, "Design of Normal Concrete Mixes", Department of the Environment, Building Research Establishment, HMSO, London, 1975). Disse undersøgelser viser, at man ved proportionering af beton, for hvilken der ikke udføres accelereret prøvning, med rimelighed kan bruge  $\delta_p$ -værdier fra tabel 3.30.

Tabel 3.30. Anbefalede mindsteværdier for  $\delta_p$  til brug ved proportionering af beton i en produktion, som ikke vil blive styret på grundlag af accelereret prøvning

$f_{ck}$ (MPa)	$\delta_p$
5	0.20
10	0.20
15	0.20
20	0.20
25	0.16
30	0.13
35	0.11
40	0.10
45	0.09
50	0.08

### 3.5.6 Regneeksempel nr. 8. Bestemmelse af proportioneringsstyrken for en beton

Bestem en rimelig proportioneringsstyrke for en 25 MPa betonproduktion med en dokumenteret variationskoefficient  $\delta_g = 0.054$ . Der vælges en stikprøvestørrelse på  $n = 4$ .

Med  $\delta = 0.054$  bliver efter formel 3.11:

$$k_n = \exp\left[\left(\frac{1}{\sqrt{4}} + 2.28\right) \cdot 0.054 - 0.1875\right]$$

$$= \exp[-0.0374] = 0.963$$

Det vil sige, at godkendelsesstyrken:

$$f_{cg} = k_n \cdot f_{ck} = 0.963 \cdot 25 = 24.1 \text{ MPa}$$

Vi antager i første omgang, at betonproducenten foretager accelereret prøvning, som kan afsløre spring i middelværdiniveauet på et meget tidligt tidspunkt. Vi antager endvidere, at producenten vælger en påtale-risiko på 1%, svarende til  $\alpha = 2.33$ . Ved proportioneringen kan producenten i dette tilfælde bruge den dokumenterede variationskoefficient  $\delta_p = \delta_g = 0.054$ . Betonens proportioneringsstyrke fås da ved at indsætte i formel 3.13

$$f_{cp} = 24.1 \exp\left[2.33 \cdot \frac{0.054}{\sqrt{4}}\right] = 25.7 \text{ MPa}$$

Lad os i anden omgang antage, at betonproducenten ikke foretager accelereret prøvning, som kan afsløre pludselige spring i middelværdiniveauet. I dette tilfælde bør producenten proportionere betonen under forudsætning af  $\delta_p = 0.16$  for  $F_{ck} = 25$  MPa, som aflæses af tabel 3.30. I dette tilfælde fås betonens proportioneringsstyrke ved at indsætte i formel 3.13

$$f_{cp} = 24.1 \exp\left[2.33 \cdot \frac{0.16}{\sqrt{4}}\right] = 29.0 \text{ MPa}$$

Hvis producenten ikke foretager accelereret prøvning, må han således proportionere og fremstille sin beton med et styrketillæg på 3.3 MPa, hvilket er dyrt i cementforbrug.

### 3.5.7 Fastlæggelse af betonens vand-cement forhold

Når betonens proportioneringsstyrke er beregnet, fortsætter betonproportioneringen med en bestemmelse af det vand-cement forhold, der er nødvendigt for at opnå den ønskede proportioneringsstyrke. Trykstyrken ved den foreskrevne alder for en beton, som fremstilles med den foreskrevne cementtype og et vand-cement forhold på 0.50, aflæses af tabel 3.31. Med denne styrke og et vand-cement forhold på 0.50 som indgangsværdier, opsøges et dertil svarende punkt i figur 3.22. Man tegner derefter en kurve i figur 3.22, som er parallel med de trykte kurver, til skæring med en vandret linie gennem ordinaten svarende til proportioneringsstyrken. Det til skæringspunkt svarende vand-cement forhold aflæses på abscisseaksen. Dette vand-cement forhold, som er afledt af styrkekravet, sammenlignes med det maksimalt tilladelige vand-cement forhold,



Tabel 3.31. Gennemsnitlige trykstyrker i MPa for beton fremstillet med et effektivt vand-cement forhold på 0.50 og forskellige danske cementer

Cement	Gennemsnitlige betonstyrker i MPa; v/c = 0.5 Cylindriske prøvelegemer med dimensioner 150/300 mm; Vandlagret ved 20° C				
	1 døgn	3 døgn	7 døgn	14 døgn	28 døgn
Standard-Cement	12	24	32	35	40
Rapid-Cement	15	27	35	40	45
Lavalkali Sulfat- bestandig Cement	10	22	32	35	40
Hvid Portland Cement	15	30	40	45	50

som af holdbarhedsmæssige grunde måtte være krævet i henhold til DS 411 for beton i moderat eller skærpet miljøklasse, se tabel 3.15. De laveste af disse to vand-cement forhold lægges til grund for den fortsatte proportionering.

### 3.5.8 Fastlæggelse af betonens konsistens

Beton bør altid fremstilles med den laveste konsistens, ved hvilken betonen uden vanskelighed kan komprimeres og bringes til fuldstændigt at omslutte armeringsjernene i det foreliggende konstruktionselement. Dog bør betonens sætmål aldrig overstige 15 cm, og det bør så vidt muligt være mindre end 10 cm. Tabel 2.6 giver retningslinier for valg af rimelig konsistens.

### 3.5.9 Fastlæggelse af største tilladelige stenstørrelse

Problemerne i forbindelse med fastlæggelse af den største tilladelige stenstørrelse er diskuteret i afsnit 2.2.4. Det anbefales, at den største tilladelige stenstørrelse ikke overskrider:

- 3/4 af mindste afstand mellem armeringsjernene
- 1/5 af mindste afstand mellem formsiderne
- 1/3 af pladetykkelsen
- 3/4 af mindste afstand mellem armeringsjern og formsider.

Det anbefales ofte i litteraturen af økonomiske grunde, at fremstille beton med den absolut største stenstørrelse, som opfylder ovenstående krav. Det påstås, at dette generelt leder til det mindst mulige cementforbrug og dermed den bedste økonomi. I denne forbindelse skal man imidlertid være opmærksom på, at der forekommer en styrkereduktion i beton, når stenstørrelsen øger ud over 16-20 mm. Derfor vil der sjældent være nogen økonomisk fordel forbundet med at bruge større sten end 32-40 mm. Da det samtidig er vanskeligt at undgå afblanding af store sten ved transport og komprimering af betonen, er der god grund til at sætte en øvre grænse på 32-40 mm for den største tilladelige stenstørrelse for beton til brug ved fremstilling af armerede konstruktioner. På grund af den ovenfor omtalte styrkereduktion med øgende stenstørrelse fremstilles højstyrkebeton som regel med en maksimal stenstørrelse på 16-20 mm.

Tilsynet bør altid kontrollere armeringsjernenes virkelige diameter og position i formene for at sikre sig, at kravene a til d med sikkerhed er opfyldt med den foreskrevne eller af entreprenøren valgte største stenstørrelse. Hvis dette ikke er tilfældet, bør tilsynet kræve den største tilladelige stenstørrelse nedsat, før støbningen påbegyndes.

Det skal understreges, at brug af for store sten i tilslaget, eller tilstedeværelse af store mængder overkorn i den største stenfraktion, er en af de væsentligste årsager til dannelse af stenreder i beton.

### 3.5.10 Fastlæggelse af betonens vandbehov

Betonens frie vandbehov skønnes på grundlag af tabel 3.32, på grundlag af tilslagets art, største stenstørrelse og den foreskrevne konsistens. Det bemærkes, at tilslagets kornstørrelsesforhold repræsenteres i tabellen alene ved  $d_{max}$ . Kornstørrelsesfordelingen, som også har en vis indflydelse, figurerer derimod ikke. Årsagen hertil er, at den procentuelle mængde af sand i det samlede tilslag (sandprocenten) og dets finhed afpasses indbyrdes ved benyttelse af den anbefalede proportioneringsmetode, hvorved deres respektive virkninger med hensyn til betonens vandbehov i nogen grad udbalanceres. Tilsvarende gælder, at større cementindhold medfører lavere sandprocent, hvilket også resulterer i et stort set uændret vandbehov, således at betonens vandbehov fremtræder som uafhængigt af cementindholdet.

Tabel 3.32. Vandbehov i liter pr. m<sup>3</sup> beton. Tabelværdierne gælder for beton uden luftindblanding. Vandbehovet angiver det frie vand i den friskblandede beton, det vil sige at det indbefatter eventuelt frit vand i tilslaget, men ikke absorberet (bundet) vand i tilslaget

Tilslag		Sætmål				Korrektion i liter pr. 10 mm sæt- målsændring
d <sub>max</sub>	Type	0- 30 mm	30- 60 mm	60- 100 mm	100- 150 mm	
8-10 mm	sømaterialer bakkematerialer } skærver (knust)	160	180	190	200	6
		180	210	220	230	
16-20 mm	sømaterialer	148	165	175	183	5
	bakkematerialer	152	170	180	188	
	skærver (knust)	172	192	204	213	
32-40 mm	sømaterialer	137	153	162	169	4
	bakkematerialer	141	158	167	175	
	skærver (knust)	160	178	189	197	
64-76 mm	sømaterialer	131	146	154	161	3
	bakkematerialer	135	151	160	167	
	skærver (knust)	152	170	180	188	

Dersom sand og sten er af forskellig type, bestemmes vandbehovet som et vægtet gennemsnit, idet vandbehovet svarende til sandtypen vægtes med 2/3, vandbehovet svarende til stentypen med 1/3. Beregningen fremgår af ligning 3.14

$$w_{\text{beton}} = \frac{2}{3} w_{\text{sand}} + \frac{1}{3} w_{\text{sten}} \quad (3.14)$$

hvor  $w_{\text{beton}}$  er frit vandindhold i betonen,  $w_{\text{sand}}$  er frit vandindhold fra tabel 3.32, svarende til sandtypen, i l/m<sup>3</sup>, og  $w_{\text{sten}}$  er frit vandindhold fra tabel 3.32, svarende til stentypen, i l/m<sup>3</sup>.

Den virkelige vandmængde, der skal tilsættes betonen, for at den skal opnå den ønskede konsistens, kan først fastlægges ved prøveblanding, efter at proportioneringen af udgangsblandingen er afsluttet. Kapitel 4 giver retningslinier til hjælp ved bedømmelse af prøveblandinger.

### 3.5.11 Beregning af betonens cementindhold

Betonens cementindhold beregnes på grundlag af ligning 3.15, når betonens frie vandbehov og dens effektive vand-cement forhold er fastlagt:

$$\text{Cementindhold} = \frac{\text{frit vandindhold}}{\text{frit vand-cement forhold}} \quad (3.15)$$

Det cementindhold, der ud fra styrkemæssige betragtninger beregnes på grundlag af ligning 3.15, skal sammenholdes med sådanne mindste eller største tilladelige cementindhold, som måtte være foreskrevet af holdbarhedsmæssige grunde, af hensyn til betonens svind og krybning, eller for at reducere varmeudviklingen i massive konstruktioner. Hvis det beregnede cementindhold ligger på den forkerte side af de værdier, der måtte være foreskrevet, skal det foreskrevne cementindhold, ikke det beregnede cementindhold, lægges til grund for den fortsatte proportionering.

Hvis man af holdbarhedsmæssige grunde tvinges til at proportionere betonen for et højere cementindhold end det af ligning 3.15 beregnede, vil resultatet være, at betonen får et lavere vand-cement forhold og dermed en højere trykstyrke end foreskrevet. Betonens konsistens er nemlig fastlagt på forhånd ud fra helt andre kriterier, og man kan derfor ikke umiddelbart ændre betonens vandindhold for at fastholde vand-cement forholdet uden samtidig at ændre betonens konsistens. Det vil således fremgå, at et krav til betonens holdbarhed har forret frem for styrkekravet.

I det modsatte tilfælde, hvor man for at begrænse betonens varmeudvikling eller svind og krybning, tvinges til at vælge et lavere cementindhold end det af ligning 3.15 beregnede, opstår der imidlertid tekniske problemer. I dette tilfælde kan man ikke med de foreliggende materialer samtidig opfylde kravene til betonens styrke og konsistens. Enten må betonens vandindhold sænkes, og der må fremstilles en stivere beton end foreskrevet, hvilket medfører risiko for, at betonen ikke kan komprimeres på tilfredsstillende måde, eller betonens vandbehov må reduceres,

uden at betonens konsistens forringes. Det kan for eksempel ske ved indblanding af vandreducerende eller superplastificerende tilsætningsstoffer. Eventuelt må der bruges en cement med højere styrkeniveau og et bedre graderet tilslag med bedre styrkemæssige egenskaber.

### 3.5.12 Fastlæggelse af betonens sandprocent

Betonens reelle sandprocent defineres som mængden af sand i kg/m<sup>3</sup> regnet i procent af betonens samlede indhold af tilslag i kg/m<sup>3</sup>, under forudsætning af, at der ikke forekommer overkorn i sandet eller underkorn i stenene.

Figur 3.24 angiver visse anbefalede øvre og nedre grænseværdier for betonens reelle sandprocent beroende på største tilladelige stenstørrelse, betonens konsistens, sandzone og betonens effektive vand-cement forhold. Den optimale, reelle sandprocent for et foreliggende tilslagsmateriale beror på kornenes form og overfladestruktur, samt på kornkurvernes beliggenhed i forhold til de zonegrænser for sand og sten, som er angivet i figur 3.1 til 3.7 og 3.10 til 3.13.

På grundlag af betonens reelle sandprocent beregnes betonens tilsyneladende sandprocent.

Betonens tilsyneladende sandprocent defineres som mængden af det foreliggende sand i kg/m<sup>3</sup>, regnet i procent af betonens samlede indhold af tilslag i kg/m<sup>3</sup>, under hensyntagen til mængden af overkorn i sandet og underkorn i stenene, som vist i afsnit 3.2.3.10.

Den numeriske værdi for den tilsyneladende sandprocent, for hvilken en foreliggende beton virkelig opnår sine optimale egenskaber, kan kun fastlægges ved prøveblanding, efter at den foreløbige betonproportionering er tilendebragt. Men til brug ved selve proportioneringen kan sandprocenten skønnes med rimelig nøjagtighed inden for de i figur 3.24 angivne områder. Dette vil som regel resultere i fremstilling af en tilfredsstillende beton allerede ved den første prøveblanding. Som vist i afsnit 4.4.5 til 4.4.8, kan man senere under forprøvnningen finjustere sandprocenten, således at betonen får absolut optimale egenskaber.

### 3.5.13 Beregning af det samlede tilslagsmateriales korndensitet

Når betonens tilsyneladende sandprocent, Sa, er kendt, beregnes det samlede tilslagsmateriales korndensitet, ρ<sub>T</sub>, på grundlag af ligning 3.16

$$\rho_T = \rho_{\text{sand}} \frac{S_a}{100} + \rho_{\text{sten}} \frac{(100 - S_a)}{100} \quad (3.16)$$

hvor ρ<sub>T</sub> = det samlede tilslagsmateriales korndensitet i SSD tilstand, i kg/m<sup>3</sup>

ρ<sub>sand</sub> = sandets korndensitet i SSD tilstand, i kg/m<sup>3</sup>

ρ<sub>sten</sub> = stenmaterialelets korndensitet i SSD tilstand, i kg/m<sup>3</sup>

Sa = betonens sandprocent

Hvis sandet eller stenene eller begge materialer er sammensat af flere fraktioner med forskellig densitet, beregnes ρ<sub>sand</sub> og ρ<sub>sten</sub> for det sammensatte sandmateriale og for det sammensatte stenmateriale på grundlag af ligninger, som i deres opbygning er analoge med 3.16. Afsnit 3.5.18.9 viser eksempler på en sådan beregning.

### 3.5.14 Beregning af betonens indhold af tilslagsmaterialer

#### 3.5.14.1 Generelt

Idet summen af voluminerne af cement, vand, luft og tilslagsmaterialer i 1000 liter beton skal udgøre 1 m<sup>3</sup>, fås ligning 3.17

$$\frac{C}{\rho_C} + \frac{V}{\rho_V} + \frac{L}{100} + \frac{T}{\rho_T} = 1 \quad (3.17)$$

hvor C = cement, i kg pr. m<sup>3</sup> beton

V = frit vand, i kg pr. m<sup>3</sup> beton

L = luft, i volumenprocent af betonen

T = samlet mængde tilslag, i kg pr. m<sup>3</sup> beton

ρ<sub>C</sub> = korndensitet af cement, i kg/m<sup>3</sup> (se tabel 3.33)

ρ<sub>V</sub> = densitet af frit vand, i kg/m<sup>3</sup> (ρ<sub>V</sub> ~ 1000 kg/m<sup>3</sup>)

ρ<sub>T</sub> = korndensitet af samlet mængde tilslag (SSD tilstand), d.v.s. af samlet mængde sand og sten, i kg/m<sup>3</sup>

Tabel 3.33. Danske cementers densitet

Cementtype	Korndensitet kg/m <sup>3</sup>
Standard Cement	2900
Rapid Cement	3100
Lavalkali Sulfatbestandig Cement	3150
Hvid Portland Cement	3150

Sandets og stenenes densitet i SSD-tilstand bestemmes ved laboratoriefor-  
søg i henhold til DS 405.2. Hvis det foreliggende tilslagsmateriales  
densitet ikke er bestemt i laboratoriet på det tidspunkt, da betonpro-  
portioneringen skal gennemføres, kan man udgå fra, at danske sø- og  
bakkematerialer i gennemsnit har en densitet på 2600 kg/m<sup>3</sup>, og at granit-  
skærver i gennemsnit har en densitet på 2700 kg/m<sup>3</sup>.

Det kan antages, at velkomprimeret frisk beton uden luftindblandende  
tilsætningsstoffer indeholder omkring 1 volumenprocent naturligt ind-  
blandet luft pr. m<sup>3</sup> beton, d.v.s. L = 1 i ligning 3.17.

Idet ligning 3.17 løses med hensyn til T, fås den samlede mængde sand  
og sten i 1 m<sup>3</sup> beton af ligning 3.18

$$T = \left(1 - \frac{C}{\rho_C} - \frac{V}{1000} - \frac{L}{100}\right) \rho_T \quad (3.18)$$

Betonens indhold af sand kan nu beregnes, som vist i ligning 3.19

$$\text{Betonens sandindhold} = T \times \frac{S_a}{100} \quad (3.19)$$

hvor T = betonens samlede indhold af tilslagsmaterialer, fra ligning  
3.18

S<sub>a</sub> = tilsyneladende sandprocent, fra ligning 3.4

Betonens indhold af sten beregnes derefter ved at trække sandindholdet  
fra den samlede mængde tilslagsmateriale, som vist i ligning 3.20

Betonens stenindhold = samlet indhold af tilslag (T) - sandindhold (3.20)

#### 3.5.14.2 Regneeksempel nr. 9. Beregning af betonens indhold af til- slagsmaterialer

Lad os antage, at 1 m<sup>3</sup> beton skal fremstilles med C = 291 kg cement med  
en korndensitet på  $\rho_C = 3150 \text{ kg/m}^3$ , og at vandindholdet er V = 160 kg/m<sup>3</sup>.  
Lad os endvidere antage, at betonen indeholder 1 volumenprocent naturligt  
indblandet luft. Betonens samlede indhold af tilslagsmaterialer, som har  
en korndensitet  $\rho_T = 2590 \text{ kg/m}^3$ , ønskes beregnet. Ved at indsætte i lig-  
ning 3.18 fås

$$T = \left(1 - \frac{291}{3150} - \frac{160}{1000} - \frac{1}{100}\right) 2590 = 1910 \text{ kg/m}^3$$

1 m<sup>3</sup> beton skal således indeholde 1910 kg sand og sten.

Hvis betonen har en tilsyneladende sandprocent på 30%, beregnes betonens  
indhold af sand ved at indsætte i ligning 3.19

$$\text{Betonens sandindhold} = 1910 \times \frac{30}{100} = 573 \text{ kg/m}^3$$

Betonens indhold af sten fås derefter ved at indsætte i ligning 3.20

$$\text{Betonens stenindhold} = 1910 - 573 = 1337 \text{ kg/m}^3$$

#### 3.5.15 Betonens blandingsforhold efter vægt

Slutresultatet af proportioneringen af første prøveblanding bliver således,  
at 1 m<sup>3</sup> beton skal indeholde:

Cement i en mængde som beregnet i henhold til afsnit 3.5.11, i kg/m<sup>3</sup>

Vand i en mængde som skønnet i henhold til afsnit 3.5.10, i kg/m<sup>3</sup>

Sand i SSD tilstand i en mængde som beregnet i henhold til afsnit 3.5.14.1,  
i kg/m<sup>3</sup>

Sten i SSD tilstand i en mængde som beregnet i henhold til afsnit 3.5.14.1,  
i kg/m<sup>3</sup>

Det bemærkes, at summen af vægtmængderne af cement, vand, sand og sten i  $1 \text{ m}^3$  frisk beton er lig med den friske betons forventede densitet,  $\rho_B$ , som iøvrigt kan kontrolleres ved måling i henhold til DS 423.16, "Frisk beton - Densitet".

### 3.5.16 Betonens blandingsforhold efter volumen

#### 3.5.16.1 Generelt

Når betonen proportioneres efter den metode, der er anbefalet i dette kompendium, bestemmes dens indhold efter vægt af de forskellige delmaterialer, der indgår i en sats beton på  $1 \text{ m}^3$ . Som det vil fremgå af det følgende, er der mange og væsentlige grunde til at kræve, at betonens delmaterialer skal afmåles efter vægt. Alligevel må man affinde sig med, at dette krav kan være vanskeligt at fastholde i store dele af verden. Dels strider det mod gammel tradition at afveje sand og sten, dels kan det være vanskeligt eller umuligt at fremskaffe og vedligeholde vægte under primitive forhold.

Bygningsingeniøren må gøre sig klart, at det trods alle ulemper er muligt at fremstille kvalitetsbeton ved nøjagtig opmåling af delmaterialerne efter volumen, som det også vil fremgå af tabel 3.25. Dette kræver imidlertid, at tilsynet er opmærksom på en række forhold, som skal diskuteres nærmere i det følgende.

For at bestemme de volumenmængder af de forskellige delmaterialer, som svarer til de beregnede satsmængder efter vægt, må tilslagsmaterialernes kornhobsdensitet bestemmes i laboratoriet. Da der ikke eksisterer nogen dansk standard for bestemmelse af tilslagsmaterialers kornhobsdensitet, kan det anbefales at foretage denne bestemmelse i henhold til ASTM C-29. Satsmængderne efter volumen beregnes ved at dividere satsmængderne efter vægt med de respektive kornhobsdensiteter.

Afmåling efter volumen sker som regel i målekasser eller i trillebøre, som er forsynet med målelister. Målekasserne er ofte tilvirket i træ, og de bør fremstilles af en sådan størrelse, at der altid benyttes et helt antal kasser materiale for hver sats beton. Det er imidlertid indlysende, at den vægtmængde materiale, som skal til for at fylde en kasse,

beror på, hvor tæt materialet pakkes i kassen. Når materialet er løst pakket, indeholder kassen naturligvis en mindre vægtmængde materiale, end når det er hårdt stampet. Variationerne er små for sten, større for sand, og ganske uacceptable for cementens vedkommende. Det er grunden til, at cement altid forlanges afvejet eller tilsat i mængder på hele sække. Det turde også være indlysende, at en målekasse vil indeholde forskellige vægtmængder materiale, når den ikke er helt fyldt, når den er fyldt på en sådan måde, at overfladen er plan med kassens øverste rand, og når den er overfyldt. Tilsynet må derfor altid påse, at kasserne fyldes på samme måde, og at overskydende materiale afstryges med en retskede. Dette kan lyde som en selvfølgelighed; men erfaringen viser, at kravene sjældent opfyldes i praksis, med mindre tilsynet uafbrudt og meget nøje følger afmålingsprocessen.

Sandets fugtvelning er en anden faktor, som det er vanskeligt at tage højde for ved afmåling efter volumen. Fugtigt sand kan fylde op til 40% mere end tørt eller fuldstændig vandmættet sand. Den vægtmængde fugtigt sand, der skal til for at fylde en målekasse, beror derfor på sandets fugtindhold.

Uanset hvor omhyggeligt tilsynet søger at tage højde for disse forhold, kan afmåling af tilslag efter volumen aldrig blive lige så nøjagtig som afmåling efter vægt. Spredningen på betonstyrkerne bliver naturligvis tilsvarende større ved volumenafmåling af delmaterialer. Det vil også fremgå af tabel 3.23. Man kan imidlertid træffe en række forholdsregler, som reducerer disse variationer og derved forbedrer betonens kvalitet, når tilslaget afmåles efter volumen.

1) Målekasserne bør således fremstilles med en passende form og være af en passende størrelse. Da kasserne uden vanskelighed skal kunne bæres af to mand, bør kassernes volumen ikke overstige 40 l. For at øge målenøjagtigheden bør kasserne være mindst lige så høje, som de er brede. Man bør undgå at bruge de brede og flade kasser, der er tradition for på mange byggepladser. Det anbefales at fremstille særlige målekasser for hver enkelt betontype, der forekommer i forbindelse med et byggeri, således at en sats beton altid fremstilles med et vist antal hele kasser

tilslag. For at opnå dette, kan det også være nødvendigt at fremstille kasser af forskellig størrelse til afmåling af sand og sten. Tilsynet må uafsladeligt påse, at kasserne fyldes helt og at overskydende materiale afstrypes med en retskede. Afmåling af materiale i skovfulde eller i trillebørene er meget unøjagtig og bør derfor aldrig tillades.

2) Cement skal altid afmåles efter vægt eller tilsættes blanderen i mængder på hele sække.

3) Sandmængden skal altid korrigeres for fugtsvelning. Da danske standardblade ikke indeholder praktiske metoder til måling af sandets fugtsvelning, skal der redegøres for en passende fremgangsmåde.

Metoden bygger på den kendsgerning, at en vis vægtmængde vandmættet sand fylder omtrent det samme som samme vægtmængde sand i vandmættet, overfladetørt tilstand. Når sandets fugtindhold ligger mellem disse to yderpunkter, optager samme vægtmængde sand et større volumen.

Sandets fugtsvelning kan bestemmes på byggepladsen ved hjælp af et i l glasbæger eller et syltetøjsglas. To trediedel af glasset fyldes løst med en repræsentativ sandprøve, og overfladen jævnes ud, således at den bliver vandret. Højden (A) af sandet i glasset måles ved at skyde en stållineal til bunds i glasset. Sandet tømmes derefter forsigtigt over i en anden beholder. Den oprindelige beholder fyldes halvt med vand, og sandprøven hældes forsigtigt tilbage i vandet, således at det vandmættes og ikke indeholder luftbobler. Hvis sandet bearbejdes let med en pind, efterhånden som det fyldes i glasset, hjælper dette til at fjerne indesluttet luft. Højden (B) af det vandmættede sand måles ved hjælp af stållinealen på samme måde som tidligere, og sandets såkaldte svelningsfaktor beregnes:

$$\text{Svelningsfaktor, i \%} = \frac{(A - B) \times 100}{B} \quad (3.21)$$

På byggepladsen skal den volumenmængde vandmættet overfladetørt sand, som fremgår af blanderecepten, altid forøges med en procentdel svarende til svelningsfaktoren. Såfremt denne korrektion foretages samtidig med en korrektion af den vandmængde, som tilsættes betonen under hensyntagen til fugtindholdet i sandet, vil betonen altid indeholde tilnærmelsesvis samme vægtmængde sand.

Hvis betonen fremstilles med fugtigt sand, og der ikke korrigeres for sandets fugtsvelning, vil betonen indeholde en mindre mængde vandmættet, overfladetørt sand, end antaget. Derfor vil både cement- og vandindholdet pr. m<sup>3</sup> produceret beton være højere end beregnet. For at holde betonens konsistens konstant vil blandemesteren i et sådant tilfælde som regel tilsætte en mindre vandmængde, end blanderecepten kræver. Derfor vil betonens vand-cement forhold blive lavere, og betonens styrke vil blive højere end krævet. Man kunne altså tro, at en entreprenør, som ikke korrigerer for sandets fugtsvelning, ville være på den sikre side og blot ville konstatere et større cementforbrug end beregnet. Hvis der ikke korrigeres for sandets fugtsvelning, er der imidlertid risiko for, at betonblandingen vil blive undersandet, strid og dermed vanskelig eller umulig at komprimere.

Enhver korrektion for sandets fugtsvelning vil ifølge sagens natur være behæftet med stor usikkerhed. I praksis er det dog altid bedre at foretage en sådan korrektion, hvor unøjagtig den end måtte være, frem for helt at undlade at tage hensyn til fænomenet.

4) Den friske betons bearbejdelighed må løbende kontrolleres ved bestemmelse af betonens sætmål, og vandindholdet må justeres, således at sætmålet holdes konstant.

Hvis betonen kræver mere vand end beregnet for at opnå det ønskede sætmål, kan dette skyldes, at sandet er finere graderet eller mere tørt end antaget. Under sådanne forhold bør der sættes mindst to liter cement mere til blandingen for hver ekstra liter vand, der tilsættes. Dette vil på kort sigt tilsikre, at betonens styrke opretholdes. På længere sigt bør betonen omproportioneres, hvis dens vandbehov forbliver højere, end det var antaget under den oprindelige proportionering.

Såfremt betonen kræver mindre vand end beregnet for at opnå det ønskede sætmål, kan dette skyldes, at sandet er mere grovkornet eller mere fugtigt end antaget. Under sådanne forhold bør cementmængden ikke justeres, men på længere sigt bør betonen omproportioneres.

3.5.16.2 Regneeksempel nr. 10. Beregning af betons blanderecept efter volumen, når blanderecepten efter vægt er kendt

Lad os antage, at betonens blandingsforhold er opgivet efter vægt, i kg/m<sup>3</sup>:

Cement	= 250 kg/m <sup>3</sup>
Vand	= 160 kg/m <sup>3</sup>
Sand i SSD tilstand	= 760 kg/m <sup>3</sup>
Sten i SSD tilstand	= 1130 kg/m <sup>3</sup>

Dette svarer til følgende vægtforhold pr. sæk cement og pr. 200 l beton:

Cement	= 50 kg/m <sup>3</sup>
Vand	= 32 kg/m <sup>3</sup>
Sand	= 152 kg/m <sup>3</sup>
Sten	= 226 kg/m <sup>3</sup>

Lad os antage, at kornhobdensiteten af sandet i løst-pakket og SSD-tilstand er 1400 kg/m<sup>3</sup>, medens kornhobdensiteten af stenene i løst-pakket og SSD-tilstand er 1600 kg/m<sup>3</sup>. Blandingsforholdene efter volumen for 200 l beton bliver da:

Cement	= 1 sæk à 50 kg
Vand	= 32 liter
Sand $\frac{152}{1400}$	= 0.109 m <sup>3</sup>
Sten $\frac{226}{1600}$	= 0.141 m <sup>3</sup>

Lad os nu antage, at sandet indeholder 8% frit vand efter vægt, og at man har bestemt fugtsvevningsfaktoren til 1.22. Det antages, at stenene befinder sig i SSD tilstand. Den endelige blanderecept for 200 l beton efter volumen bliver da:

Cement	= 1 sæk
Vand 32-0.08x152	= 20 liter
Sand 0.109x1.22	= 0.133 m <sup>3</sup>
Sten	= 0.141 m <sup>3</sup>

3.5.17 Justering af betonens blandingsforhold under hensyntagen til det aktuelle vandindhold i sand og sten

Fra den teoretiske betonproportionering foreligger en tilslagsmængde, G, i vandmættet, overfladetør tilstand. Denne tilslagsmængde består af en vis mængde fast stof, P, i tør tilstand og en vis mængde vand, AxP/100, hvor A er tilslaget vandabsorptionsevne, d.v.s. massen af vandet i vandmættede, overfladetørre korn udregnet i procent af massen af de tørre korn. Tilslagsmængden, G, kan udtrykkes som funktion af P og A, som vist i ligning 3.22.

$$G = P \left( \frac{100 + A}{100} \right) \tag{3.22}$$

hvor G = massen af fast stof i vandmættet, overfladetør tilstand, i kg.

I praksis er G opsplittet i en eller to sandfraktioner og to eller tre stenfraktioner. Beregningerne gennemføres separat for hver enkelt fraktion, som vist i tabel 3.36.

P = massen af fast stof i tør tilstand, i kg.

A = tilslaget vandabsorptionsevne. Massen af vandet i vandmættede, overfladetørre korn divideret med massen af de tørre korn, i procent

I praksis befinder tilslaget sig sjældent i vandmættet, overfladetør tilstand. Tilslaget samlede aktuelle vandindhold divideret med tørvægten betegnes med bogstavet B og angives i procent.

Den mængde tilslag, som i realiteten skal afvejes ved fremstilling af en foreliggende betonblanding, kan beregnes på grundlag af de beregnede blandingsforhold for betonen med tilslaget i vandmættet, overfladetør tilstand og under hensyntagen til tilslagets faktiske vandindhold.

Hvis tilslaget er tørrere, end hvad der svarer til vandmættet, overfladetør tilstand, skal der afvejes en mindre mængde tilslag end teoretisk beregnet. Til gengæld skal der i dette tilfælde sættes mere vand til betonen, fordi tilslaget suger vand til sig.

Hvis tilslaget, på den anden side af sagen, svarer til vandmættet, overfladetør tilstand, skal der afvejes en større mængde tilslag end teoretisk beregnet, og den afvejede vandmængde skal tilsvarende reduceres.

Den justerede tilslagsmængde,  $G'$ , bliver således:

$$G' = G \times \frac{100 + B}{100 + A} \quad (3.23)$$

hvor  $B$  = tilslagets aktuelle vandindhold divideret med massen af tørre korn, i procent

Indsættes differensen  $C = A - B$  med fortegn i 3.23, fås 3.24

$$G' = G \times \frac{100 + A - C}{100 + A} \quad (3.24)$$

Den mængde vand,  $\Delta V$ , som skal tilsættes eller unddrages betonen, ud over den mængde støbevand, der er beregnet under forudsætning af, at tilslaget befinder sig i vandmættet, overfladetør tilstand, kan tilsvarende beregnes på grundlag af ligning 3.25

$$\Delta V = G \frac{A - B}{100 + A} = G \frac{C}{100 + A} \quad (3.25)$$

Hvis  $\Delta V$  er positiv, skal mængden af støbevand forøges. Hvis  $\Delta V$  er negativ, skal mængden af støbevand reduceres.

Praktiske beregninger i forbindelse med korrektion af betonblanderecepter for fugtindhold i tilslagsmaterialer udføres bekvemt ved brug af skemaet i tabel 3.36.

Et tilsvarende tomt skema er indføjet sidst i kompendiet. Dette skema kan eventuelt fotokopieres og bruges ved senere praktisk betonproportionering.

### 3.5.18 Regneeksempel nr. 11. Proportionering af almindelig beton

#### 3.5.18.1 Forudsætninger

Det antages, at en entreprenør skal proportionere en betonblanding til et fabriksbyggeri. Han ønsker at beregne de mængder cement, vand og tilslag, som er nødvendige for at fremstille 1 m<sup>3</sup> beton.

Der er foreskrevet beton i passiv miljøklasse med en karakteristisk styrke på 20 MPa. Der foreligger ingen dokumentation for den variationskoefficient, med hvilken entreprenøren kan fremstille betonen.

Ved fremstilling af betonen bruger entreprenøren de tilslagsmaterialer, der tidligere blev sammensat i regneeksemplerne nr. 2, 4 og 6. Stenenes kornkurve er vist i tabel 3.9 og figur 3.8. Sandets kornkurve ligger inden for B.S. zone 2, som vist i tabel 3.13 og figur 3.14. Det er vist i regneeksempel nr. 6 i afsnit 3.2.3.11 og gentaget i tabel 3.14, hvorledes sand- og stenmaterialerne kan sammensættes til et velgraderet tilslag. Kornkurven for det samlede tilslagsmateriale er vist i figur 3.21.

De forskellige tilslagsmaterialers densitet, vandabsorptionsevne og fugtindhold er bestemt ved forsøg. Resultaterne er vist i tabel 3.34.

De øvrige krav til betonen er angivet i det følgende og indført under de respektive punkter i tabel 3.35. Tabel 3.35 er iøvrigt et standard-skema, som kan benyttes ved enhver betonproportionering i henhold til kompendiets forskrifter. Et tilsvarende tomt skema er indføjet sidst i kompendiet. Dette skema kan eventuelt fotokopieres og bruges ved senere praktisk betonproportionering.

Tabel 3.34. Densitet, vandabsorptionsevne og fugtindhold for de i proportioneringseksemplet benyttede tilslagsmaterialer

Egenskab	Materiale		
	Fint Sand V	Groft Sand VI	Sten IV
Densitet, i kg/m <sup>3</sup> ( $\rho_{SSD}$ )	2500	2440	2660
Absorptionsevne, i % (A)	3.10	4.20	1.63
Fugtindhold, i % (B)	6.50	8.80	1.06

1. Miljøklasse  
(Punkt 1)

Passiv

2. Karakteristisk Styrke  
(punkt 2)

$f_{ck} = 20$  MPa efter 28 døgn



3. Påtalerisiko (Punkt 7)	1%
4. Dokumentation af variationskoefficient (Punkt 3)	Foreligger ej (Princip A benyttes)
5. Accelereret prøvning (Punkt 4)	Foretages ej
6. Antal prøveresultater i hvert kontrolafsnit (gruppe) (Punkt 8)	n = 4
7. Sætmål (Punkt 18)	30-60 mm
8. Cementtype (Punkt 12)	Standard (Densitet 2900 kg/m <sup>3</sup> i henhold til tabel 3.33)
9. Stentype (Punkt 13)	Skærver
10. Sandtype (Punkt 14)	Søsand
11. Sandgradering (Punkt 25)	Zone 2
12. Største stenstørrelse (Punkt 19)	40 mm
13. Største tilladelige vand-cement forhold af hensyn til miljøklasse (Punkt 16)	Intet krav

### 3.5.18.2 Fastlæggelse af variationskoefficienterne $\delta_g$ og $\delta_p$

Da der ikke foreligger nogen dokumentation for den variationskoefficient, med hvilken entreprenøren kan fremstille betonen, aflæses  $\delta_g = 0.16$  for  $f_{ck} = 20$  MPa i henhold til tabel 3.24.  $\delta_g = 0.16$  indføres under punkt 5 i tabel 3.35.

Da der ikke vil blive foretaget accelereret prøvning af betonen under produktionen, aflæses  $\delta_p = 0.20$  for  $f_{ck} = 20$  MPa i henhold til tabel 3.30.  $\delta_p = 0.20$  indføres under punkt 6 i tabel 3.35.

### 3.5.18.3 Beregning af betonens godkendelsesstyrke $f_{cg}$

Betonens godkendelsesstyrke beregnes på grundlag af ligning (3.10a).

$$f_{cg} = k_n f_{ck} \quad (3.10a)$$

hvor  $f_{cg}$  = betonens godkendelsesstyrke i MPa  
 $f_{ck}$  = betonens karakteristiske styrke i MPa

$$k_n = \exp\left[\left(\frac{1}{\sqrt{n}} + 2.28\right)\delta_g - 0.1875\right] \quad (3.11)$$

exp = eksponentialfunktionen  
n = antal prøveresultater i gruppen, som repræsenterer kontrolafsnittet  
 $\delta_g$  = godkendelses-variationskoefficienten

Da  $\delta_g$  ikke er dokumenteret, indsættes  $\delta_g = 0.16$  fra tabel 3.24 for  $f_{ck} = 20$  MPa i ligning 3.11. Desuden indsættes  $n = 4$ . Herved fås:

$$k_n = \exp\left[\left(\frac{1}{\sqrt{4}} + 2.28\right) 0.16 - 0.1875\right] = 1.2934$$

Resultatet indføres under punkt 9 i tabel 3.35.

Betonens godkendelsesstyrke  $f_{cg}$  fås derefter ved at indsatte  $k_n = 1.2934$  i ligning 3.10a.

$$f_{cg} = 1.2934 \times 20 = 25.87 \text{ MPa}$$

Resultatet indføres under punkt 10 i tabel 3.35.

### 3.5.18.4 Beregning af betonens proportioneringsstyrke $f_{cp}$

Betonens proportioneringsstyrke beregnes på grundlag af ligning 3.13.

$$f_{cp} = f_{cg} \times \exp\left[\alpha \times \frac{\delta_p}{\sqrt{n}}\right] \quad (3.13)$$

hvor  $f_{cp}$  = betonens proportioneringsstyrke, i MPa  
 $f_{cg}$  = betonens godkendelsesstyrke, i MPa  
 $\alpha$  = faktor beroende på påtalerisikoen fra tabel 3.29  
n = antal prøveresultater i hvert kontrolafsnit, her  $n = 4$

Da påtålerisikoen er 1%, indsættes  $\alpha = 2.33$  fra tabel 3.29 i ligning 3.13. Da der endvidere ikke foreligger planer om at foretage accelereret prøvning, indsættes  $\delta_p = 0.20$  fra tabel 3.30 for  $f_{ck} = 20$  MPa i ligning 3.13. Herved fås betonens proportioneringsstyrke:

$$f_{cp} = 25.87 \exp \left[ 2.33 \frac{0.20}{\sqrt{4}} \right] = 32.66 \text{ MPa} \quad (3.26)$$

Resultatet indføres under punkt 11 i tabel 3.35.

### 3.5.18.5 Fastlæggelse af betonens frie vand-cement forhold

Det skønnes på grundlag af tabel 3.31, at en beton med et effektivt vand-cement forhold på 0.50, som fremstilles med Standard Cement og danske tilslagsmaterialer, vil opnå en 28-døgns styrke på 40 MPa.

Med et vand-cement forhold på 0.50 og en 28-døgns styrke på 40 MPa som indgangsværdier opsøges det dertil svarende punkt i figur 3.22. Kurven gennem dette punkt føres til skæring med en vandret linie gennem ordina- ten svarende til proportioneringsstyrken 32.67 MPa. Det til skærings- punktet svarende vand-cement forhold på 0.57 indføres under punkt 15 i tabel 3.35. Da der ikke foreligger noget krav om største tilladeligt vand-cement forhold af hensyn til miljøklasse (punkt 16 i tabel 3.35), proportioneres betonen for et vand-cement forhold på 0.57. Resultatet indføres under punkt 17 i tabel 3.35.

### 3.5.18.6 Fastlæggelse af betonens frie vandbehov

Betonens frie vandbehov for et sætmål på 30-60 mm og største stenstør- relse på 40 mm aflæses af tabel 3.32 til 178 l/m<sup>3</sup> for skærver og 153 l/m<sup>3</sup> for søsand. Når der bruges sand og sten af forskellig art, kan betonens frie vandindhold beregnes på grundlag af ligning 3.14

$$W_{\text{beton}} = \frac{2}{3} W_{\text{sand}} + \frac{1}{3} W_{\text{sten}} \quad (3.14)$$

hvor  $W_{\text{beton}}$  er betonens frie vandindhold, i l/m<sup>3</sup>,  $w_{\text{sand}}$  er frit vandind- hold svarende til sandtypen, i l/m<sup>3</sup>, og  $w_{\text{sten}}$  er frit vandindhold sva- rende til stentypen, i l/m<sup>3</sup>.

Idet man indsætter ovennævnte numeriske værdier i ligning 3.14, bereg- nes betonens vandbehov for de foreliggende tilslagsmaterialer som vist i ligning 3.27 til 161 kg/m<sup>3</sup>. Denne værdi indføres under punkt 20 i tabel 3.35

$$\frac{2}{3} \times 153 + \frac{1}{3} \times 178 \cong 161 \text{ kg/m}^3 \quad (3.27)$$

### 3.5.18.7 Beregning af betonens cementindhold

Ved at dividere betonens frie vandindhold på 161 l/m<sup>3</sup> med det effektive vand-cement forhold på 0.57 fås betonens cementindhold på 282 kg/m<sup>3</sup>, som indføres under punkt 21 i tabel 3.35.

Da der hverken er stillet noget krav til største tilladeligt cementind- hold af hensyn til varmeudvikling (punkt 22 i tabel 3.35) eller noget krav til mindste tilladeligt cementindhold af hensyn til holdbarhed (punkt 23 i tabel 3.35) proportioneres betonen for et cementindhold på 282 kg/m<sup>3</sup>. Resultatet indføres under punkt 24 i tabel 3.35.

### 3.5.18.8 Skøn af reel og beregning af tilsyneladende sandprocent

I henhold til figur 3.24 anbefales det for 40 mm max. stenstørrelse at bruge en reel sandprocent mellem 29% og 37%, svarende til sand i BS zone 2, 30-60 mm sætmål og et vand-cement forhold på 0.57. Med de foreliggende materialer skønnes en reel sandprocent på 33%. (Resultatet indføres un- der punkt 26 i tabel 3.35.)

Da det foreliggende stenmateriale indeholder 1% underkorn, medens sandet ikke indeholder overkorn, beregnes den tilsyneladende sandprocent,  $S_a$ , på grundlag af ligning 3.4

$$S_a = \frac{y_{\text{tilslag}} - y_{\text{sten}}}{y_{\text{sand}} - y_{\text{sten}}} \times 100 \quad (3.4)$$

hvor  $S_a$  = den vægtprocent af det foreliggende sandmateriale, som betonen skal fremstilles med, for at det sammensatte tilslagsmateriale kan opnå den ønskede reelle vægtpro- cent sand, mindre end 4.8 mm.  $S_a$  kaldes også den tilsyneladende sandprocent.

$y_{\text{tilslag}}$  = ordinaten for den sammensatte kornkurve ved 4.8 mm sigten.  
 $y_{\text{tilslag}}$  svarer til den optimale vægtprocent materiale mindre end 4.8 mm i det samlede tilslagsmateriale, som aflæst af figur 3.24. Da den foreliggende beton således i henhold til figur 3.24 kræver en sandprocent på 33, indsættes  $y_{\text{tilslag}} = 33$ .

$y_{\text{sand}}$  = ordinaten for det foreliggende sandmateriales kornkurve ved 4.8 mm sigten. Da det foreliggende sand ikke indeholder overkorn, er  $y_{\text{sand}} = 100 - 0 = 100$ .

$y_{\text{sten}}$  = ordinaten for det foreliggende stenmateriales kornkurve ved 4.8 mm sigten. Da det foreliggende samlede stenmateriale indeholder 1% underkorn, er  $y_{\text{sten}} = 1$ .

Ved at indsætte  $y_{\text{tilslag}} = 33$ ,  $y_{\text{sten}} = 1$  og  $y_{\text{sand}} = 100$  i ligning 3.4, fås:

$$S_a = \frac{33 - 1}{100 - 1} \times 100 = 32\%$$

Tilslaget's tilsyneladende sandprocent,  $S_a$ , er således 32%. Resultatet indføres under punkt 27 i tabel 3.35.

Regneeksempel nr. 6 i afsnit 3.2.3.11 viser, hvorledes kornkurven for det samlede tilslag kan beregnes og bedømmes.

### 3.5.18.9 Beregning af det samlede tilslagsmateriales densitet

Det fremgår af tabel 3.34, at densiteten for de tre tilslagsmaterialer, der indgår i betonen, er henholdsvis 2500, 2440 og 2660 kg/m<sup>3</sup>. Det fremgår af regneeksempel nr. 4 i afsnit 3.2.3.8, at 47% fint sand skal blandes med 53% groft sand, for at kornkurven for det blandede sand skal ligge i zone 2. Densiteten af det blandede sand kan derfor beregnes på grundlag af ligning 3.28, som i sin opbygning er analog med ligning 3.16

$$0.47 \times 2500 + 0.53 \times 2440 = 2468 \text{ kg/m}^3 \quad (3.28)$$

Idet 32% sand med en densitet på 2468 kg/m<sup>3</sup> sammensættes med 68% sten med en densitet på 2660, kan det samlede tilslagsmateriales densitet,  $\rho_T$ , beregnes på grundlag af ligning 3.29, som i sin opbygning er analog med ligning 3.16.

$$\rho_T = 0.32 \times 2468 + 0.68 \times 2660 = 2599 \text{ kg/m}^3 \quad (3.29)$$

Resultatet indføres under punkt 28 i tabel 3.35.

### 3.5.18.10 Beregning af betonens samlede indhold af tilslagsmaterialer

Betonens samlede indhold af tilslag, T, i vandmættet, overfladetør tilstand kan beregnes på grundlag af ligning 3.18

$$T = \left( 1 - \frac{C}{\rho_C} - \frac{V}{1000} - \frac{L}{100} \right) \rho_T \quad (3.18)$$

hvor T = betonens samlede indhold af tilslagsmateriale, i kg/m<sup>3</sup>

C = betonens indhold af cement, i kg/m<sup>3</sup>

V = betonens indhold af vand, i kg/m<sup>3</sup>

L = volumenprocent luft = 1% i henhold til afsnit 3.5.14.1

$\rho_C$  = korndensitet af cement, i kg/m<sup>3</sup> (2900 i henhold til tabel 3.33)

$\rho_T$  = korndensitet af samlet tilslag i vandmættet, overfladetør tilstand, i kg/m<sup>3</sup>

Ved indsættelse i ligning 3.18 fås

$$T = \left( 1 - \frac{282}{2900} - \frac{161}{1000} - \frac{1}{100} \right) 2599 = 1904 \text{ kg/m}^3$$

Resultatet indføres under punkt 29 i tabel 3.35.

### 3.5.18.11 Beregning af betonens indhold af sand og sten

Da betonens tilsyneladende sandprocent er 32%, beregnes betonens indhold af sand ved at multiplicere betonens samlede indhold af alle tilslagsmaterialer med 0.32 i henhold til ligning 3.19. Resultatet indføres under punkt 30 i tabel 3.35.

$$0.32 \times 1904 = 609 \text{ kg/m}^3 \quad (3.19)$$

Sandet fordeles med  $609 \times 0.47 = 286 \text{ kg/m}^3$  fint sand V og  $609 \times 0.53 = 323 \text{ kg/m}^3$  groft sand VI.

Betonens samlede indhold af sten beregnes ved at subtrahere indholdet af sand fra betonens samlede indhold af tilslag, i henhold til ligning 3.20. Resultatet indføres under punkt 31 i tabel 3.35.

$$1904 - 609 = 1295 \text{ kg/m}^3 \quad (3.20)$$

3.5.18.12 Betonens blandingsforhold efter vægt

Slutresultatet af proportioneringen bliver således, at 1 m<sup>3</sup> beton skal indeholde:

Cement	282 kg/m <sup>3</sup>
Vand	161 kg/m <sup>3</sup>
Sand i SSD tilstand	609 kg/m <sup>3</sup>
<u>Sten i SSD tilstand</u>	<u>1295 kg/m<sup>3</sup></u>
Vægt af 1 m <sup>3</sup> frisk beton	2347 kg/m <sup>3</sup>

Det bemærkes, at vægten af 1 m<sup>3</sup> frisk beton er lig med den friske betons forventede densitet. Resultatet indføres under punkt 32 i tabel 3.35.

Hvis det antages, at betonen blandes i satser på 50 l (0.05 m<sup>3</sup>), og at tilslaget befinder sig i vandmættet, overfladetør tilstand, og det erindres, at 47% sand V skal blandes med 53% sand VI, bliver de tilsvarende vægtmængder af de forskellige delmaterialer pr. sats:

Cement	282 x 0.05	14.1	kg
Sand V	0.47 x 609 x 0.05	14.3	} 30.4 kg
Sand VI	0.53 x 609 x 0.05	16.1	
Sten	1295 x 0.05	64.8	kg
<u>Vand</u>	<u>161 x 0.05</u>	<u>8.0</u>	<u>kg</u>
Vægt af 50 l beton		117.3	kg

Resultatet indføres under punkt 33 i tabel 3.35.

3.5.18.13 Justering af betonens blanderecept med hensyn til tilslagets aktuelle vandindhold

Det fremgår af tabel 3.34, at tilslaget ikke befinder sig i vandmættet, overfladetør tilstand. Sandet er fugtigere og stenene er tørrere. Satsvægtene må derfor korrigeres, således at der tages hensyn til tilslagsmaterialernes virkelige vandindhold. Idet man udgår fra de numeriske værdier i tabel 3.34, foretages korrektionerne som vist i tabel 3.36.

Den færdige blanderecept for betonen i en 50 l sats bliver således

Cement	14.1 kg
Sand V	14.8 kg
Sand VI	16.8 kg
Sten	64.4 kg
Vand	7.2 kg

Tabel 3.35 Proportioneringsskema

Punkt	Anvisning	Værdier
1. Miljøklasse	Krav	Passiv/ <del>Moderat</del> / <del>Aggressiv</del> / <del>Særlig</del>
2. Karakteristisk styrke	Krav eller tabel 2.2	$f_{ck} = 20$ MPa
3. Dokumentation af variationskoefficient		<del>Foreligger</del> /foreligger ej
4. Accelereret prøvning		<del>Foretages</del> /foretages ej
5. Variationskoefficient for godkendelse	Tabel 3.24 eller formel 3.12	$\delta_g = 0.16$
6. Variationskoefficient for proportionering	Tabel 3.30 eller som $\delta_g$	$\delta_p = 0.20$
7. Påtalerisiko	Tabel 3.29	1 % svarende til $\alpha = 2.33$
8. Stikprøvestørrelse		$n = 4$
9. $k_n$ -værdi	Formel 3.11	$k_n = 1.2934$
10. Godkendelsesstyrke	Formel (3.10a)	$f_{cg} = 25.87$ MPa
11. Proportioneringsstyrke	Formel 3.13	$f_{cp} = 32.66$ MPa
11a. Indblandet luft	Krav eller tabel 3.37 (husk at $a = L - 1$ )	$a = 0$ %
11b. Fiktiv proportioneringsstyrke	Punkt 11 divideret med $(1 - 0.055 \times a)$	$f'_{cp}(\text{luft}) = \text{---}$ MPa

3.5.18.14 Proportioneringsskema udfyldt for almindelig beton

Tabel 3.35 Proportioneringsskema (fortsat)

Punkt	Anvisning	Værdier
12. Cementtype og densitet	Krav og tabel 3.33	<u>Standard Cement (2900 kg/m<sup>3</sup>)</u>
13. Stentype	Krav	<u>Skærver</u>
14. Sandtype	Krav	<u>Søsand</u>
15. Vand-cement forhold af hensyn til styrke	Tabel 3.31 og figur 3.22	<u>0.57</u>
16. Største tilladeligt vand-cementforhold af hensyn til miljøklasse	Tabel 3.15	<u>Intet krav</u>
17. Vand-cement forhold ved proportionering	Brug laveste værdi af punkt 15 og 16	<u>0.57</u>
18. Sætmål	Krav	<u>30-60</u> mm
19. Største stenstørrelse	Krav	$d_{max} = 40$ mm
20. Frit vandindhold	Tabel 3.32, ligning 3.14, samt ved luftindblanding afsnit 3.6.3.	<u>161</u> kg/m <sup>3</sup>
21. Cementindhold af hensyn til styrke	Punkt 20 divideret med punkt 17	<u>282</u> kg/m <sup>3</sup>
22. Største tilladeligt cementindhold af hensyn til varmeudvikling	Evt. krav	<u>Intet krav</u> kg/m <sup>3</sup>
23. Mindste tilladeligt cementindhold af hensyn til holdbarhed	Evt. krav	<u>Intet krav</u> kg/m <sup>3</sup>

Tabel 3.35 Proportioneringsskema (fortsat)

Punkt	Anvisning	Værdi			
24. Cementindhold ved proportionering	Brug den mindste værdi af punkt 21 og 22 eller den største værdi af punkt 21 og 23	<b>282</b> kg/m <sup>3</sup>			
25. Sandgradering	Figur 3.10 til 3.13	Zone <b>2</b>			
26. Reel sandprocent	Figur 3.24, samt ved luftindblanding afsnit 3.6.6.	<b>33</b> %			
27. Tilsyneladende sandprocent	Formel 3.4	<b>32</b> %			
28. Tilslagets densitet	Formel 3.28 og 3.29	<b>2599</b> kg/m <sup>3</sup>			
29. Samlet indhold af tilslag	Formel 3.18	<b>1904</b> kg/m <sup>3</sup>			
30. Indhold af sand	Formel 3.19	<b>609</b> kg/m <sup>3</sup>			
31. Indhold af sten	Formel 3.20	<b>1295</b> kg/m <sup>3</sup>			
Mængder af tilslag i vandmættet overfladetør tilstand	Cement	Vand	Sand	Sten	Forventet densitet hos frisk beton kg/m <sup>3</sup>
32. kg/m <sup>3</sup>	<b>282</b>	<b>161</b>	<b>609</b>	<b>1295</b>	<b>2347</b>
(Husk herudover at anføre mængder af evt. tilsætningsstoffer i blanderecepten)					
33. kg pr. <b>50</b> l sats	<b>14.1</b>	<b>8.0</b>	<b>30.4</b>	<b>64.8</b>	<b>2347</b>

Tabel 3.36 Justering af satsvægte for fugtindhold i tilslag. Satsstørrelse 50 l

Materialefraktion nr.	I	II	III	IV	V	VI	VII
Vandabsorptionsevne, i % (A)				<b>1.63</b>	<b>3.10</b>	<b>4.20</b>	
Virkeligt fugtindhold, i % (B)				<b>1.06</b>	<b>6.50</b>	<b>8.80</b>	
C = (A - B) i % (angiv tegn + eller -) Fugt absorberes af tilslaget, når C er positiv. Der er frit vand til stede i tilslaget, når C er negativ				<b>+0.57</b>	<b>-3.4</b>	<b>-4.6</b>	
Betonens indhold af tilslag i vandmættet, overfladetør tilstand (G)				<b>64.8</b>	<b>14.3</b>	<b>16.1</b>	
Indhold af tilslag i kg, justeret for fugt i tilslaget $\left(\frac{100 + B}{100 + A}\right) \times G$				<b>64.4</b>	<b>14.8</b>	<b>16.8</b>	
Justering af blandevand for fugt i tilslaget, i l $\left(\frac{C}{100 + A}\right) \times G$ (angiv tegn + eller -)				<b>+0.4</b>	<b>-0.5</b>	<b>-0.7</b>	
Samlet justering af blandevand, i l, lig med summen af ovenstående justeringer for de enkelte materialer $\sum \left(\frac{C}{100 + A}\right) \times G = +0.4 - 0.5 - 0.7 = -0.8$ liter.							
Hvis summen er positiv, øges mængden støbevand med det beregnede antal liter Hvis summen er negativ, reduceres mængden blandevand med det beregnede antal liter							

### 3.6 Proportionering af beton med indblandet luft

#### Generelt

Beton, der under senere brug vil blive udsat for frysning og optøning i helt eller delvis vandmættet tilstand, kan ødelægges som følge af frostska-der. Sådanne skader kan manifestere sig i form af overfladeafskal-ning, revnedannelse eller smuldring af betonen. Frostska-derne udvikler sig hurtigere og får som regel et større omfang, når betonen behandles med tørsalte.

Såfremt der indblandes luft i den friske beton, reduceres risikoen for frostska-der, og i mange tilfælde kan denne risiko helt elimineres. Der- for kræver DS 411, at der skal indblandes luft i al beton i aggressiv miljøklasse, og i sådan beton i moderat miljøklasse, som senere vil blive udsat for frysning og optøning. Ved indblanding af luft forbedres sam- tidig den friske betons konsistens og kohæsion som angivet i afsnit 3.3.5. Desværre medfører luftindblanding også en utilsigtet reduktion af betonens styrke, som diskuteres i afsnit 3.4.4 og 3.6.2.

Der skal i det følgende gives visse retningslinier for proportionering af beton med indblandet luft. Virkningen af den indblandede luft på den friske betons konsistens og densitet samt på den hærdnede betons styrke, beror på blandingsforholdene, på tilslaget art og gradering, på cement- typen og på den kemiske sammensætning af det benyttede luftindblandende tilsætningsstof. Proportioneringsmetoden kan derfor kun bruges ved en overslagsmæssig beregning af betonens blandingsforhold. De endelige blandingsforhold kan kun fastlægges på grundlag af resultater fra prøve- blandinger, som angivet i afsnit 4.4.4.

#### 3.6.1 Luftens betydning for betonens frostbestandighed

Ved mekanisk bearbejdning af beton i en blandemaskine antager vi, at be- tonen utilsigtet tilføres 1% luft, selv om blandingen ikke indeholder luft- indblandende tilsætningsstoffer. Ved proportionering af luftindblandet beton kan man således som første tilnærmelse udgå fra, at der utilsigtet tilføres betonen 1% luft, som ikke drives ud ved den senere komprimering.

Denne naturligt tilførte luft, der som regel fordeler sig i form af større porer og lommer, bidrager ikke til betonens frostbestandighed og medregnes derfor ikke i mængden kunstigt indblandet luft. Man skal imidlertid være opmærksom på, at det er det samlede luftindhold i den friske beton, det vil sige summen af naturligt tilført og kunstigt indblandet luft, som må- les ved den standardprocedure, som er beskrevet i DS 423.15 og afsnit 4.4.2.

Da frisk beton antages at indeholde 1% naturligt tilført luft, som ikke bidrager til betonens frostbestandighed, og da man bør regne med, at den friske beton mister 2% kunstigt indblandet luft under transport, udstøb- ning og vibrering, skal betonens samlede luftindhold, som målt i betonen, umiddelbart efter at den har forladt blanderen, være 3% højere end den mængde kunstigt indblandet luft, som er nødvendig for at sikre frostbe- standigheden af betonen, som udstøbt i konstruktionen.

Tabel 3.37 angiver den samlede mængde naturligt såvel som kunstigt ind- blandet luft, L, som skal måles i den friske beton ved prøvning umiddel- bart efter, at den har forladt blanderen, for at den hærdnede beton skal blive frostbestandig i konstruktionen, eventuelt under påvirkning af tørsalte. Værdierne i tabel 3.37 er modificeret i forhold til den oprinde- lige tabel i DIF's "Foreløbige retningslinier for fremstilling af luft- indblandet beton" fra 1954. Der er adderet ca. 3% til samtlige oprinde- lige tabelværdier af ovennævnte grunde.

Tabel 3.37. Samlet mængde naturlig såvel som kunstigt indblandet luft, i volumenprocent, som skal måles i den friske beton ved blan- deren, for at den hærdnede beton skal blive frostbestandig i den færdige konstruktion, eventuelt ved samtidig påvirk- ning af tørsalte.

Cement- indhold C kg/m <sup>3</sup>	L i volumenprocent			
	Største kornstørrelse d <sub>max</sub> i mm			
	4-5	8-10	16-20	32-40
250	10%	8%	8%	7%
300	10%	8%	8%	7%
350	10%	8%	8%	7%
400	10%	9%	8%	7%
450	11%	9%	8%	8%

### 3.6.2 Luftens betydning for betonens styrke

Ved indblanding af luft i beton reduceres den hærdnede betons trykstyrke. Når vand-cement forholdet skønnes for en luftindblandet beton, skal der tages hensyn til denne styrkereduktion. Det kan f.eks. ske ved, at man som indgangsværdi i figur 3.22 benytter en højere fiktiv proportioneringsstyrke end betonens sande proportioneringsstyrke. Da man kan udgå fra, at betonens trykstyrke mindsker med 5.5% for hver 1% luft, der indblandes, kan den fiktive trykstyrke beregnes på grundlag af ligning 3.30

$$f'_{cp(\text{luft})} = \frac{f_{cp}}{1 - 0.055 \times a} \quad (3.30)$$

- hvor  $f'_{cp(\text{luft})}$  = fiktiv proportioneringsstyrke for luftindblandet beton, i MPa
- $f_{cp}$  = betonens sande proportioneringsstyrke, som fastlagt i henhold til afsnit 3.5.5, i MPa
- a = den kunstigt indblandede luftmængde i betonen, i volumenprocent, som kræves, for at betonen skal blive frostbestandig. Den naturligt tilførte luftmængde på 1% skal ikke indregnes i tallet a, da der allerede er taget hensyn til denne luftmængde ved fastlæggelsen af de gennemsnitlige betonstyrker, der er angivet i tabel 3.31 som nøgleværdier for betonproportioneringen, d.v.s. at  $a = L - 1$ , hvor L aflæses af tabel 3.37.

Betonens fiktive proportioneringsstyrke,  $f'_{cp(\text{luft})}$ , benyttes til at fastlægge vand-cement forholdet for luftindblandet beton i henhold til figur 3.22. Fremgangsmåden er i princip den samme som angivet i afsnit 3.5.7.

### 3.6.3 Luftens betydning for betonens konsistens og bearbejdelighed

Ved indblanding af luft i beton vil blandingens konsistens og bearbejdelighed forbedres.

Når vandbehovet skønnes for en luftindblandet beton, skal der tages hensyn til den forbedrede konsistens. Dette sker ved at benytte de værdier for vandbehovet i tabel 3.32, der er angivet for det næst-lavere konsistensområde. Hvis en luftindblandet beton skal proportioneres for et

sætmål på 30-60 mm, aflæses vandbehovet således af tabel 3.32 for et sætmål på 0-30 mm for den luftindblandede beton.

Foruden en forbedring af konsistensen vil man også konstatere en forbedret kohæsion hos en luftindblandet beton. Luftboblerne har på mange måder samme virkning som fint sand. For at undgå at fremstille en betoning, der opfører sig, som om den var oversandet, bør man derfor ved proportionering af udgangsblandingen reducere sandprocenten med 5% i forhold til den værdi, der aflæses af figur 3.24.

### 3.6.4 Luftens betydning for frisk betons densitet

Som følge af luftindblanding vil den friske betons densitet reduceres. Dette tages der hensyn til ved at indsætte betons samlede naturligt såvel som kunstigt indblandede luftindhold, L, i ligning 3.18, når betonens samlede mængde tilslagsmateriale skal beregnes.

### 3.6.5 Ændringer i proceduren for proportionering af almindelig beton under hensyntagen til luftindblanding

Principielt benytter man samme procedure ved proportionering af luftindblandet beton som ved proportionering af almindelig beton. Det er imidlertid nødvendigt at tage hensyn til de i afsnit 3.6.1-3.6.4 nævnte forhold ved at ændre proportioneringsproceduren på visse punkter. Idet der henvises til proportioneringsskemaet i tabel 3.35, som også kan bruges ved proportionering af luftindblandet beton, skal disse ændringer forklares nærmere.

Punkt 11. På grundlag af betonens sande proportioneringsstyrke (punkt 11) og procenten indblandet luft (punkt 11a) beregnes en fiktiv styrkeværdi ved hjælp af ligning 3.30 (punkt 11b), som forklaret i afsnit 3.6.2.

Punkt 20. For at tage hensyn til den luftindblandede betons forbedrede konsistens vælger man et vandindhold fra tabel 3.32 svarende til det næst-lavere konsistensområde i forhold til det område, som er krævet for betonen.

Punkt 26. Den reelle sandprocent reduceres med 5% i forhold til den værdi, der aflæses af figur 3.24.



Ved forprøvning med luftindblandet beton skal der, ud over sætmåls- og densitetsbestemmelsen, også udføres en måling af luftindholdet hos den friske beton i henhold til DS 423.15. I første omgang må der lægges større vægt på at opnå det ønskede luftindhold hos betonen end på de andre egenskaber. Luftindholdet har nemlig afgørende betydning både for betonens sætmål, styrke og densitet. Derfor skal der først og fremmest fremstilles en prøveblanding med det krævede luftindhold, før man gør sig større anstrengelser for at justere betonens andre egenskaber.

For at afgøre hvor store mængder luftindblandende tilsætningsstof, der skal bruges for at indblende en vis foreskrevet luftmængde i en betonblanding, bør man ved den første prøveblanding udgå fra producentens brugsanvisning. Den nøjagtige mængde tilsætningsstof, der i virkeligheden er nødvendig, kan kun fastsættes på grundlag af resultaterne fra den første og eventuelle efterfølgende justerede blandinger.

Da den mængde luft, som indblandes i en beton ved brug af en vis mængde tilsætningsstof, beror på betonens temperatur, bør luftindholdet i den fremstillede beton jævnlgt måles og mængden doseret tilsætningsstof bør jævnlgt justeres i dagens løb under en løbende betonproduktion. Det bemærkes iøvrigt, at luftindholdet i en beton mindsker med øgende temperatur for en given mængde tilsætningsstof.

### 3.6.6 Regneeksempel nr. 11. Proportionering af luftindblandet beton

#### 3.6.6.1 Forudsætninger

Det antages, at en entreprenør skal proportionere en betonblanding til en belægning, der vil blive udsat for frost og tørsalte. Entreprenøren ønsker at beregne de mængder cement, vand og tilslag, som er nødvendige for at fremstille 1 m<sup>3</sup> beton. Tabel 3.35a benyttes ved beregningerne.

Der er foreskrevet beton i aggressiv miljøklasse med en karakteristisk styrke på 30 MPa. I form af 40 tidligere resultater foreligger der dokumentation for, at entreprenøren eller betonfabrikken kan fremstille en sådan beton med en variationskoefficient  $\delta_g = 0.08$  (punkt 5). Det vil sige, at princip B kan benyttes ved kontrol af betonen. Der foreligger desuden planer om at foretage accelereret prøvning af betonen, hvilket betyder, at  $\delta_p = \delta_g = 0.08$  (punkt 6).

Ved fremstilling af betonen bruger entreprenøren de tilslagsmaterialer der tidligere blev sammensat i regneeksemplerne 2, 4 og 6. Stenenes kornkurve er vist i tabel 3.9 og figur 3.8. Sandets kornkurve ligger inden for BS zone 2, som vist i tabel 3.13 og figur 3.14. Det er vist i regneeksempel nr. 6 i afsnit 3.2.3.11 og gentaget i tabel 3.14, hvorledes sand- og stenmaterialerne kan sammensættes til et velgraderet tilslag. Kornkurven for det samlede tilslagsmateriale er vist i figur 3.21. De forskellige tilslagsmaterialers densitet, vandabsorptionsevne og fugtindhold er bestemt ved forsøg. Resultaterne er vist i tabel 3.34.

De øvrige krav til betonen er angivet i det følgende og indført under de respektive punkter i tabel 3.35a.

1. Miljøklasse (Punkt 1)	Aggressiv
2. Karakteristisk trykstyrke (Punkt 2)	$f_{ck} = 30$ MPa
3. Maksimalt tilladeligt vand-cement forhold (Punkt 16)	$v/c = 0.45$ fra tabel 3.15.
4. Indblandet luft (målt umiddelbart efter udtømmning fra blanderen (Punkt 11a) $a = (L-1)\%$	$a = 6\%$ fra tabel 3.37
5. Påtalerisiko (Punkt 7)	1% svarende til $\alpha = 2.33$ , fra tabel 3.29.
6. Antal prøveresultater i hvert kontrolafsnit (gruppe) (Punkt 8)	$n = 4$
7. Cementtype (Punkt 12)	Lavalkali Sulfatbestandig Cement (Densitet 3150 kg/m <sup>3</sup> i henhold til tabel 3.33)
8. Stentype (Punkt 13)	Skærver
9. Sandtype (Punkt 14)	Søsand
10. Sandgradering (Punkt 25)	Zone 2
11. Største stenstørrelse (Punkt 19)	40 mm
12. Sætmål (Punkt 18)	30-60 mm

### 3.6.6.2 Beregning af betonens godkendelsesstyrke $f_{cg}$

Betonens godkendelsesstyrke beregnes på grundlag af ligning (3.10a)

$$f_{cg} = k_n f_{ck} \quad (3.10a)$$

hvor  $f_{ck} = 30$  MPa

$$\delta_g = 0.08$$

$$n = 4$$

$$k_n = \exp\left[\left(\frac{1}{\sqrt{4}} + 2.28\right) 0.08 - 0.1875\right] = 1.0355 \quad (3.11)$$

Ved indsættelse af disse værdier i ligning 3.10a fås

$$f_{cg} = 1.0355 \times 30 = 31.07 \text{ MPa}$$

Resultatet indføres under punkt 10 i tabel 3.35a.

### 3.6.6.3 Beregning af betonens proportioneringsstyrke $f_{cp}$

Betonens proportioneringsstyrke beregnes på grundlag af ligning 3.13

$$f_{cp} = f_{cg} \exp\left[\alpha \frac{\delta_p}{\sqrt{n}}\right] \quad (3.13)$$

hvor  $f_{cg} = 31.07$  MPa

$$\alpha = 2.33$$

$$\delta_p = 0.08$$

$$n = 4$$

Ved indsættelse af disse værdier i ligning 3.13 fås

$$f_{cp} = 31.07 \exp\left[2.33 \frac{0.08}{\sqrt{4}}\right] = 34.10 \text{ MPa}$$

Resultatet indføres under punkt 11 i tabel 3.35a.

### 3.6.6.4 Beregning af betonens fiktive proportioneringsstyrke $f'_{cp}(\text{luft})$

Ved indblanding af luft i beton vil den hærdnede betons trykstyrke reduceres. Når vand-cement forholdet skønnes for en luftindblandet beton, skal der tages hensyn til denne styrkereduktion. Dette foregår ved, at man som indgangsværdi i figur 3.22 benytter en højere fiktiv proportioneringsstyrke end betonens sande proportioneringsstyrke. Da man kan udgå fra, at betonens trykstyrke mindsker med 5.5% for hver 1% luft, der indblandes, kan den fiktive proportioneringsstyrke beregnes på grundlag af ligning 3.30

$$f'_{cp}(\text{luft}) = \frac{f_{cp}}{1 - 0.055 \times a} \quad (3.30)$$

hvor  $a =$  indblandet luft i vol. %.

I henhold til tabel 3.37 skal en beton som den ønskede, der skal udsættes for frost og tørsalte mindst indeholde en samlet mængde luft på  $L = 7\%$ , når den prøves umiddelbart efter, at den har forladt blanderen. Der er imidlertid allerede taget hensyn til den naturligt tilførte luft ved bestemmelsen af de gennemsnitlige betonstyrker, der er angivet i tabel 3.31 som nøgleværdier for betonproportioneringen. Derfor skal den fiktive proportioneringsstyrke beregnes ved indsættelse af  $a = 7 - 1 = 6\%$  i ligning 3.30, eller

$$f'_{cp}(\text{luft}) = \frac{34.10}{1 - 0.055 \times 6} = 50.90 \text{ MPa}$$

Resultatet indføres under punkt 11b i tabel 3.35a.

### 3.6.6.5 Fastlæggelse af betonens frie vand-cement forhold

Det skønnes på grundlag af tabel 3.31, at en beton med et effektivt vand-cement forhold på 0.50, som fremstilles med dansk lavalkali sulfatbestandig cement og danske tilslagsmaterialer, vil opnå en 28-døgns trykstyrke på 40 MPa.

Med et vand-cement forhold på 0.50 og en 28-døgns styrke på 40 MPa som indgangsværdier opsøges det dertil svarende punkt i figur 3.22. Kurven gennem dette punkt føres til skæring med en vandret linie gennem ordina- ten svarende til den fiktive proportioneringsstyrke på 50.90 MPa. Det til skæringspunktet svarende vand-cement forhold på 0.41 indføres under punkt 15 i tabel 3.35a.

Da det beregnede vand-cement forhold på 0.41 er mindre end det vand-cement forhold på 0.45, som kræves af hensyn til miljøklassen, proportioneres betonen for et vand-cement forhold på 0.41. Dette resultat indføres under punkt 17 i tabel 3.35a.

3.6.6.6 Fastlæggelse af betonens frie vandbehov

Da betonen skal have et sætmål på 30-60 mm, skønnes et vandbehov svarende til det næst-lavere konsistensområde på 0-30 mm i tabel 3.32. Idet der tages hensyn til oplysningen om, at tilslaget sammensættes af søsand og skærver, finder man på grundlag af ligning 3.14, at den luftindblandede betons vandbehov er 145 l/m<sup>3</sup>. Resultatet indføres under punkt 20 i tabel 3.35a.

3.6.6.7 Beregning af betonens cementindhold

Ved at dividere betonens frie vandindhold på 145 l/m<sup>3</sup> med det effektive vand-cement forhold på 0.41 fås betonens cementindhold på 354 kg/m<sup>3</sup>, som indføres under punkt 21 i tabel 3.35a.

Da der hverken er stillet krav til største tilladelige cementindhold af hensyn til varmeudvikling (punkt 22 i tabel 3.35a) eller krav til mind- ste tilladelige cementindhold af hensyn til holdbarhed (punkt 23 i tabel 3.35a), proportioneres betonen for et cementindhold på 354 kg/m<sup>3</sup>. Resultatet indføres under punkt 24 i tabel 3.35a.

3.6.6.8 Skøn af reel og beregning af tilsyneladende sandprocent

I henhold til figur 3.24 anbefales det at bruge en reel sandprocent på mellem 27 og 33 procent for en beton med 40 mm maksimal stenstørrelse, et sætmål på 30-60 mm og et vand-cement forhold på 0.41. Med de forelig- gende materialer skønnes en reel sandprocent på 30%. På grund af luft- indblandingen reduceres den reelle sandprocent til 25%. Resultatet ind- føres under punkt 26 i tabel 3.35a.

Da det foreliggende stenmateriale indeholder 1% underkorn, medens sandet ikke indeholder overkorn, beregnes den tilsyneladende sandprocent Sa på grundlag af ligning 3.4

$$S_a = \frac{Y_{\text{tilslag}} - Y_{\text{sten}}}{Y_{\text{sand}} - Y_{\text{sten}}} \times 100 = \frac{25-1}{100-1} \times 100 = 24\% \quad (3.4)$$

Tilslagets tilsyneladende sandprocent Sa er således 24%. Resultatet ind- føres under punkt 27 i tabel 3.35a.

3.6.6.9 Beregning af det samlede tilslagsmateriales densitet

Det fremgår af tabel 3.34, at densiteten for de tre tilslagsmaterialer, der indgår i betonen, er henholdsvis 2500, 2440 og 2660 kg/m<sup>3</sup>. Det frem- går af regneeksempel nr. 4 i afsnit 3.2.3.8, at 47% fint sand skal blandes med 53% groft sand, for at kornkurven for det blandede sand skal ligge i zone 2. Densiteten af det blandede sand kan derfor beregnes på grund- lag af ligning 3.31, der i sin opbygning er analog med ligning 3.16.

$$0.47 \times 2500 + 0.53 \times 2440 = 2468 \text{ kg/m}^3 \quad (3.31)$$

Idet 24% sand med en densitet på 2468 kg/m<sup>3</sup> sammensættes med 76% sten med en densitet på 2660, kan det samlede tilslagsmateriales densitet beregnes på grundlag af ligning 3.32, der i sin opbygning er analog med ligning 3.16.

$$\rho_T = 0.24 \times 2468 + 0.76 \times 2660 = 2614 \text{ kg/m}^3 \quad (3.32)$$

Resultatet indføres under punkt 28 i tabel 3.35a.

3.6.6.10 Beregning af betonens samlede indhold af tilslagsmaterialer

Betonens samlede indhold af tilslag, T, i vandmættet, overfladetør til- stand beregnes på grundlag af ligning 3.18

$$T = \left( 1 - \frac{C}{\rho_C} - \frac{V}{1000} - \frac{L}{100} \right) \rho_T \quad (3.18)$$

- hvor C = 354 kg/m<sup>3</sup>
- ρ<sub>C</sub> = 3150 kg/m<sup>3</sup>
- V = 145 kg/m<sup>3</sup>
- L = 7%
- ρ<sub>T</sub> = 2614 kg/m<sup>3</sup>

Ved indsættelse af disse talværdier i ligning 3.18 fås betonens samlede indhold af tilslagsmaterialer

$$T = \left(1 - \frac{354}{3150} - \frac{145}{1000} - \frac{7}{100}\right) 2614 \quad (3.18)$$

$$T = 1758 \text{ kg/m}^3$$

Resultatet indføres under punkt 29 i tabel 3.35a.

3.6.6.11 Beregning af betonens sand- og stenindhold

Da betonens tilsyneladende sandprocent er 24%, beregnes betonens indhold af sand ved at multiplicere betonens samlede indhold af alle tilslagsmaterialer med 0.24 i henhold til ligning 3.19. Resultatet indføres under punkt 30 i tabel 3.35a.

$$0.24 \times 1758 = 422 \text{ kg/m}^3 \quad (3.19)$$

Betonens samlede indhold af sten beregnes ved at subtrahere indholdet af sand fra betonens samlede indhold af tilslag i henhold til ligning 3.20. Resultatet indføres under punkt 31 i tabel 3.35a.

$$1758 - 422 = 1336 \text{ kg/m}^3 \quad (3.20)$$

3.6.6.12 Betonens blandingsforhold efter vægt

Slutresultatet af proportioneringen bliver således, at 1 m<sup>3</sup> beton skal indeholde:

Cement	354 kg/m <sup>3</sup>
Vand	145 kg/m <sup>3</sup>
Sand i SSD tilstand	422 kg/m <sup>3</sup>
<u>Sten i SSD tilstand</u>	<u>1336 kg/m<sup>3</sup></u>
Vægt af 1 m <sup>3</sup> frisk beton	2257 kg/m <sup>3</sup>

Hertil kommer den nødvendige mængde luftindblandingsstof.

Det bemærkes, at vægten af 1 m<sup>3</sup> frisk beton er lig med den friske betons forventede densitet. Resultatet indføres under punkt 32 i tabel 3.35a.

Hvis det antages, at betonen blandes i satser på 50 l (0.05 m<sup>3</sup>), og at tilslaget befinder sig i vandmættet, overfladetør tilstand, og det erindres, at 47% sand V skal blandes med 53% sand VI, bliver de tilsvarende vægtmængder af de forskellige delmaterialer pr. sats:

Cement	354 x 0.05	17.7 kg
Sand V	0.47 x 422 x 0.05	9.9
Sand VI	0.53 x 422 x 0.05	11.2
Sten	1336 x 0.05	66.8 kg
Vand	145 x 0.05	7.3 kg
Vægt af 50 l beton		112.9 kg

} 21.1 kg

Resultatet indføres under punkt 33 i tabel 3.35a.

Før den egentlige betonproduktion begynder, anbefales det iøvrigt at lade en anerkendt prøveanstalt bestemme den såkaldte afstandsfaktor for luftporestrukturen hos hårdnede betonprøvelegemer, der fremstilles ved prøve-støbningen. Hvis afstandsfaktoren er mindre end 0.25 i henhold til ASTM C 457-71, godkendes det luftindblandende tilsætningsstof for brug i betonen. I modsat fald forkastes det. (Se iøvrigt afsnit 4.4.9.1)

Tabel 35a Proportioneringsskema

Punkt	Anvisning	Værdier
1. Miljøklasse	Krav	Passiv/Moderat/Aggressiv/Særlig
2. Karakteristisk styrke	Krav eller tabel 2.2	$f_{ck} = 30$ MPa
3. Dokumentation af variationskoefficient		Foreligger/foreligger ej
4. Accelereret prøvning		Foretages/foretages ej
5. Variationskoefficient for godkendelse	Tabel 3.24 eller formel 3.12	$\delta_g = 0.08$
6. Variationskoefficient for proportionering	Tabel 3.30 eller som $\delta_g$	$\delta_p = 0.08$
7. Påtalerisiko	Tabel 3.29	1% svarende til $\alpha = 2.33$
8. Stikprøvestørrelse		$n = 4$
9. $k_n$ -værdi	Formel 3.11	$k_n = 1.0355$
10. Godkendelsesstyrke	Formel (3.10a)	$f_{cg} = 31.07$ MPa
11. Proportioneringsstyrke	Formel 3.13	$f_{cp} = 34.10$ MPa
11a. Indblandet luft	Krav eller tabel 3.37 (husk at $a = L - 1$ )	$a = 6\%$
11b. Fiktiv proportioneringsstyrke	Punkt 11 divideret med $(1 - 0.055 \times a)$	$f'_{cp}(\text{luft}) = 50.90$ MPa

3.6.6.13 Proportioneringsskema udfyldt for luftindblandet beton

- 176 -

Tabel 35a Proportioneringsskema (fortsat)

Punkt	Anvisning	Værdier
12. Cementtype og densitet	Krav og tabel 3.33	Lavalkebeton sulfatbestandig (Densitet $3150 \text{ kg/m}^3$ )
13. Stentype	Krav	Skærver
14. Sandtype	Krav	Søsand
15. Vand-cement forhold af hensyn til styrke	Tabel 3.31 og figur 3.22	0.41
16. Største tilladeligt vand-cementforhold af hensyn til miljøklasse	Tabel 3.15	0.45
17. Vand-cement forhold ved proportionering	Brug laveste værdi af punkt 15 og 16	0.41
18. Sætmål	Krav	30-60 mm
19. Største stenstørrelse	Krav	$d_{max} = 40$ mm
20. Frit vandindhold	Tabel 3.32, ligning 3.14 samt ved luftindblanding afsnit 3.6.3	145 $\text{kg/m}^3$
21. Cementindhold af hensyn til styrke	Punkt 20 divideret med punkt 17	354 $\text{kg/m}^3$
22. Største tilladeligt cementindhold af hensyn til varmeudvikling	Evt. krav	intet krav $\text{kg/m}^3$
23. Mindste tilladeligt cementindhold af hensyn til holdbarhed	Evt. krav	intet krav $\text{kg/m}^3$

- 177 -

Tabel 35a Proportionskema (fortsat)

Punkt	Anvisning	Værdi
24. Cementindhold ved proportionering	Brug den mindste værdi af punkt 21 og 22 eller den største værdi af punkt 21 og 23	354 kg/m <sup>3</sup>
25. Sandgradering	Figur 3.10 til 3.13	Zone 2
26. Reel sandprocent	Figur 3.24 samt ved luftindblanding afsnit 3.6.3.	25%
27. Tilsyneladende sandprocent	Formel 3.4	29%
28. Tilslagets densitet	Formel 3.28 og 3.29	2614 kg/m <sup>3</sup>
29. Samlet indhold af tilslag	Formel 3.18	1758 kg/m <sup>3</sup>
30. Indhold af sand	Formel 3.19	422 kg/m <sup>3</sup>
31. Indhold af sten	Formel 3.20	1336 kg/m <sup>3</sup>
Mængder af tilslag i vandmættet overfladetør tilstand		
32. kg/m <sup>3</sup>	Cement	354
	Vand	145
	Sand	422
	Sten	1336
	Forventet densitet hos frisk beton kg/m <sup>3</sup>	2257
33. kg pr. 50 l sats	Cement	17.7
	Vand	7.3
	Sand	21.1
	Sten	66.8
	Forventet densitet hos frisk beton kg/m <sup>3</sup>	2257

(Husk herudover at anføre mængder af evt. tilsætningsstoffer i blandercepten)

4. FORPRØVNING

Betonkontrol omfatter forprøvning, kontrolprøvning, kontrol med udstøbning og efterbehandling samt geometrisk kontrol.

Forprøvning omfatter forprøvning af betonens delmaterialer, undersøgelse og justering af vægt-, doserings- og blandedanlæg, samt fremstilling af prøveblandinger og gennemførelse af prøvestøbninger.

4.1 Forprøvning af delmaterialer

I henhold til Vejdirektoratets vejregler 8.20.01.1-1982, "Udbuds- og anlægsforskrifter for betonbroer. Almindelig arbejdsbeskrivelse for betonbroer", omfatter forprøvning af betonens delmaterialer en undersøgelse og godkendelse af tilslagsmaterialer, vand og tilsætningsstoffer.

4.1.1 Tilslagsmaterialer

Skærpet og normal kontrolklasse

Af de sten- og sandmaterialer, som entreprenøren foreslår anvendt, skal der udtages repræsentative prøver af hver af de anvendte fraktioner og/eller leverancer (sten mindst 35 kg og sand mindst 15 kg). Prøverne fremsendes til et anerkendt prøvelaboratorium til undersøgelse, og prøver af godkendte grusmaterialer afleveres til tilsynet.

Prøvningen skal for hver af de anvendte fraktioner og/eller leverancer mindst omfatte følgende undersøgelser:

Sten

For sten bestemmes generelt:

Densitet i vandmættet overfladetør tilstand samt indhold af absorberet vand (DS 405.2).

Kornstørrelsesfordeling ved sigteanalyse med udvaskning (DS 405.9).

For knust klippemateriale bestemmes specielt:

Indholdet af

- tætte, stærke korn )
- porøse, stærke korn ) (DS 405.7)
- smuldrende korn )

Kornform (DS 406).

Kvalitativ bjergartsbestemmelse (DS 405.1).

For uknuste sortererede sten bestemmes specielt:

Indhold af korn med korndensitet mellem 2400 og 2500 kg/m<sup>3</sup> (DS 405.4).

Indhold af korn med korndensitet mindre end 2400 kg/m<sup>3</sup> (DS 405.4).

Knusningsgrad (DS 405.6).

Kornform (DS 405.6).

For blandede sten bestemmes specielt:

Indhold af korn med korndensitet mindre end 2400 kg/m<sup>3</sup> (DS 405.4).

Knusningsgrad (DS 405.6).

Sand

For sand bestemmes:

Densitet i vandmættet overfladetør tilstand, samt indhold af absorberet vand (DS 405.2).

Kornstørrelsesfordeling ved sigteanalyse med udvaskning (DS 405.9).

Indhold af overkorn med korndensitet mindre end 2400 kg/m<sup>3</sup>. Indhold af korn i fraktionen 2-4 mm med korndensitet mindre end 2400 kg/m<sup>3</sup> (DS 405.4).

Totalt kalkindhold (CTO Betonteknik).

Humusreaktionen (DS 405.3).

Alkalireaktivitet (TI-B 51 eller BI-B 52).

Visse prøvemethoder for undersøgelse af tilslagsmaterialer er beskrevet i T.C. Hansen: "Vejledning i elementær grusprøvning", LBM Tekn. Rap. 113/82. For beskrivelse af andre prøvemethoder henvises til de relevante standardblade.

4.1.2 Vand

Skærpet og normal kontrolklasse

Vandværksvand kan normalt tillades anvendt som støbevand, dog skal entreprenøren på forlangende dokumentere dets egnethed ved forelæggelse af resultater af en vandanalyse.

Såfremt der ikke anvendes vandværksvand, skal entreprenøren ved en vandanalyse samt eventuelt øvrige forundersøgelser godtgøre, at vandet er egnet.

4.1.3 Tilsætningsstoffer

Skærpet og normal kontrolklasse

Luftindblandingsstoffer og plastificeringsstoffer:

Egentlig prøvning af selve stofferne vil ikke blive krævet. Den af stofferne fremkaldte effekt bestemmes i forbindelse med prøvestøbningen.

Andre tilsætningsstoffer:

Kontrollen skal i hvert enkelt tilfælde aftales med tilsynet.

4.2 Undersøgelse og justering af vægt-, doserings- og blandede anlæg

Skærpet og normal kontrolklasse

Vægtanlæg for cement og grus samt doseringsanlæg for vand og tilsætningsstoffer kontrolleres og justeres.

Blandeanlæggets tilstand undersøges og vurderes.

Nøjagtigheden af vægt- og doseringsanlæg skal svare til det i kontrolordningen for fabriksbeton angivne.

I henhold til Dansk Fabriksbetonkontrols tekniske bestemmelser skal doseringsudstyret på en godkendt betonfabrik være af en sådan beskaffenhed, at de udmålte mængder af grus, cement, flyveaske, vand og tilsætningsstoffer ved normal håndtering af anlægget ikke afviger mere end angivet i tabel 4.1. Måle- og aflæsningsnøjagtighed skal opfylde kravene i tabel 4.2. Doseringsudstyrets måleinstrumenter skal være sådan, at aflæsningen under alle forhold kan gøres let og pålideligt inden for doseringsudstyrets nøjagtighed.

Tabel 4.1 Krav til funktionsnøjagtighed af doseringsudstyr

	Cement/ flyveaske og grus	Vand	Tilsætnings- stof
Størst tilladelige afvigelse, som % af tilstræbt mængde, for område			
1/1-1/3 af blanderens kapacitet	± 2%	± 2% <sup>a)</sup>	± 5%
1/3 af blanderens kapacitet	± 3%	± 3% <sup>a)</sup>	± 5%

a) omfatter den tilsatte vandmængde, inklusive såkaldt spædevand, eksklusive vand i grus og i tilsætningsstofopløsninger.

Tabel 4.2 Krav til måleudstyrets måle- og aflæsningsnøjagtighed

	Cement/ flyveaske og grus	Vand	Tilsætnings- stof
Størst tilladelige afvigelse, som % af fuldt udslag	± 0.5%	± 0.5%	± 2% <sup>a)</sup>

a) Ved udstyr til udmåling efter volumen eller tid skal kontrolmetode kunne godkendes af kontroludvalget.

### 4.3 Prøvestøbninger

#### 4.3.1 Generelt

Ved proportionering af beton beregnes visse blandingsforhold mellem cement, vand, sand og sten, som antages at give en beton, der tilnærmelsesvis opfylder kravene til konsistens, styrke og holdbarhed. Proportioneringsmetoden bygger imidlertid på en række forudsætninger og skøn vedrørende

delmaterialernes egenskaber. Da disse forudsætninger og skøn kan være unøjagtige eller fejlagtige, kræver DS 411 for beton i skærpet og normal kontrolklasse, at entreprenøren, før produktionen begyndes, dokumenterer, at de delmaterialer, som agtes anvendt, opfylder de stillede krav. Desuden kræver DS 411, at entreprenøren udfører en eller flere prøvestøbninger med anvendelse af det materiel, der skal bruges ved støbning af konstruktionen. Ved væsentlige ændringer af materialeleverancer skal sådanne prøvestøbninger gentages.

Ved prøvestøbningerne skal det dels påvises, at betonen opfylder de stillede krav, dels skal den for den pågældende støbning bedst egnede konsistens og bearbejdelse fastlægges under hensyn til de valgte metoder for transport, udstøbning og komprimering, og således at afblanding ikke forekommer. Det betyder i jævne vendinger, at betonens vandindhold og sandprocent skal endeligt optimeres i forbindelse med prøvestøbning.

Ved prøvestøbningerne skal enhver behandling af delmaterialerne så nøje som muligt svare til den behandling, som materialerne senere vil blive udsat for under den løbende produktion.

I henhold til Vejdirektoratets vejregler 8.20.01.1 "Udbuds- og anlægsforskrifter for betonbroer. Almindelig arbejdsbeskrivelse", skal prøvestøbninger udføres så betids, at nedenstående normhærdningstider kan forløbe, før den egentlige støbning påbegyndes. Der skal udstøbes mindst 15 prøvelegemer udtaget af tre blandinger (5 stk. fra hver blanding). Seks prøvelegemer (2 stk. fra hver blanding) prøves efter 7 døgn. De resterende prøvelegemer prøves efter 28 døgn.

Dersom de seks første prøvelegemer efter 7 døgn har en gennemsnitsstyrke, som er mindre end 75% af proportioneringsstyrken, skal der ifølge Vejdirektoratets almindelige arbejdsbeskrivelser for betonbroer fremstilles nye prøveblandinger med højere cement-, men samme vandindhold. Dette krav er indført for at spare tid, hvis det skulle vise sig, at 28-døgns styrken af de først fremstillede blandinger til sin tid skulle falde under kravværdien. Forfatteren af dette kompendium gør dog opmærksom på, at de tidlige betontrykstyrker for mange udenlandske cementers vedkommende kan ligge noget under 75% af 28-døgns styrken.



Dette gælder i særlig grad for magre blandingers vedkommende. Hvis tiden ellers tillader det, bør man derfor afvente 28-døgns styrkerne, inden man skrider til endelig omproportionering af betonen.

Viser resultaterne fra første prøvestøbning eller eventuelle senere prøver ikke den forlangte kvalitet, skal blandingsforhold, materialer eller støbetechnik ændres, og nye prøvestøbninger skal udføres, indtil den forlangte kvalitet opnås.

Det ved prøvestøbningen eller eventuelle senere justeringer fastlagte blandingsforhold og den fastlagte konsistens skal overholdes ved alle efterfølgende støbninger og må kun ændres efter aftale med tilsynet.

Den egentlige betonproduktion må ikke påbegyndes, før tilsynets bemærkninger fra prøvestøbningerne foreligger.

For at tilfredsstille tilsynets krav til forprøvning er det som omtalt tilstrækkeligt at fremstille tre prøveblandinger med samme blandingsforhold. Af hensyn til entreprenørens styring af betonproduktionen er det imidlertid hensigtsmæssigt at fremstille supplerende prøveblandinger med de foreliggende materialer og den ønskede konsistens, men med forskellige vand-cement forhold, f.eks. 0.40, 0.50, 0.60 og 0.70. Når styrkeresultaterne fra sådanne blandinger indføres i figur 3.22, kan der tegnes en kurve, som angiver det sande forhold mellem den foreliggende betons styrke og vand-cement forhold. Ved eventuelle senere optrædende ændringer i betonens styrkeniveau under den løbende produktion kan betonens vand-cement forhold justeres på grundlag af denne kurve, der nu er eksperimentelt fastlagt for de netop foreliggende delmaterialer. I praksis foregår denne justering ved at ændre betonens cementindhold, medens vandindholdet forbliver uændret. Dette gør det muligt at styre betonproduktionen med langt større sikkerhed, end hvis man kun har de trykte kurver for gennemsnitsmaterialer i figur 3.22 at holde sig til.

I forbindelse med forprøvningen bør man også fremstille prøvelegemer af hver enkelt blanding, som trykprøves efter 24 timers accelereret hærkning i henhold til DS 423.26. Forholdet mellem betonens 1-døgns trykstyrke ved accelereret hærkning og dens normmæssige 28-døgns trykstyrke kan derved fastlægges, inden man påbegynder produktionen. Hvis man senere fortsætter med at

foretage accelereret prøvning under den løbende produktion, vil det være muligt allerede 1 døgn efter fremstillingen af en beton at skønne dens forventede 28-døgns styrke. Man vil således allerede 1 døgn efter fremstilling af en beton have mulighed for at afsløre sådanne uforudsigelige spring i styrkeniveauet, som kan forekomme f.eks. i perioder med ustabil cementproduktion. Det betyder, at man allerede efter 1 døgns forløb kan gribe ind i produktionen, f.eks. ved at justere betonens cementindhold, således at den krævede 28-døgns styrke opnås for fremtidige blandinger.

Hvis der ikke udføres accelereret prøvning, vil man derimod først opdage et eventuelt fald i betonens styrke 28 døgn efter, at betonen er indstøbt i konstruktionen, og entreprenøren risikerer da i værste fald at få forkastet en hel måneds produktion, hvilket kan få katastrofale tekniske og økonomiske følger.

Iøvrigt fremgår det af afsnit 3.5.6, hvilken umiddelbar økonomisk fordel, i form af lavere proportioneringsstyrke og dermed lavere cementforbrug, som entreprenøren opnår ved systematisk at foretage accelereret prøvning.

Før de prøvestøbninger udføres, som normen kræver, bør entreprenøren fremstille en række prøveblandinger med henblik på at justere den blanderecept, som man er kommet frem til ved betonproportioneringen, således at der bliver bedst mulig overensstemmelse mellem de ønskede og de opnåede egenskaber hos den friske og den hærdnede beton. Fremgangsmåden ved fremstilling og bedømmelse af sådanne prøveblandinger fremgår af de følgende afsnit.

#### 4.3.2 Satsvægte for prøveblandinger

Ved proportionering af udgangsblandingen bestemmes de tilnærmelsesvis vægtmængder af cement, vand, sand og sten, der medgår ved fremstilling af 1 m<sup>3</sup> beton. Proceduren fremgår af tabel 3.35. På grundlag af dette resultat kan man beregne vægtmængderne af de forskellige delmaterialer for netop de satsstørrelser, der skal bruges ved fremstilling af prøveblandinger, prøvestøbning og i den senere produktion. Denne beregning foretages ved at dividere vægtmængden af de forskellige delmaterialer for 1 m<sup>3</sup> beton med 1000 og multiplicere med satsstørrelsen i liter.

Til bedømmelse af prøveblandinger bør der fremstilles betonsatser på mindst 60 l, for at der skal kunne udføres to bestemmelser af sætmål og vebemål og to luftindholds- og densitetsbestemmelser uafhængigt af hinanden, og for at der desuden skal kunne udstøbes 5 stk. 15 x 30 cm cylindre til trykprøvning.

I betragtning af at de løst pakkede delmaterialer, som udtømmes i blanderen, fylder væsentligt mere end den færdigblandede beton, skal en betonblandemaskine, der skal bruges til fremstilling af 60 l frisk beton, have en kapacitet på ca. 100 l. En 60 l blander har hverken volumenkapacitet eller drivkraft til at blande 60 l frisk beton.

#### 4.3.3 Korrektion af satsvægte for tilslagets virkelige fugtindhold

Korrektion af vægtmængderne tilslag og vand under hensyntagen til tilslagets virkelige fugtindhold udføres som vist i afsnit 3.5.17 og tabel 3.36.

DS 405.2 beskriver en prøvemethode til bestemmelse af tilslagets densitet og vandabsorptionsevne i laboratoriet. Tilsvarende beskriver DS 405.11 en metode til bestemmelse af tilslagets vandindhold.

I forbindelse med en eftermiddagsaktivitet i LBM's grundkursus i bygningsmaterialer får man lejlighed til at bestemme disse og andre grundlæggende egenskaber hos tilslagsmaterialer.

Prøvemethoderne er iøvrigt beskrevet i T.C. Hansen, "Vejledning i elementær grusprøvning", LBM Teknisk Rapport 113/82.

#### 4.3.4 Fremstilling af prøveblandinger

Før man fremstiller den første prøveblanding, skal blandemaskinen forberedes ved, at der blandes en halv sats af en beton med samme sammensætning som prøveblandingen. Denne første blanding kasseres, men efterlader et lag mørtel på blandekarrets bund, sider og skovle.

Ved fremstilling af senere prøveblandinger afvejes cement og tilslagsmaterialer i henhold til blanderecepten og udtømmes i blandemaskinen. Den samlede vandmængde minus 1 liter afvejes i en kande. Det luftindblandende tilsætningsstof udmåles og hældes i kanden under samtidig omrøring. Den sidste liter vand udmåles i et 1-liters måleglas.

Den tørre blanding af cement og tilslagsmaterialer blandes i et halvt minut; derefter tilsættes den samlede vandmængde minus vandet i måleglasset i løbet af et halvt minut. Endelig blandes den friske beton i tre minutter, idet netop så stor en mængde af det resterende vand tilsættes i løbet af det første halvandet minut, at man visuelt bedømmer betonen til at have det krævede sætmål. Efter halvandet minuts forløb stoppes blanderen, og der foretages en bestemmelse af sætmålet. Derefter fortsættes blandeprocessen i endnu halvandet minut, eventuelt under samtidig tilsætning af mere vand, hvis sætmålet i første omgang skulle have vist sig at være for lavt.

Efter en samlet blandetid for den våde beton på tre minutter stoppes blanderen og betonen udtømmes i en flad bakke bestående af et ikke-absorberende materiale. Bakken skal have en sådan form, at betonen efter udtømning kan vendes med en skovl, således at enhver form for separation i den friske betonblanding kan elimineres. Umiddelbart efter at betonen er udtømt i bakken, bestemmes betonens sætmål, vebemål, densitet og luftindhold. Samtidig noteres den samlede mængde vand, der i realiteten er medgået til fremstilling af prøveblandingen. Betonen taber nemlig hurtigt en del af sin oprindelige bearbejdelighed og får et lavere sætmål. Dette sker på grund af de fortløbende kemiske reaktioner og på grund af fordampning af vand fra blandekarret og bakken.

#### 4.4 Bedømmelse af prøveblandinger og justering af blandingsforhold

En repræsentativ prøve af den friske beton udtages, som angivet i DS 423.11, og følgende egenskaber bestemmes på den friske og hærtnede beton, idet man så nøje som muligt følger forskrifterne i vedkommende standardblade, hvor sådanne findes:

- 1) Den friske betons konsistens (DS 423.12, DS 423.13 eller DS 423.14)
- 2) Den friske betons luftindhold (DS 423.15)
- 3) Den friske betons densitet (DS 423.16)
- 4) Den hærtnede betons trykstyrke, bestemt på støbte 150-300 mm cylinderformede prøveemner efter et døgn\*, eventuelt efter 7 døgn, og under alle omstændigheder efter 28 døgn (DS 423.21, DS 423.23 og DS 423.26).

\* 1-døgns styrken bestemmes efter accelereret hærning.

- 5) Den friske betons bearbejdelighed og komprimerbarhed, kohæsion, vandseparation samt tilbøjelighed til afblanding af sten (DS 423.18)
- 6) I forbindelse med den løbende produktion bestemmes desuden den friske betons indhold af frit vand og cement samt filler, hvor dette måtte være krævet.

#### 4.4.1 Prøvning af den friske betons konsistens

I daglig sprogbrug betegner ordet bearbejdelighed den lethed, hvormed betonen kan bringes til at udfylde formen, omhylle eventuelle armeringsjern og komprimeres til den forudsatte tæthed. Undertiden udstrækkes begrebet til også at omfatte betonens evne til at lade sig transportere, f.eks. ved pumpning, til at tåle bearbejdning uden at afblande og til at lade sig afrette.

Betonens bearbejdelighed kan i virkeligheden kun vurderes i relation til anvendelsen, og der findes ingen simpel målemetode, der entydigt kan karakterisere bearbejdeligheden for beton, men mange målemetoder kan kvantificere variationer i betonens bearbejdelighed. Den simpleste og mest udbredte er sætmålet, som kan give en talværdi for betonens konsistens, d.v.s. den egenskab hos betonen, hvormed den modstår permanent formændring. Det bemærkes, at konsistens er et snævrere begreb end bearbejdelighed. Konsistensen er meget følsom over for ændringer i betonens frie vandindhold.

DS 423 angiver også prøvemethoder for bestemmelse af vebemål og udbredelsesmål for vurdering af betonens konsistens set i relation til alle former for betonsammensætning og dertil hørende optimal bearbejdelighed, som angivet i tabel 2.6. Men den konsistens, der for en given betonsammensætning giver den optimale bearbejdelighed, kan principielt kun fastlægges ud fra en prøvestøbning med det formudstyr, den armeringsudformning og det komprimeringsudstyr, der skal anvendes i praksis. Ønsker den rådgivende på trods heraf allerede på forhånd at specificere et sætmål, må der levnes entreprenøren mulighed for at få ændret den specificerede værdi på baggrund af en vurdering af de første prøveblandinger og prøvestøbninger. Se iøvrigt afsnit 4.4.1.4.

Det bemærkes, at resultatet af en konsistensbestemmelse altid skal angives som et gennemsnit af to uafhængige bestemmelser.

Når man fastlægger betonens konsistens i form af sætmål, vebemål eller udbredelsesmål, bør man samtidig vurdere betonens generelle bearbejdelighed. For eksempel bør det vurderes, om betonen er strid, d.v.s. om det er vanskeligt at bringe den til at flyde ved vibrering. Det bør også vurderes, om betonen har god kohæsion, eller om den udviser tendens til afblanding af større sten eller udskillelse af vand. I den forbindelse bør man sikre sig, at betonens sandprocent er rimelig. Problemer med hensyn til den friske betons bearbejdelighed skyldes som regel, at sandprocenten er valgt forkert, eller at tilslagets kornform eller gradering er utilfredsstillende.

I afsnittene 4.4.5-4.4.8 er der fremsat forskellige forslag til forbedring af dårligt bearbejdelige betonblandinger.

##### 4.4.1.1 Sætmål

I henhold til DS 423.12 bestemmes betonens sætmål på følgende måde: Betonen udstøbes på et plant, vandret, ikke vandsugende underlag i en keglestubform, åben forneden og foroven og med et nedre tværmål på 200 mm, et øvre på 100 mm og en højde på 300 mm. Formen fyldes i tre nogenlunde lige tykke lag, der hver stampes 25 gange med et ca. 600 mm langt 16 mm rundjern med afrundet ende. Når formen er fyldt og betonen afrettet, løftes formen forsigtigt af, hvorved den støbte betonkegle synker mere eller mindre sammen. Sammensynkningen måles, f.eks. ved at man stiller formen op ved siden af den sammensunkne kegle og bruger dens overside til at flugte langs og udmåle synkningen fra. Er keglen sunket skævt sammen, måles til dens højeste punkt. Udrustning og procedure er vist i figur 4.1.

Alt efter sætmålets størrelse kaldes betonen jordfugtig, meget stiv, stiv, plastisk, tykflydende, letflydende eller "som flydebeton". Se iøvrigt tabel 2.6.

Sætmålet giver som nævnt ikke noget fuldstændigt billede af betonens bearbejdelighed. Yderligere oplysning om denne egenskab kan man med nogen

øvelse skaffe sig, hvis man banker på den afformede kegles sider og top og iagttager, hvorledes betonen skrider ud under denne påvirkning.

Sætmålsprøven egner sig kun for betoner med sætmål fra ca. 10 mm til ca. 150 mm.

Det bemærkes, at der ved støbning af en foreliggende konstruktionsdel ikke findes nogen på forhånd given sammenhæng mellem på den ene side betonens sætmål, vebemål eller udbredelsesmål, og på den anden side betonens optimale bearbejdelighed. Hvis man imidlertid har fundet en betonsammensætning, der giver den ønskede formbarhed og komprimerbarhed i forbindelse med den foreliggende formtype, armeringsudformning og komprimeringsudstyr, kan man benytte denne betons sætmål, eller for den sags skyld vebemål eller udbredelsesmål, som en slags reference, ud fra hvilken sætmålkravet eller andre krav stilles. Ensartethed i sætmål (vebemål eller udbredelsesmål), som målt fra sats til sats, sikrer da en rimelig ensartethed i den producerede betons bearbejdelighed.

De usikkerheder, der knytter sig til sætmålsbestemmelsen, bevirker, at tolerancetillægget ikke bør sættes under ± største værdi af 15 mm eller 1/3 af den specificerede værdi.

Variationer ud over toleranceintervallet må tages som tegn på utilsigtede variationer i en eller flere af de følgende materialeparametre:

Vandindhold  
Luftindhold  
Tid fra blanding til prøvning  
Betontemperatur  
Indhold og sammensætning af øvrige materialer

#### 4.4.1.2 Vebemål

I henhold til DS 423.13 bestemmes betons vebetalt i et apparat, som er vist i figur 4.2. Det fremgår af figuren, at apparatet består af et vibratorbord, på hvilket der er fastspændt en spand. I spanden udstøbes og afformes en sætmålskegle. Hen over keglen drejes en til apparatet

hørende svær glasplade, der frit kan synke ned med betonen, som den ved prøvningens start netop berører. Vibratoren sættes i gang, betonkeglen synker sammen, og pladen følger med. Den tid, der forløber, indtil hele glaspladens underside dækkes af betonen, måles med stopur. Tiden angives i vebesekunder; jo færre vebesekunder, des lettere bearbejdelig er betonen.

Vebepøven er kun hensigtsmæssig, såfremt det målte antal vebesekunder ligger mellem 5 og 30.

#### 4.4.1.3 Udbredelsesmål

Figur 4.3 og 4.4 viser apparatur til bestemmelse af udbredelsesmålet i henhold til DS 423.14.

Metoden er af tysk oprindelse ("Ausbreitmass"), men har vundet indpas her i landet sammen med superplastificeringsstofferne, idet sætmålsprøven ikke er velegnet til flydebeton (se tabel 2.6).

Udstyret består af en keglestubform af pladejern, en træstamper, et faldbord og en målestok. Keglestubformen er åben i top og bund, højden er 200 mm, øvre og nedre diameter henholdsvis 130 og 200 mm (den afviger altså fra den sædvanlige sætmålstragt). Træstamperens tværsnit er 40x40 mm. Udbredelsesbordets plade er 700x700 mm, og den vejer 16 kg; dens ene side kan løftes 40 mm til et anslag.

Formen stilles midt på bordet og fyldes i to nogenlunde lige tykke lag, der hver stemples 10 gange med stamperen. Når formen er fyldt og betonen afrettet, løftes formen forsigtigt af; bordpladen løftes til anslaget og slippes, således at den falder frit, hvilket gøres 15 gange i løbet af 15 sekunder. Betonen breder sig herved ud. De to diametre parallelt med bordets kanter måles; gennemsnittet er betonens udbredelsesmål.

#### 4.4.1.4 Justering af en betonblanderecept på grundlag af konsistensmåling af prøveblandinger

Hvis det under forprøvningen viser sig, at den friske beton kræver mere eller mindre frit vand for at opnå den ønskede bearbejdelighed, end det

var antaget ved den oprindelige proportionering, så omproportioneres betonen med det justerede vandindhold fra punkt 20 til punkt 32 i proportioneringsskemaet, tabel 3.35.

#### 4.4.2 Prøvning af den friske betons luftindhold

Det samlede luftindhold i en frisk betonmasse bestemmes i et såkaldt press-ur-meter eller en lignende anordning, i henhold til DS 423.15. Metoden er baseret på Boyle-Mariottes lov.

Luftindholdsmåleren består af en stor cylindrisk, stiv og betonbestandig beholder med plan overside. Måleren har en overdelt, som kan tilsluttes beholderen tæt, således at der dannes et trykkammer over prøven i beholderen.

Den store beholder fyldes i to omgange i omtrent lige tykke lag. Hvert lag bearbejdes med vibrering på vebe-bordet til betonoverfladen er blevet jævn, blank og sammenhængende. Efter sidste vibrering afrettes overfladen i højde med beholderens overkant. Derefter påsættes overdelen, der indeholder en lille beholder, som kan pumpes op til et bestemt overtryk uden at være i forbindelse med den store beholder. Når man derefter åbner en ventil mellem de to beholdere, vil der ske en trykkudligning, idet luften i betonen sammenpresses. Trykfaldet i den lille beholder registreres på et manometer, hvis skala er inddelt, således at den direkte viser betonens luftindhold i volumenprocent.

Det bemærkes, at betonens luftindhold altid skal beregnes som et gennemsnit af to uafhængige bestemmelser. Den målte værdi sammenlignes eventuelt med de generelle kravværdier i tabel 3.37. Ved at subtrahere 3% fra det luftindhold, der måles for betonen ved blanderen, fås den hærtnede betons procentuelle indhold af indblandet luft, som det må forventes at blive i konstruktionen. Denne værdi jævnføres med den mængde indblandet luft, der eventuelt måtte være krævet i arbejdsbeskrivelserne for den hærtnede beton i konstruktionen i den angivne miljøklasse.

Hvis der er overensstemmelse mellem målt og krævet værdi for betonens indhold af indblandet luft, fortsættes med en bestemmelse af betonens øvrige egenskaber. Hvis betonens luftindhold derimod afviger fra kravværdien, justeres den doserede mængde tilsætningsstof, og der fremstilles nye prøveblandinger, indtil betonens målte luftindhold modsvarer det stillede krav.

#### 4.4.3 Prøvning af den friske betons densitet

Frisk betons densitet bestemmes i henhold til DS 423.16.

Det er bekvemt at måle betonens densitet i press-ur-meter beholderen umiddelbart før luftindholdet bestemmes. Da metodens nøjagtighed er afhængig af, at betonoverfladen afrettes nøjagtigt efter karrets overkant, skal fremgangsmåden beskrives nærmere.

Der foretages en nøjagtig bestemmelse af beholderens volumen ved at veje den med og uden vand. Med tilstrækkelig nøjagtighed svarer beholderens volumen, i liter, til differencen mellem de to vægtaflæsninger, i kg. Beholderen tømmes for vand og fyldes derefter med beton i tre på hinanden følgende og lige tykke lag. Hvert lag bearbejdes med vibrering på vebe-bordet, til betonoverfladen er blevet jævn, blank og sammenhængende.

Efter afsluttet komprimering afrettes overfladen med en flad, rektangulær ca. 6 mm tyk metalplade eller en ca. 12 mm tyk glas- eller acrylplade med en længde og bredde, der er mindst 50 mm større end diameteren på press-ur-meter beholderen. Pladens kant skal være lige og jævn med en tolerance på 1,5 mm. Afretningen sker bedst ved at presse pladen ned mod overfladen, således at den dækker ca. to trediedele af overfladen. Derefter trækkes pladen tilbage med en savende bevægelse, således at kun det dækkede areal afrettes. Pladen anbringes igen over det tidligere dækkede areal og føres nu fremad med en savende bevægelse, idet den holdes mod beholderens kant med et lodret tryk. Den endelige afretning sker ved, at man holder pladen en smule og fører den frem og tilbage over overfladen, indtil denne er helt jævn. Derefter renses beholderens yderside for overskydende beton, og den fyldte beholder vejes. Den friske betons densitet beregnes som vægten af den fyldte beholder minus vægten af den tomme beholder, divideret med beholderens volumen.

Hvis proceduren følges omhyggeligt, kan den friske betons densitet måles med en nøjagtighed på  $\pm 10 \text{ kg/m}^3$ . Densiteten beregnes som gennemsnittet af to uafhængige målinger og angives i  $\text{kg/m}^3$  med sidste ciffer afrundet til 0. Den målte densitet jävnføres derefter med den friske betons beregnede densitet, som angivet under punkt 32 i proportioneringsskemaet, tabel 3.35. Hvis de to værdier stemmer overens, er forholdene i orden. Hvis de to værdier derimod ikke stemmer overens, justeres betonens samlede indhold af tilslag under punkt 29, således at betonens forventede densitet under punkt 32 kommer til at passe med dens målte densitet. Betonens indhold af sand og sten under punkterne 30 og 31 justeres tilsvarende med vejledning af den nye værdi for betonens samlede indhold af tilslag under punkt 29. Hvis denne korrektion ikke udføres, vil den virkeligt producerede betonmængde i liter pr. sats ikke svare til det beregnede udbytte.

En omhyggelig kontrol af den friske betons densitet under en løbende produktion vil hurtigt kunne afsløre mange af de fejl, der måtte forekomme i produktionen. Selv mindre variationer i betonens vand- eller luftindhold vil nemlig ændre den friske betons densitet. Hvis den målte densitet hos den friske beton afviger mere end  $\pm 20 \text{ kg}$  fra den værdi, der er målt ved prøvestøbningen, bør forholdene undersøges nærmere.

#### 4.4.4 Prøvning af den hærtnede betons trykstyrke

##### 4.4.4.1 Fremstilling og standard lagring ved $20^\circ \text{C}$ af betoncylindre

DS 423.21 beskriver metoder til fremstilling og lagring af støbte prøvelegemer, der skal benyttes til bestemmelse af betonens trykstyrke. Prøvelegemerne skal opfylde kravene til form, mål og planhed, der er angivet i DS 423.20.

300 mm høje cylinderforme med en indre diameter på 150 mm skal være fremstillet af vandtætte, betonbestandige og ikke-absorberende materialer. Formenes indersider olieres med et tyndt lag formolie for at forhindre, at betonen skal hæfte ved formen. Formene fyldes med beton i to lag. Formene skal være fastgjort til vibrationsbordet, som bør være et standardiseret vebe-bord i henhold til DS 423.13. Vibreringen af hvert lag skal foregå i så lang tid, at et tyndt lag cementmørtel dækker alle større tilslagskorn og store luftblærer ikke længere frigøres fra betonoverfladen.

Betonoverfladen skal være jævn, blank og sammenhængende. Som oftest vil en vibreringstid på 10 sekunder være passende. Den gang valgte vibreringstid skal fastholdes ved fremstilling af alle efterfølgende prøvelegemer.

Betonen over formens overflade fjernes, og overfladen udjævnes med en glasplade eller en stållineal f.eks. som angivet i afsnit 4.4.3. Senest en halv time efter komprimeringen af de cylindriske prøvelegemer sættes låget på. De lagres i vandret stilling i formen og beskyttes mod udtørring i omgivelser ved  $20 \pm 4^\circ \text{C}$  i mindst 16 timer til betonen er hærtnet. Senest 72 timer efter udstøbningen afformes prøvelegemerne og lagres derefter i vand med en temperatur på  $20 \pm 2^\circ \text{C}$  indtil prøvningen. Trykstyrken bestemmes i henhold til DS 423.23.

##### 4.4.4.2 Fremstilling og accelereret hærtning af betoncylindre

DS 423.26 beskriver metoder til fremstilling og lagring af betoncylindre til prøvning efter 24 timers accelereret hærtning.

Prøvelegemerne skal fremstilles som angivet i DS 423.21 og opfylde kravene til form, mål og planhed efter DS 423.20. Umiddelbart efter udstøbningen sættes låget på formene. De placeres inden for 15 minutter efter udstøbningen vandret i et kar med vand, som med termostatstyrede varmpatroner kan holde vandet ved  $55 \pm 2^\circ \text{C}$  under varmhærtningen.

Prøvelegemerne varmhærtnes i 24 timer  $\pm 5$  minutter efter udstøbningen.

Efter afsluttet hærtning afformes prøvelegemerne. Inden for 15 minutter efter afformningen tørres trykfladerne, og prøvelegemernes trykstyrke bestemmes i henhold til DS 423.23.

Metoden kan anvendes til, efter kalibrering, at vurdere 28-døgns trykstyrken under forudsætning af at betonens delmaterialer og sammensætning, betonens udgangstemperatur og betonens hærtningstemperatur holdes konstante.

##### 4.4.4.3 Trykprøvning af betoncylindre

Trykstyrken af støbte cylindre bestemmes i henhold til DS 423.23 ved, at prøvelegemet trykkes til brud i en trykprøvemaskine, som opfylder en række krav, der er nærmere angivet i standardbladet.

Vandlagrede prøvelegemer tages op af vandbadet tidligst en halv time før prøvningen og aftørres, således at der ikke findes frit vand på trykfladerne. Prøvelegemernes dimensioner opmåles som angivet i DS 423.20. Prøvelegemet placeres nu centrisk i trykprøvemaskinen med en nøjagtighed inden for ± 1 mm. Når den øvre trykplade kommer i kontakt med prøvelegemet, justeres trykpladen, således at denne og trykfladen er parallelle. Trykkraften påføres kontinuerligt med en hastighed på 0.8 ± 0.2 MPa/s. Endelig beregnes trykstyrken som største trykkraft divideret med tværsnitsarealet beregnet ud fra de målte dimensioner. Trykstyrken angives i MPa med en decimal.

4.4.4.4 Justering af betonens blanderecept på grundlag af styrkeresultater fra prøveblandinger

Når styrkeresultaterne fra prøveblandingerne foreligger, beregnes middelværdien af de prøvede cylindres styrke. Denne middelværdi sammenlignes med betonens proportioneringsstyrke. Såfremt de to værdier afviger fra hinanden, afsættes den målte styrkeværdi i figur 3.22, og der foretages en justering af betonens vand-cement forhold.

Figur 4.5 viser to eksempler på, hvorledes en sådan justering kan foregå i praksis. Punkt A i figur 4.5 angiver indgangsdata fra tabel 3.21 for de foreliggende cement- og tilslagsmaterialer ved den alder på betonen, som den oprindelige proportionering er baseret på. Punkt B angiver det effektive vand-cement forhold, som oprindeligt er skønnet for udgangsblandingen. Punkt B' angiver det virkelige effektive vand-cement forhold for prøveblandingen, efter at vandindholdet er justeret, således at betonen har opnået den foreskrevne konsistens. Punkt C angiver gennemsnittet af de målte styrkeresultater fra prøvestøbningen. Punkt D angiver det korrigerede vand-cement forhold, ved hvilket betonen må formodes at opnå den ønskede proportioneringsstyrke. For luftindblandet betons vedkommende kan identisk samme justeringer foretages, idet man dog som indgangs-, respektive udgangsværdier på absцisseaksen i figur 4.5 bruger:

$$\text{vand-luft-cement forholdet} = \frac{\text{vol. frit vand} + (\text{vol. målt luft} - 1 \text{ vol.}\%) }{\text{cementindholdet efter vægt}}$$

Det vil være rimeligt at foretage mindre justeringer af betonens blandingsforhold uden at udføre supplerende prøveblandinger. I undtagelsestilfælde, hvor en større justering af vand-cement forholdet måtte være

nødvendig, skal betonen omproportioneres, og der skal udføres en supplerende prøveblanding med de ændrede blandingsforhold. Den tidsforsinkelse, der uvægerligt vil være en følge af kravet om fremstilling og bedømmelse af nye prøveblandinger, kan imidlertid undgås, hvis man i første omgang fremstiller flere prøveblandinger med den krævede konsistens, men med forskellige vand-cement forhold, respektive vand-luft-cement forhold, f.eks. 0.40, 0.50, 0.60 og 0.70. Ved interpolation i figur 4.5 mellem de målte styrkeresultater for betoner med forskellige vand-cement forhold, kan man da med betydeligt større sikkerhed fastlægge netop det vand-cement forhold, som vil give den ønskede proportioneringsstyrke, uden at styrken behøver eftervises ved supplerende prøvestøbninger. Til slut omproportioneres betonen med det justerede vand-cement forhold fra punkt 15 til punkt 32 i proportioneringsskemaet, tabel 3.35.

4.4.5 Vurdering af den friske betons sandprocent

Når sandets kornkurve i sin helhed ligger inden for en af zonerne 1-4, som angivet i figur 3.10-3.13, og kornkurven for stenene i sin helhed ligger inden for grænserne i figur 3.1-3.7, så kan betonens optimale sandprocent aflæses med god tilnærmelse af figur 3.24. Når disse betingelser er opfyldt, vil det være sandsynligt, at tilslagets samlede kornkurve også ligger inden for de anbefalede zonegrænser i figur 3.15-3.20, og at betonen vil være velbearbejdelig, kohæsiv og økonomisk. Hvis betingelserne ikke er opfyldt, kan man forvente, at betonens kvalitet vil være utilfredsstillende set fra et teknisk-økonomisk synspunkt.

En beton, som fremstilles med optimal sandprocent og velgraderede sten med god kornform, vil være karakteriseret ved:

- 1) Sandprocenten vil være valgt korrekt i henhold til figur 3.24.
- 2) Mange stenpartikler vil være synlige i blandingen, men vil være dækket af et lag mørtel.
- 3) Når betonen knuges i hånden, vil den opføre sig som en plastisk, sammenhængende masse.
- 4) Når man slår let på siden af den afformede sætmålskegle med sætmålets stikstang, vil betonkeglen langsomt synke sammen som en helhed, uden at stenene adskilles fra mørtelen.

- 5) Når man bearbejder betonmassen i blandemaskinen med en murerske i op- og nedadgående retning, bliver massen let plastisk og bevægelig.
- 6) Når man stryger betonmassen med en murerske i fremad- og tilbagegående retning, vil hulrummene mellem stenpartiklerne let udfyldes med mørtel, og der frembringes uden vanskelighed en jævn og glat overflade, som ikke har kornet eller sandet udseende.

Iøvrigt er den optimale sandprocent karakteriseret ved, at betonen får den ønskede konsistens med det lavest mulige vandindhold, uden at stenene adskilles fra mørtelen. Da vand-cement forholdet er fastlagt af hensyn til betonens styrke, vil en beton med det lavest mulige vandindhold samtidig have det lavest mulige cementindhold. En betonblanding med optimal sandprocent vil derfor være den mest økonomiske beton, der kan fremstilles med de foreliggende materialer.

Da en betonblanding, som fremstilles med den absolut optimale sandprocent, taber sine gode egenskaber og bliver strid, hvis den tilsatte sandmængde bliver blot en anelse for lille, proportionerer man som regel betonen for et sandindhold, der ligger et par procent over den optimale. Dette er der taget hensyn til ved udarbejdelse af figur 3.24.

En undersandet betonblanding indeholder nemlig ikke mørtel nok til helt at udfylde hulrummene mellem stenpartiklerne, som derfor kommer til at gnide mod hinanden, hvilket gør det vanskeligt at bearbejde betonen. Man siger, at der forekommer partikelinterferens. En undersandet mørtel vil altid være vanskelig at bearbejde og vil mangle kohesion. En undersandet betonblanding er derfor vanskelig eller umulig at komprimere. Den hærdnede beton vil ofte indeholde stenreder, og den vil være porøs, svag, vandgennemtrængelig og uholdbar. Desuden vil formsatte overflader få et utilfredsstillende udseende. En undersandet betonblanding vil være karakteriseret ved:

- 1) Sandprocenten vil være for lav i henhold til figur 3.24.
- 2) Mange stenpartikler vil være synlige i blandingen, og mange partikler vil ikke være helt dækket af mørtel.

- 3) Når betonen knuges i hånden, vil den føles som en kornet masse, der ikke hænger sammen.
- 4) Når man slår let på siden af den afformede sætmålskegle med sætmålets stikstand, vil betonkeglen skride ud.
- 5) Når man bearbejder betonmassen med en murerske i op- og nedadgående retning, kan massen kun vanskeligt eller slet ikke bringes i bevægelse. Man siger, at betonen er strid. Dette kan iøvrigt også skyldes, at stenpartiklerne har en utilfredsstillende kornform, hvilket er meget almindeligt, når betonen fremstilles med skærver; men det kan også skyldes tilstedeværelsen af partikelspring i den samlede kornkurve (se iøvrigt afsnit 4.4.6).
- 6) Når man stryger betonmassen med en murerske i fremad- og tilbagegående retning, vil det være vanskeligt eller umuligt at udfylde hulrummene mellem stenpartiklerne med mørtel, og man kan ikke frembringe en jævn og glat overflade.

En oversandet betonblanding er karakteriseret ved et forholdsvis stort vandbehov for given betonkonsistens. Da vand-cement forholdet er fastlagt af hensyn til betonens styrke, vil en oversandet beton samtidig kræve et forholdsvis stort cementindhold, og den vil derfor være uøkonomisk. Et stort cementindhold er også uheldigt af hensyn til betonens krybning, svind, revnedannelse såvel som med hensyn til krakelering og varmeudvikling.

En oversandet betonblanding vil ofte være fed og klæbrig, men paradoksalt nok kan den samtidig være strid. Dette kan være tilfældet, hvis sandet har dårlig kornform, som det ofte er tilfældet for skærvesands vedkommende, eller hvis sandets kornkurve har en "pukkel", d.v.s. når sandet indeholder uforholdsmæssigt store mængder materiale mellem 0.125 og 0.5 mm (0.15 og 0.6 mm), eller mellem 1 og 4 mm (1.25 og 4.8 mm). Overskud af sand mellem 1 og 4 mm (1.25 og 4.8 mm) kan for eksempel forekomme, når stenene indeholder store mængder underkorn, for hvilke der ikke korrigeres. Hvis blandingen er våd, samtidig med at den er oversandet, vil der ved overfladebearbejdning blive ført et overskud af vand og fint materiale til overfladen. Dette resulterer i dannelsen af et overfladelag, som består af mørtel med dårlig kvalitet. Dette lag vil have et højt vand-cement forhold, en lav



styrke, dårlig frostbestandighed og være tilbøjelig til at støve, krakelere, revne og muligvis helt adskille sig fra den underliggende betonmasse. Til trods for disse ulemper er det dog at foretrække, at en beton er oversandet, fremfor at den er undersandet. En oversandet beton vil nemlig altid være kohæsiv, og der vil være liden risiko for afblanding af stenene. En oversandet betonblanding vil være karakteriseret ved:

- 1) Sandprocenten vil være valgt for højt i forhold til de anbefalede værdier i figur 3.24.
- 2) De fleste eller alle stenpartikler vil være fuldstændigt begravet i og dækket af mørtel.
- 3) Når betonen knuges i hånden, vil den føles som en plastisk sammenhængende, fedtet og klæbrig masse.
- 4) Når pladejernskeglen løftes op ved sætmålsbestemmelsen, vil betonen klæbe til denne, og der vil dannes små pyramideformede mørteltotter på betonoverfladen. Når man slår let på keglen med sætmålets stikstang, vil keglen langsomt synke sammen som en helhed, uden at stenene adskiller sig fra mørtelen.
- 5) Når man bearbejder betonmassen med en murerske i op- og nedadgående retning, vil massen forholdsvis let kunne bringes i bevægelse.
- 6) Når man stryger betonmassen med en murerske i fremad- og tilbagegående retning, vil hulrummene mellem stenpartiklerne let udfyldes med mørtel, men overfladen vil få et kornet eller sandet udseende.

Da de fleste oversandede betonblandinger er rimeligt velbearbejdelige, kan det være vanskeligt visuelt at bedømme, hvor langt sandprocenten i en oversandet blanding befinder sig fra den optimale. Ved prøveblandinger kan man imidlertid, idet man gradvis reducerer sandindholdet, bestemme den optimale sandprocent, svarende til det laveste vandindhold, ved hvilket betonen opnår den ønskede konsistens uden at blive undersandet og tabe sin bearbejdelighed. Som tidligere nævnt, proportionerer man som regel betonen for et sandindhold, der ligger et par procent over den optimale.

Hvis det viser sig nødvendigt at justere sandprocenten under forprøvningen, omproportioneres betonen med den justerede sandprocent fra punkt 27 til punkt 32 i proportioneringsskemaet, tabel 3.35.

#### 4.4.6 Vurdering af den friske betons bearbejdelighed

Hvis betonen har optimal sandprocent, men alligevel er vanskelig at bearbejde og overfladebehandle, siges den at være strid. Dette beror ofte på en utilfredsstillende gradering eller kornform hos tilslaget.

En beton vil være strid, hvis tilslaget ikke indeholder tilstrækkeligt store mængder filler, d.v.s. materiale der passerer 0.25 eller 0.3 mm sigten. Det vil ofte være tilfældet, når en mager og våd beton, d.v.s. en beton med lille cementindhold og højt vandindhold, fremstilles med groft sand i zone 1. For at forbedre betonens bearbejdelighed kan en del af det grove sand blandes med et finere graderet sand i zone 3 eller 4, således at sandets samlede kornkurve kommer til at ligge i zone 2. Et eksempel på, hvorledes dette kan foregå i praksis, er vist i afsnit 3.2.3.8. Når sandet er for groft, kan betonens bearbejdelighed imidlertid også forbedres, hvis man øger cementindholdet så meget, at summen af cement og filler kommer op på de værdier, der er angivet i tabel 3.12. Endelig kan der tilsættes et fillermateriale til betonen i form af flyveaske eller finmalet kalksten, eller der kan tilføres et luftindblandende tilsætningsstof.

Derimod er det usandsynligt, at bearbejdeligheden af en beton, der er fremstillet med et sand, som mangler fine partikler eller filler, kan forbedres ved at øge sandprocenten. Dette vil nemlig i mange tilfælde øge risikoen for partikelkontakt i tilslaget som helhed og derved medføre, at betonen bliver endnu mere strid.

En betonblanding vil også være strid, hvis den indeholder et overskud af en eller flere partikelfraktioner i tilslaget, d.v.s. når sandets eller stenenes kornkurve har et eller flere stejle trin og derfor krydser over en eller flere zonegrænser. Typisk vil dette være tilfældet, når man bruger strand- eller klitsand, eller vindsorteret ørkensand. Sådanne materialer har som regel en snæver og stejl korngradering og bør opblandes med andet sand, der har en kornkurve, som giver det samlede sandmateriale en jævnere gradering. Hvis det ikke er muligt, inden for en rimelig afstand fra byggepladsen, at opspore et passende sand til indblanding, kan man forsøge at forbedre betonens bearbejdelighed ved at tilføre mere stenmateriale i 4-8 mm eller 5-10 mm fraktionerne.

På grund af utilfredsstillende sortering af stenene, eller hvis stenene knuses under transport og oplagring, kan det forekomme, at stenmaterialet indeholder store mængder underkorn i 1-4 mm (1.25-5 mm) fraktionen. Forekomsten af sand i stenene vil ofte være årsagen til, at betonen bliver strid. For at korrigere for underkorn i stenmaterialet kan man enten nedsætte sandprocenten i betonen, som vist i afsnit 3.2.3.10, eller man kan finsigte stenmaterialet for at eliminere underkornene, umiddelbart før stenene overføres til blandestationens siloer.

Hvis der bruges knust klippemateriale, såkaldte skærver, ved betonfremstillingen, og i særlig grad hvis skærverne er groft graderede, d.v.s. hvis stenmaterialet har en lavtliggende kornkurve, bør betonens sandprocent vælges noget højere, end det er anbefalet i figur 3.24. Derved kan man undgå, at betonen bliver strid. Selv når man følger dette råd, må man imidlertid være forberedt på, at skærvebeton altid vil være mere strid end beton, som fremstilles med sø- eller bakkemateriale. Det skyldes, at skærver altid har ugunstigere kornform og ujævnere overflader end naturligt forekommende stenmateriale. Situationen forværres, jo mere aflange, flade og skarpkantede partiklerne er, og jo flere splinter og flager stenene indeholder. Kubisk formede skærver giver den bedste beton; men kubisk kornform kan være vanskelig at opnå for mange råmaterialers vedkommende og med visse typer af knusemaskineri. Tilførsel af et luftindblandende tilsætningsstof (eller flyveaske) forbedrer imidlertid betonens bearbejdelighed i betydelig grad. Derfor fremstilles skærvebeton næsten altid med luftindblanding.

Sand, der er fremstillet ved knusning af stenmateriale, såkaldt skærvesand, medfører altid fremstilling af en stridere beton end brug af sø- eller bakkesand. Også sådan betons bearbejdelighed forbedres ved tilsætning af luft.

Beton, der fremstilles med et vand-cement forhold, som er højere end 0.60, vil sjældent være kohæsiv nok til at forhindre afblanding af sten og udskillelse af vand. Selv om betonen måske ikke direkte kan betegnes som værende strid, vil den ofte være vanskelig at transportere og udstøbe på tilfredsstillende måde. Set fra et teknisk synspunkt bør kvalitetsbeton derfor aldrig fremstilles med højere forhold end 0.60 mellem vand og cement

+ flyveaske og andre mineralske fillermaterialer. På grund af kortsynede økonomiske betragtninger overholdes dette sjældent i praksis.

Hvis der ikke er nogen åbenlys årsag til, at en beton er strid, kan fenomenet skyldes, at blandingen enten er let undersødet, eller at der forekommer spring i tilslagets kornkurve, som ikke afsløres ved brug af de anbefalede standard-sigter. Hvis f.eks. det meste af materialet i en foreliggende 20-40 mm stenfraktion ligger tæt ved 40 mm, og hvis størstedelen af materialet i en tilsvarende 10-20 mm fraktion ligger omkring 10 mm, så vil det store spring i kornkurven mellem 40 og 10 mm ikke afsløres ved en normal sigteanalyse, hvor man kun bruger 40 mm, 20 mm og 10 mm sigterne. Betonen vil sandsynligvis være dårligt bearbejdelig og udvise tendens til afblanding af stenene. Springet i kornkurven vil imidlertid kunne afsløres ved en sigteanalyse, hvor man indskyder de supplerende 25 mm og 14 mm ASTM-sigter mellem 40 mm, 20 mm og 10 mm sigterne.

Det vil altid være teknisk og økonomisk fordelagtigt at fremstille beton med det bedst muligt graderede tilslag, fremfor at afhjælpe eventuelle fejl i graderingen ved at øge sandprocenten eller ved at indblande luft. Først når alle andre muligheder for at fremstille en tilfredsstillende beton er udtømte, kan man som sidste udvej gribe til sådanne nødforanstaltninger.

#### 4.4.7 Vurdering af den friske betons vandseparation

Når der udskilles vand på frie betonoverflader under transport, udstøbning, komprimering eller overfladebearbejdning, siger man, at der forekommer vandseparation. Dette kan ske selv i sådanne tilfælde, hvor betonen er fremstillet med optimal sandprocent. Betonen vil udskille vand, når cementpartiklerne under tyngdekraftens indvirkning synker ned i opslemningen og derved presser vandet opad. Denne proces fortsætter, indtil cementpartiklerne enten nærmer sig hinanden i en sådan grad, at de elektrostatiske kræfter mellem de enkelte partikler opvejer påvirkningen af tyngdekraften, eller indtil der dannes kemiske bindinger mellem partiklerne ved cementens hydratation.

Vandseparation i frisk beton bestemmes kvantitativt i henhold til DS 423.18 som den mængde vand, der samles oven på betonfladen i en cylindrisk beholder af ikke-vandsugende, betonbestandigt materiale, med indvendig diameter mindst fire gange tilslaget nominelle maksimale kornstørrelse, dog mindst 200 mm, samt mindst 230 mm indvendig højde og med tætsluttende låg. Højden 200 mm skal være markeret på beholderens inderside. Beholderen fyldes med frisk beton i to omgange til markeringen ved 200 mm højde, som angivet i DS 423.15. Betonens temperatur bestemmes. Den skal være inden for  $20 \pm 2^{\circ} \text{C}$  ved referenceprøvning. Beholderen med indhold placeres på et fast underlag og til-dækkes med låget. Tiden efter den seneste vandtilsætning noteres.

Efter en time og derefter hvert 15. minut opsuges det vand, som udskilles, og overføres til måleglasset sammen med eventuelt kondensvand på lågets underside. To minutter før hver opsugning hældes beholderen forsigtigt. Efter opsugningen tilbageføres beholderen lige så forsigtigt til udgangsstillingen. Låget må kun tages af under opsugningen.

Proceduren gentages, så længe vand separerer, d.v.s. normalt 2-4 timer. Den sammenlagte vandmængde i måleglasset noteres efter hver påfyldning. Vandseparationen beregnes i procent af betonens oprindelige volumen uden decimal som funktion af tiden efter blandingen, d.v.s.

$$\frac{100 V_1}{V}$$

hvor  $V_1$  = opsuget vandmængde  
 $V$  = betonens oprindelige volumen

Når beton udstøbes i dybe forme, presses det vand, der udskilles af den først udstøbt beton, højere og højere op i formen, efterhånden som der tilføres ny beton. Derfor vil den øverste del af søjler og vægge som regel have et højere vand-cement forhold og dermed lavere styrke og dårligere holdbarhed end resten af sådanne lodrette konstruktionselementer. Dette fænomen, der på engelsk betegnes "water gain", modvirkes dels ved at fremstille en beton med lav eller ingen tendens til vandudskillelse, dels ved gradvis at reducere den fremstillede betons sætmål, efterhånden som formen fyldes op.

Ved overfladebehandling vil der altid ske en vis komprimering af betonoverfladen, hvorved permeabiliteten af det øverste lag reduceres. Hvis betonen overfladebehandles, før dens naturlige vandudskillelse er afsluttet, vil det vand, der senere udskilles, ikke kunne trænge op til overfladen. Det vil i stedet samle sig i et lag lige under overfladen og effektivt adskille overfladelaget fra resten af betonmassen. Når betonen senere udsættes for frysning eller trafik, kan overfladelaget skalle af.

Selv om overfladebehandlingen sker på det gunstigst mulige tidspunkt, vil vandudskillelse altid give anledning til dårlig holdbarhed og slidstyrke af gulve og belægninger. Der vil nemlig dannes et tyndt lag cementslam på overfladen, som efter afsluttet hærkning og under hele betonens levetid vil afgive støv, og som vil forringe både belægningens slidstyrke og holdbarhed.

I fede, cementrige, men våde betonblandinger, som får lov at sætte sig uforstyrret, vil vandudskillelsen ske jævnt over hele overfladen. I virkelige betonkonstruktioner forstyrres betonmassens konsolidering imidlertid af forhindringer såsom armeringsjern, store stenpartikler og formsider, og der dannes vandfyldte lommer under armeringsjern og sten, og revner ved formsiderne. Derved svækkes vedhæftningen mellem cementmørtelen og sten såvel som vedhæftningen til armering, og både betonens styrke og holdbarhed reduceres. Vandseparation i cementrige betonblandinger kan altid undgås ved at nedsætte betonens vandindhold, således at forholdet mellem vand og det samlede indhold af cement, flyveaske og andre mineralske fillermaterialer ikke overstiger 0.45-0.50.

Magre og våde betonblandinger med højt sætmål, d.v.s. blandinger med lavt cementindhold og højt vandindhold, vil altid være tilbøjelige til at udskille vand. Dette kan give anledning til dannelse af makroskopiske kanaler, som leder fra betonmassens indre mod overfladen. Vandudskillelsen sker så hurtigt gennem disse kanaler, at små cement- og sandpartikler rives med af vandet og transporteres mod overfladen. På lodrette formsatte overflader manifesterer sådanne kanaler sig ofte som tynde utiltalende sandstriber.

Tilslaget kornkurve er i det store og hele uden betydning for betonens vandudskillelse. Kun fillerindholdet spiller en afgørende rolle. Den

sikreste måde at undgå vandudskillelse forbliver at fremstille beton med et forhold mellem vand og et samlet indhold af cement, flyveaske og mineralsk filler, der er mindre end 0.45 for blandinger med højere sætmål end 60 mm og mindre end 0.50 for blandinger med sætmål lavere end 60 mm.

Hvis det oprindelige sand naturligt eller efter at være vasket indeholder for små mængder filler, kan betonens tilbøjelighed til vandudskillelse reduceres ved at blande sandet med et finere sand, der naturligt indeholder større mængder filler. Det samme kan opnås ved at øge betonens cementindhold eller ved at tilsætte et mineralsk filler eller flyveaske, eller evt. ved at indblende luft.

Luftindblanding har en stabiliserende virkning på friske betonblandinger og mindsker både blandingernes tilbøjelighed til afblanding af sten og vandseparation. I det store og hele har de små kunstigt tilførte luftblærer og de kuglerunde flyveaskepartikler samme indvirkning på en betonblanding som mineralsk filler, men de øger ikke betonens vandbehov på samme måde, som de fleste andre mineralske fillermaterialer. Luftindblanding eller tilsætning af flyveaske vil derfor kunne afhjælpe mange fejl i tilslaget gradering og i betonens sammensætning, uden at det er forbundet med andre ulemper. Dette vil i særlig grad være tilfældet for magre blandingers vedkommende, når sådanne blandinger fremstilles med groft sand, hvor den ugunstige indvirkning af et lavt fillerindhold forstærkes af et lavt cementindhold i betonen.

Betons tilbøjelighed til at udskille vand påvirkes også af cementens finmalingsgrad, alkaliindhold og  $C_3A$ -indhold, samt ved tilsætning af kalciumklorid. Der er imidlertid som regel andre og mere væsentlige grunde til at vælge en bestemt cement eller et bestemt tilsætningsstof end hensynet til vandudskillelse.

#### 4.4.8 Valg af den friske betons kohæsion og tilbøjelighed til afblanding af sten

Når de større sten i en betonblanding skiller sig ud fra resten af betonmassen under transport, udstøbning eller komprimering, siger man, at blandingen mangler kohæsion, og at der som følge heraf sker en afblanding af

betonen. Det vil da være vanskeligt at komprimere betonen til en homogen masse. Der kan opstå stenreder, og den hærdnede beton kan blive inhomogen, anisotrop, svag, utæt og uholdbar. Desuden kan formsatte overflader få et ujævnt og utiltalende udseende. Virkningen af stenafblanding er særlig uheldig, når betonen skal pumpes eller udstøbes under vand.

De væsentligste årsager til afblanding af sten i en betonmasse er springgradering af stenene, store forskelle i densitet mellem de enkelte delmaterialer, højt sætmål og lav sandprocent, eller en kombination af to eller flere af disse faktorer. Afblanding modvirkes ved omhyggelig sammensætning af tilslaget, korrekt betonproportionering, og ved at udvise forsigtighed i forbindelse med udtømning, transport, udstøbning og komprimering af den friske beton.

Risikoen for afblanding af sten i en betonmasse er særlig stor, når:

- a) Blandingen er mager, d.v.s. cementfattig.
- b) Blandingen er våd, d.v.s. vandindholdet er højt.
- c) Blandingen er undersandet eller mangler filler, eller begge dele.
- d) Stenstørrelsen overstiger 32-40 mm, eller største stenstørrelse er uforholdsmæssigt stor sammenlignet med konstruktionselementets dimensioner, eller afstanden mellem armeringsjernene.
- e) Der bruges skærver, og i særlig grad når skærverne ikke er kubiske.
- f) Der bruges exceptionelt lette eller særligt tunge tilslagsmaterialer.
- g) Tilslaget er spring-graderet.
- h) Betonen rystes under blanding eller under transport over lange afstande. Betonen styrtes ned i formene fra stor højde, eller den transporteres ad styrtrender.
- i) Formen eller armeringen er kompliceret og indeholder mange detaljer og skarpe hjørner.

##### 4.4.8.1 Indre afblanding

Man skelner mellem indre og ydre afblanding af sten i beton. Ved indre afblanding forstås man nedsynkning og bundfældelse af større og tungere stenpartikler eller en opstigning til overfladen af lette tilslagspartikler

i transportbeholderen eller i formen. Jo magrere og vådere betonen er, jo mere spring-graderet og jo mere groft-graderet tilslaget er, desto større vil risikoen være for afblanding af de større sten. Særligt lette eller meget tunge tilslagspartikler vil være specielt tilbøjelige til at afblande. Tilbøjeligheden til afblanding af stenene kan reduceres ved at øge betonmassens kohæsion, d.v.s. dens evne til at holde tilslaget opslemmet. Dette kan ske ved at

- a) reducere vandindholdet, således at forholdet mellem vand og det samlede indhold af cement, flyveaske og andre mineralske fillermaterialer bliver mindre end 0.45 for blandinger med sætmål større end 60 mm og mindre end 0.50 for blandinger med sætmål mindre end 60 mm.
- b) øge cementindholdet,
- c) skifte fra et sand i zone 1 til et sand i zone 2,
- d) øge betonens indhold af cement, flyveaske og andre mineralske fillermaterialer til de i tabel 3.12 anbefalede værdier,
- e) indblande luft,
- f) undgå spring-graderet tilslag og bruge et jævner og finere graderet materiale,
- g) reducere stenstørrelsen til 16 eller 20 mm i stedet for 32 eller 40 mm,
- h) bortsigte overkorn i stenmaterialet.

Den udstrakte brug af spring-graderede sten er et stort problem i store dele af verden, hvor der ikke findes nogen veludviklet sand- og grus-industri. I udviklingslande markedsføres håndknuste skærver ofte i en eller to snævre størrelsesfraktioner. Samtidig er sandet uforarbejdet og ligger måske i zone 1 eller 4. Det samlede tilslag, der kan sammensættes af sådanne råmaterialer, vil som regel være spring-graderet, og det er vanskeligt at undgå indre afblanding i de våde og bløde blandinger, som må bruges under primitive forhold, fordi entreprenørerne ikke råder over det nødvendige udstyr til vibrering af betonen. Når betonen må fremstilles med spring-graderet tilslag, kan risikoen for afblanding af stenene reduceres eller elimineres ved at mindske stenstørrelsen til 25 mm, ved at øge sandprocenten, og ved at reducere sætmålet til en værdi under 100 mm.

Det bringes dog i erindring, at spring-gradering af tilslag ofte vil skabe et sådant overskud af visse størrelsesfraktioner, at der forekommer partikelkontakt, hvorved betonen bliver strid. Det vil for eksempel være tilfældet, når groft sand i zone 1 bruges i forening med håndknuste skærver.

Det kan ikke tilrådes at indblande luft i beton, der fremstilles under primitive forhold, hvor omhyggelig kontrol er vanskelig eller umulig.

#### 4.4.8.2 Ydre afblanding

Ydre afblanding betyder, at stenpartikler frigør sig fra den friske betonmasse under blanding, transport eller udtømmning i formene, men før komprimering af betonen. Ydre afblanding forekommer først og fremmest i tørre og magre blandinger. Sådanne blandinger mangler nemlig ofte kohæsion. Ydre afblanding er ligeledes uundgåelig i undersandede betonblandinger. Spring-graderede sten med stor stenstørrelse er særlig udsatte for afblanding.

Tilbøjelighed til ydre afblanding i en betonmasse kan reduceres eller elimineres ved at:

- a) øge cementpastaindholdet i tørre og magre blandinger. Cement- og vandindholdet skal forøges samtidig, således at vand-cement forholdet og dermed styrken holdes konstant,
- b) øge sandindholdet, såfremt blandingen er undersandet,
- c) vælge et mere jævnt og finere graderet tilslag og en mindre maksimal stenstørrelse,
- d) indblande luft.

#### 4.4.9. Vurdering af visse tilsætningsstoffers indvirkning på den friske betons bearbejdelighed og den hærdnede betons frostbestandighed

##### 4.4.9.1. Luftindblandende tilsætningsstoffer

Luftindblanding bruges i nogen udstrækning til at forbedre bearbejdelighed og kohæsion af beton, der udviser tilbøjelighed til vandseparation og afblanding af sten. Brug af luftindblandende tilsætningsstoffer kræver imidlertid en hyppig og omhyggelig kontrol af den friske beton, som beskrevet i

afsnit 4.4.2. Desuden skal betonens blandingsforhold justeres, som beskrevet i afsnit 3.6.5, når der bruges luftindblandende tilsætningsstoffer.

Imidlertid bruges luftindblandende tilsætningsstoffer hovedsagelig for at sikre den hærdnede betons frostbestandighed. Ved mere kritiske konstruktioner bør man derfor undersøge, om det valgte luftindblandingsstof giver anledning til dannelse af en jævn luftporestruktur i den hærdnede beton med en afstandsfaktor i henhold til ASTM C457 på mindre end 0.25 mm.

Følgende beskrivelse af luftporeanalyse stammer fra Betonbogen, Cementfabrikernes Tekniske Oplysningskontor, 1979:

Luftporeanalyse udføres på et uimprægneret planslib af en udboret prøve af hærdnet beton. Luftporemåling i beton er standardiseret i ASTM C 457, "Standard Recommended Practice for Microscopical Determination of Air-Void Content and Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete".

C 457 anviser to metoder: "linear traverse" og "point counting". "Linear traverse"-metoden foregår således:

En slebet flade af betonen mikroskoperes med 50 ganges forstørrelse. Der vælges en målelinje. Langs denne måles antal og længde af de korder, som afskæres af målelinjen (figur 4.6).

Luftindholdet A (volumenprocent) kan beregnes af

$$A = (l_k / l_{tot}) \cdot 100\%$$

hvor  $l_k$  er summen af kordelængderne (mm) og  $l_{tot}$  er den totale målelængde (mm).

Poresystemet karakteriseres ved den specifikke bobleoverflade pr. volumenenhed af boblerne  $\alpha$  ( $\text{mm}^2/\text{mm}^3 = \text{mm}^{-1}$ ) og ved afstandsfaktoren  $\bar{L}$ .  $\alpha$  beregnes således

$$\alpha = \frac{4n}{l_k} \text{ (mm}^{-1}\text{)},$$

hvor n er det totale antal korder.

Afstandsfaktoren er en fiktiv størrelse, der kan beskrives som den maksimale afstand fra et punkt i cementpastaen til den nærmeste bobleoverflade, beregnet ud fra den forudsætning, at alle porer er lige store og fordelt i et simpelt kubisk mønster i pastaen.  $\bar{L}$  fås af:

$$\bar{L} = \frac{P}{\alpha \cdot A} \text{ (mm)} \quad \text{hvis } \frac{P}{A} < 4.34$$

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \cdot \left( 1.4 \cdot \left( \frac{P}{A} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right) \text{ (mm)} \quad \text{hvis } \frac{P}{A} \geq 4.34$$

Her er P cementpastaens volumen uden porer, i % af betonvolumen.

Ved "point counting"-metoden er målebordet indrettet til at stoppe for hver 0.01 mm. Her bestemmes, om man ser pasta, sten eller luft. Iagttagelsen trykkes ind på en tæller.

"Point counting"-metoden påstås at være hurtigere og sikrere end "linear traverse"-metoden. Endvidere har den den fordel, at pastaindholdet måles. "Linear traverse" har den fordel, hvis tællingen er udført med edb-optælling, at porekordefordelingen kan optegnes.

Det almindeligt anerkendte krav til afstandsfaktoren i frostsikker beton,  $\bar{L} \leq 0.25$  mm, forudsætter, at målingerne er foretaget efter ASTM's metode med 50 ganges forstørrelse. Ved mange laboratorier arbejder man i dag med forstørrelser på 100 gange og mere. Herved kan man se flere bobler. Hvis dette er tilfældet må kravet ændres fra 0.25 til 0.20 mm.

#### 4.4.9.2 Plastificerende tilsætningsstoffer

I modsætning til luftindblandende tilsætningsstoffer forbedrer plastificerende tilsætningsstoffer sjældent betonen, hverken med hensyn til vandseparation eller med hensyn til afblanding af sten. De er heller ikke til megen hjælp, når betonen er strid. Tværtimod kan brug af plastificerende tilsætningsstoffer forværre fejlene i en betonblanding, når de bruges med formål at øge konsistensen, snarere end til at reducere betonens vandindhold. Brug af plastificerende tilsætningsstoffer kræver derfor en meget omhyggelig proportionering af udgangsbetonen.

Uanset hvilket plastificerende tilsætningsstof der bruges ved betonfremstilling, bør man altid sikre sig, at det overholder kravene i ASTM C 494, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete".

#### 4.4.10 Prøvning af den friske betons vand-cement forhold, cementindhold og fillerindhold

Den friske betons vand-cement forhold, cementindhold og fillerindhold kan bestemmes ved registrering af de doserede mængder af cement, vand og grus samt måling af grusets vandindhold og fillerindhold (ved våd sigtning af sand og sten i henhold til DS 405.9). I visse tilfælde kræves det dog, at den friske betons sammensætning bestemmes ved direkte analyse, for eksempel som angivet i CtO's kompendium i betonteknologi.

Ved den direkte analyse udtages en repræsentativ prøve af frisk beton, således at mængden mindst er 50% større end den mængde, der medgår til undersøgelsen.

En delprøve ( $P_1$  i gram) (mængden f.eks. svarende til betonens densitet i g/l) udtørres til konstant vægt ( $P_2$  i gram). Differencen  $P_1 - P_2$  angiver betonens vandindhold ( $V$  i gram). En tilsvarende delprøve ( $P_1$ ) benyttes til vådsigtning, hvor det materiale, der passerer 0.25 mm sigten, d.v.s. cement + filler, bortskylles.

Ved vådsigtning af frisk beton kan for nemheds skyld anvendes et mindre antal sigter, f.eks. 0.25 - 1 - 4 - 8 og 16 mm.

De på hver sigte renskyllede sigterester tørres, vejes og adderes ( $P_3$  i gram).

Grusets tørvægt korrigeres for den bortskyllede fillermængde  $< 0.25$  mm ( $P_4$  i gram).  $(P_4 = P_3 \times (1 - 0.01F))$

Fillermængden ( $F$  i gram) er den procentdel, som registreres på den i forvejen sammensatte gruskornkurve af de vådsigtede sand- og stenmaterialer.

Hvis der ønskes ekstra kontrol på cement- og fillerindhold, kan skyllevandet og dets indhold af fint materiale opsamles i en balje for senere dekantering, tørring og vejning.

Differencen  $P_2 - P_4$  angiver delprøvens cementindhold ( $P_5$  i gram). Cementindhold i  $\text{kg/m}^3$ , vand-cementtal og blandingsforhold udregnes på grundlag af formlerne 4.1, 4.2 og 4.3.

$$\text{Cementindhold i kg/m}^3 \text{ beton} = \frac{P_5 \cdot R}{P_1} \tag{4.1}$$

$$\text{Vand-cement forhold} = \frac{V}{P_5} \tag{4.2}$$

$$\text{Blandingsforhold} = 1 : \frac{P_4}{P_5} \quad (\text{Cement : Grus}) \tag{4.3}$$

hvor  $R$  = den friske betons densitet i g/l.

#### 5. MODTAGE- OG PROCESKONTROL AF BETON

Den løbende kontrol med en betonproduktion opdeles i tilsynets modtagekontrol og entreprenørens proceskontrol. De to former for kontrol foregår i princip uafhængigt af hinanden.

Modtagekontrollen omfatter forprøvning og prøvestøbning af beton, som beskrevet i kapitel 4, løbende kontrolprøvning, kontrol med udstøbning og efterbehandling samt geometrisk kontrol. Geometrisk kontrol er et anlægsteknisk problem, der falder uden for rammerne af dette kompendium. Vurdering af resultaterne fra forprøvning og prøvestøbninger er behandlet i kapitel 4. Kontrol med betonens udstøbning og efterbehandling diskuteres i kapitel 6. Afsnit 5.1.1 til 5.1.11 behandler kravene til kontrolprøvning af den friske og den hærdede beton i henhold til Vejdirektoratets almindelige og særlige arbejdsbeskrivelser for betonbroer, medens problemer i forbindelse med entreprenørens proceskontrol kort berøres i afsnit 5.2.

Det understreges atter, at ved anvendelse af fabriksbeton kan efter særlig aftale kontrollen med betonens delmaterialer og med betonen helt eller delvis baseres på resultater fra fabrikkens løbende kvalitetskontrol. Det vil fremgå af det følgende, at brug af fabriksbeton fritager entreprenøren for et meget omfattende arbejde.

## 5.1 Modtagekontrol

### 5.1.0 Generelt

Kravene til modtagekontrollen for den færdige betonkonstruktion skal fremgå af betonbeskrivelsen. Kravene skal omfatte alle relevante egenskaber, og omfanget af kontrollen skal være angivet. Kravet til resultatet for godkendelse skal fremgå, ligesom sanktioner i tilfælde af forkastelse skal være præciseret.

Som hovedregel vil kontrollen have til formål at undersøge, om krav til en egenskabs karakteristiske værdi kan anses for opfyldt. I den forbindelse bringes det i erindring, at en statistisk kravformulering altid skal indeholde følgende tre bestanddele:

- 1) en definition af "gode" og "dårlige" elementer i fordelingen,
- 2) den maksimalt tilladte brøkdel af "dårlige" elementer i fordelingen,
- 3) den maksimalt tilladte sandsynlighed for at godkende et delmateriale eller en beton, som ikke opfylder kravet.

Ved praktisk materialekontrol fremstilles og undersøges kun ganske få af de mange mulige prøvelegemer. I den statistiske test må der derfor tages hensyn til, at bedømmelsens pålidelighed varierer med prøveantallet.

Før prøveudtagningen skal leverancen eller konstruktionen således opdeles i kontrolafsnit, og det skal fastlægges, hvor mange observationer af den pågældende art, der skal foretages inden for hvert kontrolafsnit, samt hvor mange enkeltobservationer der skal foretages inden for hver prøve. Ved et kontrolafsnit forstås de på forhånd aftalte konstruktionsafsnit, der støbes i én og samme kontinuerlige støbning med samme betonkvalitet. Problemer i forbindelse med opdeling af en konstruktion i kontrolafsnit behandles i afsnit 3.5.2.

Eventuelt kan betonkontrollen foregå på 3 kontrolniveauer.

Ved arbejdets begyndelse startes på kontrolniveau I. Når 3 på hinanden følgende kontrolprøvningsprøver på kontrolniveau I er godkendt, kan kontrollen

flyttes til kontrolniveau II. Når 3 på hinanden følgende kontrolprøvningsprøver på kontrolniveau II er godkendt, kan kontrollen flyttes til kontrolniveau III. Såfremt en eller flere kontrolegenskaber ikke godkendes, flyttes straks til kontrolniveau I og proceduren gentages.

Kontrolniveauerne I, II og III kan for eksempel fastlægges gennem:

- 1) Kontrolafsnit med variabel størrelse
- 2) Sammenlægning af kontrolafsnit ved II og III
- 3) Nedsættelse af undersøgelsesomfanget ved II og III
- 4) Nedsættelse af prøveantallet ved II og III.

Prøveudtagning og prøvning af betonen og dens delmaterialer skal ske i henhold til prøvningsmetoder, der er anført i gældende "Dansk Standard", eller i mangel heraf i henhold til den på danske prøveanstalter gældende anerkendte praksis. Prøvningsomfanget er afhængigt af den foreskrevne kontrolklasse og er nærmere angivet i det følgende. De stillede krav til den friske og hærnedede beton skal for skærpet og normal kontrolklasse eftervises på prøver udtaget ved udstøbningsstedet.

Ved prøvning af delmaterialeegenskaber, den friske betons egenskaber, og ved kontrol af den hærnedede betons egenskaber, er det naturligvis afgørende, at den udtagne materialeprøve er repræsentativ. Herved forstås, at prøven tages af en tilfældigt udpeget sats på en sådan måde, at dens gennemsnitlige sammensætning bedst muligt svarer til satsens middelværdi.

Prøveudtagning af frisk beton skal foregå i henhold til DS 423.11. I dette standardblad benyttes følgende terminologi: En sats er den ved en enkelt blandingsoperation blandede beton, fra hvilken en analyseprøve skal udtages. En delprøve er en mængde beton, som er udtaget med skovl eller lignende ved en enkelt operation. En analyseprøve er den del af en sats, som skal anvendes til bestemmelse af en eller flere egenskaber hos betonen eller til fremstilling af prøvelegemer til f.eks. styrkebestemmelse. En analysemængde er en bestemt del af en analyseprøve, beregnet til en speciel prøvning.



Man skal altid have formålet med prøveudtagningen for øje. Derfor vælger man et sted og en metode til prøveudtagningen, som kan give en repræsentativ analyseprøve af betonen. Analyseprøven skal være mindst 1.5 gange den til prøvningen nødvendige mængde, dog mindst 0.02 m<sup>3</sup>. Analyseprøven skal udtages, når betonen er blandet til homogenitet.

Når blanderen udtømmes i en jævn strøm, tages prøven sådan, at den tilhører den mellemste del af betonen. I andre tilfælde skal analyseprøven bestå af mindst 3 delprøver udtaget fra forskellige dele af betonen. Fra en lastbil eller trugbil tages delprøven mindst 0.1 m under betonens overflade. Delprøverne skal umiddelbart efter anbringes på et rent underlag eller i en eller flere beholdere. Umiddelbart inden formfyldning eller prøvning af betonen skal delprøverne blandes omhyggeligt.

Tiden mellem prøveudtagning og formfyldning skal være så kort som mulig, så prøvningsresultatet ikke påvirkes. Analysemængden skal under prøveudtagning, transport og håndtering beskyttes mod fugt, udtørring, væsentlige temperaturforandringer og mod afblanding.

I henhold til DS 405.0 skal analyseprøver af tilslagsmaterialer sammensættes af mindst 6 delprøver. Den enkelte delprøve må ikke være mindre end angivet i tabel 5.1. Den samlede prøve skal være tilstrækkeligt stor til, at de ønskede prøvninger kan foretages med de i de enkelte standardblade anførte prøvestørrelser, uden at nogen del af materialet anvendes til flere prøvninger. Dog må de fraktioner, der fremkommer ved sigteanalyse, benyttes til prøvninger, der udføres på hver enkelt fraktion for sig.

Inden prøveudtagningen afgrænses den del af kontrolafsnittet, som analyseprøven skal repræsentere. Inden for den afgrænsede mængde udtages delprøverne således, at alle delmængder har samme sandsynlighed for at blive udtaget. En objektiv udvælgelse kan eksempelvis sikres ved lodtrækning mellem de mulige delprøver.

Delprøverne sammenblandes og homogeniseres inden en eventuel neddeling til de enkelte formål. Neddeling skal ske ved kvartning eller under anvendelse af prøvedeler som beskrevet i T.C. Hansen, "Vejledning i elementær grusprøvning", LBM Teknisk Rapport 113/82.

Tabel 5.1 Prøvestørrelser for tilslagsmaterialer

Maksimal kornstørrelse	Mindste delprøvestørrelse
mm	masse
> 32	40 kg
16-32	5 kg
8-16	700 g
2- 8	200 g
< 2	100 g

Ideelt set burde analyseprøvestørrelser og metodik for udtagning af prøver af frisk beton og delmaterialer fastsættes ud fra et eksplicit krav til den ønskede nøjagtighed. I praksis klarer man sig imidlertid med empiriske regler for, hvor stor prøven skal være, og hvordan den skal tages ud. Den nødvendige størrelse af analyseprøver og analysemængder afhænger af, hvilken egenskab der skal kontrolleres, og er angivet i de enkelte standardblade.

Tidspunkterne for udtagning af prøver af den friske beton skal fastsættes i samråd med tilsynet. Tilsynet kan ud over den i det følgende forudsatte prøvning kræve yderligere kontrolundersøgelser af den friske beton udført, samt ekstra prøvecylindre udstøbt, såfremt situationen efter tilsynets vurdering måtte kræve det.

Entreprenøren skal stille fornødent mandskab til disposition ved prøvernes udtagning og undersøgelse. Det bemærkes i denne forbindelse, at det tager en rutineret kontrollant ca. 1½ time at udtage en prøve af frisk beton, bestemme konsistens, luftindhold og rumvægt, udstøbe to cylindre, samt bestemme vand-cement forhold og fillerindhold.

Det påhviler entreprenøren at fremskaffe dokumentation for kvaliteten af betonen og dens delmaterialer. Dokumentation skal ske ved værksattester, prøveattester eller ved prøvninger på entreprenørens eget laboratorium.

Dokumentationen skal ske løbende under arbejdets gang og fremmes mest muligt. Fastlæggelse af procedurer m.v. i forbindelse med kontrollen skal ske i samarbejde med tilsynet, såfremt det ikke på anden måde er fastsat i udbudsmaterialet.

Entreprenørens kontrol skal udføres af kvalificeret personale og med egnet apparatur.

Tilsynet skal have lejlighed til at overvære al prøveudtagning og materialeprøvning på entreprenørens arbejdsplads, laboratorium eller andet sted.

Entreprenøren skal uden vederlag afgive prøver for tilsynets stikprøvekontrol.

For alle kontrolprøver gælder, at deling af prøver skal udføres i en prøvedeler, og at tørring af prøver skal kunne udføres i såvel termostattyrede tørreovne som på pande.

Det påhviler entreprenøren at lade udføre prøvning ved specielle prøveanstalter, hvis dette er foreskrevet i udbudsmaterialet.

Ikke foreskrevne (men af tilsynet forlangte) prøver betales af bygherren, dersom prøveresultaterne falder inden for de anførte krav, i modsat fald betales prøven af entreprenøren.

Dersom entreprenøren ifølge de foretagne kontrolprøver ikke har opfyldt de til arbejdet stillede krav, kan tilsynet tillade, at entreprenøren for egen regning udfører yderligere prøvning eller eftervisning i eller af det udførte. Prøvningen eller eftervisningen skal i alle detaljer aftales med tilsynet, der samtidig vil meddele, hvilke krav man vil stille til resultatet af prøvningen eller eftervisningen.

Dersom tilsynet ikke på dette udvidede grundlag kan acceptere arbejdet som konditionsmæssigt, har entreprenøren pligt til at gøre arbejdet om.

Entreprenøren skal umiddelbart efter forsøgenes udførelse aflevere forsøgsresultaterne på skemaer, godkendt eller udleveret af tilsynet.

#### 5.1.1 Betonlaboratoriets indretning og udstyr

Entreprenøren skal på arbejdspladsen råde over et laboratorium, hvis kapacitet, med hensyn til såvel personale som udstyr, skal være så stort, at kontrol af arbejdet kan udføres i et omfang, der sikrer en fyldestgørende beskrivelse af arbejdets kvalitet.

Laboratoriefaciliteterne skal forefindes i et opvarmet lokale med adgang til rindende vand, afløb og el.

Der skal i laboratoriet kunne udføres følgende forsøg og målinger:

Tilslagsmaterialernes kornstørrelsesfordeling (kornkurve og fillerindhold) bestemt ved tør- og vådsigtning.

Tilslagsmaterialernes kornform og knusningsgrad.

Tilslagsmaterialernes humusreaktion, lerindhold, indhold af porøse og bløde korn, totale kalkindhold samt indhold af fremmede bjergarter i granittilslag.

Tilslagsmaterialernes indhold af lette korn.

Tilslagsmaterialernes densitet.

Tilslagsmaterialernes fugtindhold.

Den friske betons konsistens bestemt ved sætmål og vebeapparat.

Den friske betons luftindhold bestemt ved press-ur-meter metoden.

Den friske betons rumvægt.

Den friskebetons sammensætning, herunder vandindholdsbestemmelse, cementindholdsbestemmelse, vand-cement forholdsbestemmelse, bestemmelse af filler-mængde, udført ved bl.a. vådsigtning (12" sigter med minimum en sigtesøjle som følger: 0.125 mm, 0.25 mm, 1 mm, 4 mm og 16 mm) af den friske beton og af de anvendte tilslagsmaterialer. Cementindholdsbestemmelsen skal udføres med korrektion for fillerindhold i tilslagsmaterialerne.

Udstøbning samt opbevaring i termostattyret vandbad af betonprøvecylindre (d = 150 mm, h = 300 mm).

Trykprøvning af betonprøvecylindre.

Bestemmelse af temperatur af luft, blandevand, og frisk samt hærdnende beton.

Betonlaboratoriet skal indeholde følgende udstyr:

- 1) Analysevægte (1-5 kg), nøjagtighed i henhold til DS 405.9, pkt. 9.2
- 2) Kontrollvægte (10-50 kg), nøjagtighed i henhold til DS 423.11, pkt. 23.

- 3) Termostatstyret tørreovn og stegepande.
- 4) El- eller gasvarmekilde.
- 5) Standard sigtesæt 8" eller 12" med låg og bund og sigter 32-16-8-4-2-1-0.5-0.25-0.125 evt. 0.074 mm.
- 6) Mekanisk tør/vådsigteapparat.
- 7) Sanddeler.
- 8) Kegle + stamper med tørreaggregat til absorptionsmålinger af sand.
- 9) Hydrometer og tunge væsker til bestemmelse af tilslagsmaterialers densitetsfordeling.
- 10) Målehjørne og parallelføringsplade til bestemmelse af tilslagsmaterialers kornform.
- 11) Termostatstyret lagringskar.
- 12) Stålførme til cylindre 150/300 mm.
- 13) Vibrationsbord med frekvens 50 Hz og amplitude 0.5 mm, og forsynet med fastspændingsanordninger for cylinderforme. (Her kan vebeapparatets vibrationsbord med stor fordel benyttes, da det med sikkerhed og i modsætning til de fleste vibrationsborde, der forekommer i handelen, opfylder ovennævnte krav.)
- 14) Trykprøvemaskine med min. kapacitet 100 tons.
- 15) Sætmålskegle med stikstang.
- 16) Luftmåleapparat.
- 17) Målebeholder til rumvægtsmåling.
- 18) Diverse: stopur, skydelære, pyknometer, måleglas, bægerglas, tragt, retskede, spande, børste, kost, skovl, hammer, skeer, opbevaringsbakker, betontermometer, udendørs termometer (min/max), farveplanche til humusbestemmelse, termoelementer og digitaltermometer til måling af temperatur og temperaturfordeling i hærdnende konstruktionsdele.

Udstyret bør i fornødent omfang suppleres med vebeapparat, evt. indsats til spaltetrækprøvning, proctorpenetrationsapparat til afbindingsforsøg, og adiabatisk kalorimeter til bestemmelse af betonens varmeudvikling.

#### 5.1.2 Kontrol af cement

##### Skærpet og normal kontrolklasse

Såfremt der foreligger varedeklaration, kræves der udført en modtagekontrol, som dokumenteres ved opbevaring af kvitterede følgesedler.

For leverancer uden varedeklaration skal der efter tilsynets nærmere anvisning udtages en cementprøve for hver påbegyndt 500 m<sup>3</sup> beton (inden for entreprisen) fremstillet med den pågældende cementtype.

Prøven undersøges ved anerkendt dansk prøveanstalt for nedennævnte egenskaber:

Finhed

Indhold af sekundære komponenter og tilsætninger

Afbindingstid

Volumenbestandighed

Styrke

Alkaliindhold (bestemt som ækvivalent Na<sub>2</sub>O).

#### 5.1.3 Kontrol af grus (sand og sten)

##### Skærpet kontrolklasse

Gruset skal løbende undersøges i omfang som anført i afsnit 4.1.1.

Resultaterne af undersøgelsen skal fremsendes til tilsynet. Undersøgelserne skal foretages mindst 1 gang for hver påbegyndt udstøbning af 250 m<sup>3</sup> beton.

##### Normal kontrolklasse

Såfremt materialerne ikke i længere tid har været i løbende produktion og derigennem vist sig egnede, udføres kontrolprøvningen i indhold som anført for skærpet kontrolklasse, dog udføres kun undersøgelse for hver påbegyndt udstøbning af 500 m<sup>3</sup> beton.

#### 5.1.4 Kontrol af vand

##### Skærpet og normal kontrolklasse

Såfremt der anvendes vandværksvand, skal kontrolprøvning normalt ikke udføres.

Såfremt der ikke anvendes vandværksvand, skal det ved løbende kontrol eftervises, at vandet ikke ændrer kvalitet. Kontrolomfanget skal aftales med tilsynet og vil være afhængig af forprøvningens resultat.

### 5.1.5 Afmåling og blanding

#### Skærpet og normal kontrolklasse

##### Byggepladsanlæg

Vægtanlæg for cement og grus samt doseringsanlæg for vand og tilsætningsstoffer kontrolleres mindst én gang for hver påbegyndt udstøbt 250 m<sup>3</sup> beton for skærpet kontrolklasse og 500 m<sup>3</sup> for normal kontrolklasse.

Nøjagtigheden af vægt- og doseringsanlæg skal svare til det i kontrolordningen for fabriksbeton angivne. Se iøvrigt afsnit 4.2.

##### Fabriksanlæg

Vægt- og doseringsanlæg skal kontrolleres i overensstemmelse med og i mindst det omfang, som kontrolordningen foreskriver.

### 5.1.6 Kontrol af frisk beton

#### 5.1.6.1 Kontrol af vand-cement forhold, cementindhold og fillerindhold

Når der er stillet krav om fremstilling af beton i aggressiv eller moderat miljøklasse, bestemmes betonens vand-cement forhold, cementindhold og fillerindhold enten ved registrering af de doserede mængder af cement, vand og grus samt måling af grusets vandindhold og fillerindhold (ved vådsigtning af sand og sten), eller hvis dette er angivet ved direkte analyse af den friske beton. Så længe der ikke eksisterer nogen dansk standard for direkte analyse af den friske betons sammensætning, kan det anbefales, at denne analyse udføres i henhold til CtO's kompendium i betontechnologi (se iøvrigt afsnit 4.4.10).

Den vandmængde, som skal indgå ved beregning og kontrol af v/c-forholdet, er den effektive vandmængde, d.v.s. den totale vandmængde fraregnet den af gruskornene absorberede vandmængde (svarende til overfladetør, vandmættet tilstand).

Ved beregning og kontrol af v/c-forholdet kan i cementmængden indregnes mængden af tilsat flyveaske og mikrosilica multipliceret med en aktivitetsfaktor på 0.5 for flyveaske og 2 for mikrosilicas vedkommende.

Ovenstående prøver udføres normalt i samme omfang, som der fremstilles cylindre til styrkeprøvning af den hærtnede beton. Det bemærkes, at kravene til vand-cement forhold, cementindhold og fillerindhold enten kan være angivet som krav til en karakteristisk værdi eller som krav til en absolut grænseværdi. Såfremt det skal eftervises, at et krav til karakteristisk værdi er opfyldt, kræves mindst tre bestemmelser for hvert kontrolafsnit.

### 5.1.6.2 Kontrol af konsistens

Betonens konsistens (sætmål eller vebegrafer) skal for alle kontrolklasser kontrolleres jævnlige. Ved indkørt produktion skal der mindst udtages en prøve pr. 25 m<sup>3</sup> udstøbt beton, dog mindst en prøve hver anden time, herunder hver gang der udtages prøvecylindre til styrkekontrol.

#### 5.1.6.3 Kontrol af luftporeindhold

For skærpet og normal kontrolklasse skal kontrolomfanget være som anført under konsistens (afsnit 5.1.6.2).

#### 5.1.6.4 Kontrol af urenheder (klorider)

Kontrolomfanget skal fremgå af de særlige arbejdsbeskrivelser. Iøvrigt bestemmes den friske betons kloridindhold i henhold til DS 423.28.

### 5.1.7 Kontrol af hærtnet betons trykstyrke i henhold til DS 411

#### 5.1.7.1 Generelt

Kravene til den hærtnede betons trykstyrke eftervises på støbte cylinderformede prøveemner med en diameter på 150 mm og en højde på 300 mm. Den friske betonprøve udtages som anført i DS 423.11. Betoncylindrene udstøbes og behandles i henhold til 423.21, og betoncylindrenes trykstyrke bestemmes i henhold til DS 423.23.

Af hver prøve udstøbes et sæt på mindst 2 prøvecylindre. Trykstyrken af hver af disse cylindre bestemmes efter 28 døgn og sættets gennemsnitsværdi beregnes. Denne gennemsnitsværdi benævnes i henhold til DS 423.1 en "observation" og anvendes i den videre statistiske vurdering.

Resultaterne registreres løbende og ordnes kronologisk i grupper på n, som forudsat ved opdelingen af konstruktionen i kontrolafsnit og ved beregning af proportioneringsstyrken (se afsnit 3.5.5). En sådan gruppe på n er en såkaldt "stikprøve" og omfatter altså et kontrolafsnit.

For pladsfremstillet betons vedkommende skal hvert kontrolafsnit omfatte mindst 4 observationer, og der skal mindst fremstilles et sæt prøvecylindre for hver 50 m<sup>3</sup> produceret beton.

For fabriksbetons vedkommende udstøbes et sæt prøvecylindre for hver påbegyndt 75 m<sup>3</sup> total produktion af programbetoner den pågældende dag. Dog skal der fra hver af produktionsprogrammets styrkeklasser og i hvert fald fra 5-30 MPa udtages mindst 4 prøver inden for en prøvningsperiode på seks måneder, dog mindst 1 prøve hver anden måned. Prøver skal udtages fra færdigt læs.

Som tidligere omtalt er det mest praktisk, hvis hvert kontrolafsnit netop omfatter n = 4 observationer.

Så snart en gruppe på n = 4, d.v.s. et kontrolafsnit, er afsluttet, beregnes dens gennemsnit,  $f_{cm}$ , og dens variationskoefficient,  $\delta_{cm}$ , som angivet i afsnit 5.1.7.5 og 5.1.7.6.

Undersøgelsen udføres enten efter princip B, hvor der udnyttes såkaldt forhåndsviden i form af en dokumenteret variationskoefficient, eller efter princip A, hvor der ikke udnyttes sådan forhåndsviden.

Det er vist i regneeksemplerne nr. 13 og 14 under afsnit 5.1.7.5 og 5.1.7.6, hvorledes styrkeeftervisningen foregår i praksis.

#### 5.1.7.2 Kontrol af betonstyrker i henhold til princip A (udokumenteret variationskoefficient)

Hvis begge følgende uligheder er opfyldt for den aktuelle gruppe, kan gruppen godkendes. I modsat fald forkastes gruppen.

For det første undersøges, om gruppens gennemsnit  $f_{cm}$  opfylder uligheden:

$$f_{cm} > f_{cg} = k_n f_{ck} \quad (3.10)$$

hvor  $f_{cm}$  = gruppens beregnede gennemsnit, i MPa

$f_{cg}$  = betonens godkendelsesstyrke, i MPa

$f_{ck}$  = betonens karakteristiske styrke = aftalt karakteristisk 28-døgns cylindertrykstyrke, i MPa

$k_n$  = k-værdi for godkendelseskriteriet for grupper på n.  $k_n$  beregnes som angivet i formel 3.11 eller 3.11a.

$$k_n = \exp\left[\left(\frac{1}{\sqrt{n}} + 2.28\right) \delta_g - 0.1875\right] \quad (3.11)$$

For n = 4 fås

$$k_{n=4} = \exp[2.78 \delta_g - 0.1875] \quad (3.11a)$$

Ved godkendelse i henhold til princip A indsættes  $\delta_g$  fra tabel 3.24 i formlerne 3.11 og 3.11a.

Tabel 3.28 angiver mindste nødvendige gruppegennemsnit,  $f_{cg}$ , for godkendelse efter princip A, når n = 4.

Tabel 3.24 Godkendelses-variationskoefficienter,  $\delta_g$ , ved anvendelse af princip A (ingen udnyttelse af forhåndsviden)

Styrkeklasse	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\delta_g$	0.22	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12

Tabel 3.28 Betons godkendelsesstyrke,  $f_{cg}$ , som funktion af betons karakteristiske styrke,  $f_{ck}$ , under forudsætning af stikprøvestørrelse n = 4 og udokumenteret variationskoefficient,  $\delta_g$  (ingen udnyttelse af forhåndsviden)

$f_{ck}$ (MPa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\delta_g$	0.22	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12
$k_{n=4}$	1.529	1.368	1.330	1.294	1.258	1.224	1.190	1.158	1.158	1.158
$f_{cg}$ (MPa)	7.7	13.7	20.0	25.9	31.5	36.8	41.7	46.4	52.2	57.9

For det andet undersøges, om gruppens beregnede variationskoefficient opfylder uligheden (5.1):

$$\delta_{cm} \leq \delta_g \quad (5.1)$$

hvor  $\delta_{cm}$  = gruppens beregnede variationskoefficient =  $s_{cm}/f_{cm}$

$s_{cm}$  = gruppens beregnede spredning

$\delta_g$  = betonens godkendelses-variationskoefficient

Ved anvendelse af princip A, hvor der ikke udnyttes såkaldt forhåndsviden, aflæses  $\delta_g$  som nævnt af tabel 3.24.

Hvis kravene til gruppens gennemsnit  $f_{cm}$  eller variationskoefficient  $\delta_{cm}$  ikke er opfyldt, forkastes gruppen, og procedurerne i afsnit 5.1.8 følges.

5.1.7.3 Kontrol af betonstyrker i henhold til princip B (dokumenteret variationskoefficient)

Hvis begge følgende uligheder 3.10 og 5.2 er opfyldt for den aktuelle gruppe kan gruppen godkendes. I modsat fald forkastes gruppen.

For det første undersøges, om gruppens gennemsnit,  $f_{cm}$ , opfylder uligheden:

$$f_{cm} > f_{cg} = k_n f_{ck} \quad (3.10)$$

hvor betydningen af  $f_{cm}$ ,  $f_{cg}$  og  $f_{ck}$  er den samme som angivet i forbindelse med formel 3.10 efter princip A, og

$k_n$  = k-værdi for godkendelseskriteriet for gennemsnit af hver enkelt gruppe på n. k-værdien afhænger af den aftalte værdi for dokumenteret variationskoefficient,  $\delta_g$ , (se afsnit 3.5.4.2).  $k_n$  beregnes i henhold til formlerne 3.11 og 3.11a, idet den aftalte værdi for dokumenteret variationskoefficient indsættes.

I tabel 5.2 er anført sammenhørende værdier af  $k_{n=4}$  og  $f_{cg}$  for forskellige værdier af  $\delta_g$ .

For det andet undersøges, om

$$\delta_{cm} \leq \alpha \delta_g \quad (5.2)$$

hvor betegnelserne for  $\delta_{cm}$  og  $\delta_g$  er som angivet i forbindelse med formel 5.1 efter princip A, d.v.s.:

$$\begin{aligned} \delta_{cm} &= \text{gruppens beregnede variationskoefficient} = s_{cm}/f_{cm} \\ \delta_g &= \text{aftalt dokumenteret variationskoefficient} \\ \alpha &= \text{kontroltal, som aflæses af tabel 5.3.} \end{aligned}$$

Tabel 5.2 Godkendelsesstyrker for grupper på n = 4

Variationskoefficient $\delta_g$	$k_{n=4}$	Karakteristisk styrke $f_{ck}$ MPa					
		5	10	15	20	25	30
		$f_{cg} = k_{n=4} \cdot f_{ck}$ MPa					
0,01	0,8524	4,262	8,524	12,786	17,048	21,310	25,572
0,02	0,8764	4,382	8,764	13,146	17,528	21,910	26,292
0,03	0,9011	4,506	9,011	13,517	18,022	22,528	27,033
0,04	0,9265	4,633	9,265	13,898	18,530	23,163	27,795
0,05	0,9527	4,764	9,527	14,291	18,153	23,818	28,581
0,06	0,9795	4,898	9,795	14,693	19,590	24,488	29,385
0,07	1,0071	5,036	10,071	15,107	20,142	25,178	30,213
0,08	1,0355	5,178	10,355	15,533	20,710	25,888	31,065
0,09	1,0647	5,324	10,647	15,971	21,294	26,618	31,941
0,10	1,0947	5,474	10,947	16,421	21,894	27,368	32,841
0,11	1,1256	5,628	11,256	16,884	22,512	28,140	33,768
0,12	1,1573	5,787	11,573	17,360	23,146	28,933	34,719
0,13	1,1899	5,950	11,899	17,849	23,798	29,748	35,697
0,14	1,2235	6,118	12,235	18,353	24,470	30,588	36,705
0,15	1,2580	6,290	12,580	18,870	25,160	31,450	37,740
0,16	1,2934	6,467	12,934	19,401	25,868	32,335	38,802
0,17	1,3299	6,650	13,299	19,949	26,598	33,248	39,897
0,18	1,3674	6,837	13,674	20,511	27,348	34,185	41,022
0,19	1,4059	7,030	14,059	21,089	28,118	35,148	42,177
0,20	1,4456	7,228	14,456	21,684	28,912	36,140	43,368
0,21	1,4863	7,432	14,863	22,295	29,726	37,158	44,589
0,22	1,5282	7,641	15,282	22,923	30,564	38,205	45,846

$$k_{n=4} = \exp(2.78 \cdot \delta_g - 0.1875) \quad (3.11a)$$

Ved brug af tabelværdierne bør  $k_{n=4}$  afrundes til 2 decimaler og  $f_{cg}$  til 1 decimal efter kommaet.

Om baggrunden for anvendelse af kontroltal  $\alpha$  ved beregning af  $\delta_g$  i henhold til princip B og fastlæggelse af  $\alpha$ -værdien kan læses nærmere i "Betonproduktion og statistik", BETON-TEKNIK, CtO 4/05/1980, side 7 og 8, af Chr. F. Justesen.

Hvis kravene til gruppens gennemsnit,  $f_{cm}$ , og variationskoefficient,  $\delta_{cm}$ , ikke er opfyldt, betragtes gruppen som forkastet, og procedurerne i afsnit 5.1.8 følges.

Tabel 5.3  $\alpha$ -værdier for godkendelseskriteriet for variationskoefficient af hver gruppe på n observationer. 1% sandsynlighed for uretrettiget forkastelse.

n	$\alpha$
4	1.94 ~ 2*
5	1.82
6	1.74
7	1.67
8	1.62
9	1.58
10	1.55
11	1.52
12	1.50
13	1.48
14	1.46
15	1.44
16	1.43
17	1.41
18	1.40
19	1.39
20	1.38
25	1.34
30	1.31
40	1.27
100	1.17

\* Dansk Fabriksbetonkontrol kræver kontroltallet  $\alpha = 2$  brugt for  $n = 4$ . Det er sandsynligt, at dette krav med tiden vil vinde indpas i bredere kredse.

5.1.7.4 Udeladelse af observationer

Ved vurdering af observationer kan man ifølge DS 423.1 kun udelade en ekstrem værdi, hvis det kan dokumenteres, at den eller de fejl, der er årsag til den tvivlsomme observation, alene hidrører fra selve prøvningsmetoden.

Er dette ikke muligt, må observationen kun udelades på grundlag af den nedenfor angivne statistiske vurdering. Såfremt en observation udelades på basis af en sådan vurdering, skal den del af kontrolafsnittet, som den pågældende observation repræsenterer, undersøges nærmere ved anden prøvning (for betontrykstyrkens vedkommende, f.eks. ved hjælp af udborede cylindre).

Det kan kun accepteres, at en enkelt observation bortkastes fra et kontrolafsnit ifølge den anførte vurdering. Den statistiske vurdering kan desuden kun benyttes for observation med kontinuert variation.

Idet den tvivlsomme (ekstreme) observation benævnes  $x_e$  og gennemsnittet henholdsvis spredningen for de øvrige observationer  $\bar{x}'$  og  $s'$ , kan observationen udelades, såfremt en af følgende uligheder er opfyldt:

$$x_e \leq \bar{x}' - g \cdot s' \quad \text{eller} \quad x_e \geq \bar{x}' + g \cdot s'$$

For faktoren g skal her anvendes de i tabel 5.3 anførte værdier, afhængig af antallet n' af observationer, hvorudfra  $\bar{x}'$  og  $s'$  er bestemt.

Tabelværdierne er her valgt således, at der højst er 1% sandsynlighed for fejlagtigt at udelade en observation, som burde være medregnet.

Tabel 5.4

n'	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
g	23,1	11,4	8,25	6,86	6,10	5,63	5,31	5,09	4,92	4,78	4,68	4,60
n'	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45	50
g	4,53	4,47	4,42	4,38	4,34	4,31	4,21	4,15	4,11	4,09	4,08	4,07

5.1.7.5 Regneeksempel nr. 13. Styrkegodkendelse af beton i henhold til princip B\*

Opgave 1. Opstilling af godkendelseskriterier for en fremtidig betonproduktion på basis af historiske data

Fra et betonværk foreligger for den forudgående 1-års periode nedenstående 44 resultater (observationer) af trykstyrken for værkets 25 MPa beton. De 44 værdier er angivet kronologisk og skrevet linie for linie med 4 resultater i hver linie, således at man har den gruppeopdeling, der skal benyttes ved udregning af dokumenteret  $\delta_g$ . Der er således 11 grupper, som vist i tabel 5.5.

Tabel 5.5 Prøveresultater fra betonproduktion over en halvårsperiode

Gruppe nr.	Prøveresultater, MPa			
1	25,7	26,7	27,5	28,5
2	24,5	25,1	31,1	30,1
3	26,8	29,1	30,5	27,6
4	29,6	30,5	27,1	27,1
5	30,5	27,4	27,6	28,2
6	28,5	27,9	30,3	29,7
7	28,2	28,8	31,3	27,9
8	29,6	31,6	28,8	29,6
9	29,9	32,3	28,2	29,1
10	32,4	29,3	29,1	31,6
11	27,4	28,5	31,6	29,1

På baggrund af ovenstående oplysninger ønskes godkendelseskriterierne for betonværkets fremtidige produktion opstillet.

I henhold til DS 411.84 findes den dokumenterede  $\delta_g$ -værdi ved at beregne stikprøvegennemsnit,  $n$ , stikprøvespredning,  $s$ , og stikprøvevariationskoefficient,  $\delta$ , for hver enkelt gruppe af de historiske data. Beregningerne fremgår af tabel 5.6.

\* Eksemplerne er hentet fra Chr. F. Justesen: "Kontrol af betons karakteristiske styrke", Cementfabrikernes Tekniske Oplysningskontor. Notat til Fabriksbetonkursus modul 4, Betonstatistikursus, 1984.

Tabel 5.6 Beregning af stikprøvegennemsnit, stikprøvespredning og stikprøvevariationskoefficient for de i tabel 5.5 angivne grupper

Gruppe nr.	Gennemsnit $m$ , MPa	Spredning $s$ , MPa	$\frac{s}{m} = \delta$	$s^2$
1	27,1	1,19	0,044	1,41
2	27,7	3,38	0,122	11,44
3	28,5	1,64	0,057	2,67
4	28,6	1,74	0,061	3,04
5	28,4	1,42	0,050	2,03
6	29,1	1,10	0,038	1,20
7	29,1	1,55	0,053	2,39
8	29,9	1,19	0,040	1,43
9	29,9	1,76	0,059	3,10
10	30,6	1,65	0,054	2,73
11	29,1	1,78	0,061	3,16
Sum	318,0 = $\bar{m}$	18,4 = $\bar{s}$	0,639	34,60

Af statistiske grunde bør enkeltgrupper, hvis  $\delta$  er større end  $2,5 \cdot \bar{s}/\bar{m}$  (beregnet), normalt udelades ved behandling af historiske data. Forklaring herpå kan læses i "Betonproduktion og statistik", BETON-TEKNIK, Cto 4/05/1980, side 7 og 8, af Chr. F. Justesen.

Den gennemsnitlige variationskoefficient for prøveresultaterne i tabel 5.5 er

$$\frac{\bar{s}}{\bar{m}} = \frac{18,4}{318,0} = 0,58$$

og tilsvarende er

$$2,5 \cdot \frac{\bar{s}}{\bar{m}} = 2,5 \times 0,058 = 0,145$$

Da ingen af de 11 variationskoefficienter,  $\delta_{cm}$ , i tabel 5.6 overstiger 0.145, bør ingen af grupperne udelades ved opstilling af godkendelseskriteriet.



Indsættes de i tabel 5.6 beregnede stikprøvespredninger og stikprøvegennemsnit i formel 3.12, fås den såkaldte dokumenterede variationskoefficient  $\delta_g$  for den historiske produktion:

$$\delta_g = \sqrt{p} \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_p^2}}{m_1 + m_2 + \dots + m_p} = \sqrt{11} \frac{\sqrt{34.6}}{318.0} = 0.061 \quad (3.12)$$

Godkendelseskriteriet for variationskoefficienten af grupper på 4 prøve-resultater fra betonværkets fremtidige produktion fås ved at indsætte

$$\delta_g = 0.061 \text{ og } \alpha = 1.94 \sim 2.0 \text{ fra tabel 5.3 i formel 5.2}$$

$$\delta_{cm} \leq \alpha \times \delta_g = 2.0 \times 0.061 = 0.122 \quad (5.2)$$

Godkendelseskriteriet for gennemsnittet inden for grupper på 4 fra betonværkets fremtidige produktion fås ved at indsætte  $f_{ck} = 25$  MPa og  $k_{n=4} = 0.982$  i formel 3.10,

$$f_{cm} > f_{cg} = k_{n=4} \times f_{ck} = 0.982 \times 25 = 24.6 \text{ MPa} \quad (3.10)$$

hvor  $k_{n=4}$  udregnes på grundlag af formel 3.11a

$$k_{n=4} = \exp(2.78 \times \delta_g - 0.1875) = \exp(2.78 \times 0.061 - 0.1875) = 0.982 \quad (3.11a)$$

Opgave 2. Kontrol af en senere betonproduktion

For det betonværk, der i opgave 1 har dokumenteret variationskoefficienten  $\delta_g = 0.061$  for sin 25 MPa beton foreligger for en efterfølgende kontrolperiode følgende resultater, angivet gruppevis i grupper på 4.

Tabel 5.7 Prøveresultater fra en aktuel betonproduktion

Gruppe nr.	Prøveresultater, MPa			
1	24.5	23.9	26.3	25.7
2	23.6	26.0	23.8	24.6
3	23.6	24.2	29.1	30.2
4	28.1	30.3	29.8	27.3
5	28.5	29.1	30.6	27.5

På baggrund af disse oplysninger ønskes det undersøgt, om disse 5 grupper kan godkendes i henhold til de i opgave 1 opstillede godkendelseskriterier, d.v.s. når kontroltallet for  $f_{cm}$  er 24.6 MPa og kontroltallet for  $\delta_{cm}$  er 0.122.

For de 5 grupper udregnes stikprøvegennemsnit, stikprøvespredning og stikprøvevariationskoefficient, som vist i tabel 5.8.

Tabel 5.8 Beregning af stikprøvegennemsnit, stikprøvespredning og stikprøvevariationskoefficient for de i tabel 5.7 angivne grupper

Gruppe nr.	Gennemsnit $f_{cm}$ MPa	Spredning $s_{cm}$ MPa	Variationskoefficient $\delta_{cm} = \frac{s_{cm}}{f_{cm}}$
1	25.1	1.10	0.044
2	24.5	1.09	0.044
3	26.8	3.36	0.125
4	28.9	1.41	0.049
5	28.9	1.30	0.045

Det fremgår, at grupperne 1, 4 og 5 umiddelbart kan godkendes, medens gruppe 2 forkastes, fordi  $f_{cm} = 24.5$  MPa ligger under  $f_{cg} = 24.6$  MPa. I gruppe 3 er gennemsnittet på  $f_{cm} = 26.8$  MPa i orden, men gruppen forkastes alligevel, fordi variationskoefficienten  $\delta_{cm}$  på 0.125 er højere end  $\delta_{cg} = 0.122$ .

Nærmere undersøgelser er derfor nødvendige, før grupperne 2 og 3 eventuelt vil kunne godkendes.

5.1.7.6 Regneeksempel nr. 14. Styrkegodkendelse af beton i henhold til princip A

For et betonværk, der for en 20 MPa beton ikke har haft resultater nok i det forløbne år til at kunne dokumentere sin variationskoefficient, foreligger fra en kontrolperiode følgende 12 resultater angivet i kronologisk rækkefølge i MPa, som det fremgår af tabel 5.9.

Tabel 5.9 Prøveresultater fra en aktuel betonproduktion

Gruppe nr.	Prøveresultater, MPa			
1	23.1	24.6	27.2	25.4
2	26.1	24.2	27.5	24.6
3	27.5	24.4	24.6	25.1

Det ønskes undersøgt, om betonen i kontrolperioden kan godkendes efter princip A.

Der er 3 grupper af 4 i den anførte kontrolperiode. Stikprøvegennemsnit, stikprøvespredning og stikprøvevariationskoefficient fremgår af tabel 5.10.

Tabel 5.10 Beregning af stikprøvegennemsnit, stikprøvespredning og stikprøvevariationskoefficient for de i tabel 5.9 angivne grupper

Gruppe nr.	Gennemsnit $f_{cm}$ MPa	Spredning $s_{cm}$ MPa	Variationskoefficient $\frac{s_{cm}}{f_{cm}} = \delta_{cm}$
1	25.1	1.71	0.068
2	25.6	1.51	0.059
3	25.4	1.43	0.056

I henhold til tabel 3.24 er  $\delta_g = 0.16$  for beton med en karakteristisk styrke på 20 MPa, når der ikke foreligger anden dokumentation. For  $f_{ck} = 20$  MPa og  $\delta_g = 0.16$  fremgår det af tabel 5.2, at grupper på 4 kun kan godkendes, hvis  $f_{cm} \geq 25.9$  MPa. Da dette ikke er tilfældet for nogen af de tre grupper, forkastes de alle i første omgang, selv om  $\delta_{cm}$ -værdierne er i orden.

Normen tillader imidlertid, at der udvides til grupper på flere end 4. Betragtes resultaterne som en gruppe på 12, fås:

$$f_{cm12} = 25.4 \text{ MPa}, s_{cm12} = 1.42 \text{ MPa} \text{ og } \delta_{cm12} = 0.056$$

For grupper på 12 fås godkendelsesstyrken af formel 3.10a og 3.11:

$$f_{cg12} = f_{ck} \cdot k_{12} = 20 \cdot \exp\left[\left(\frac{1}{\sqrt{12}} + 2.28\right) \cdot 0.16 - 0.1875\right] = 25.0 \text{ MPa}$$

Da  $f_{cm12} = 25.4$  MPa, fås af formel 3.10

$$f_{cm12} = 25.4 \text{ MPa} > f_{cg12} = 25.0 \text{ MPa}$$

Da  $\delta_{cm12}$  samtidig er i orden, kan den sammenlagte gruppe på  $n = 12$  betragtes som værende godkendt.

#### 5.1.8 Procedurer i tilfælde, hvor betonen ikke opfylder normens krav

Hvis kravene til et kontrolafsnits gennemsnit  $f_{cm}$  eller variationskoefficienten  $\delta_{cm}$  ikke er opfyldt i henhold til princip A eller B i afsnit 5.1.7.2 og 5.1.7.3, betragtes kontrolafsnittet som forkastet, og der skal træffes følgende foranstaltninger.

- 1) Nødvendige indgreb i proces og betonrecepter skal umiddelbart gennemføres og foretagne indgreb skal registreres i journalen.
- 2) Prøvningshyppigheden i den aktuelle styrkeklasse forøges til mindst det dobbelte. Forøgelsen af prøvningshyppigheden skal fastholdes, indtil der foreligger en ny gruppe på  $n = 4$ , der opfylder godkendelseskriterierne.
- 3) Det skal vurderes, hvilke dele af betonleverancerne i det fejlbehæftede kontrolafsnit der kan medføre væsentlig risiko for uacceptabel forringelse af sikkerhed i betonkonstruktionen, og der skal træffes foranstaltninger til at sikre sådanne dele den fornødne sikkerhed.

ad 1. Før man kan foretage de nødvendige indgreb i proces og betonrecepter, må man imidlertid finde årsagen til, at betonen er underlødig. Denne kan ligge i råmaterialerne, udrustningen, prøvningsprocedurerne eller i proportionering og prøveblanding.

Man må først undersøge, om årsagen til, at styrkekravet ikke er opfyldt, skulle være, at den målte middelstyrke for den fremstillede beton er signifikant lavere end den middelstyrke, der blev opnået under forprøvningen. Hvis dette er tilfældet, må betonens vand-cement forhold justeres nedad, som illustreret i afsnit 4.4.4.4. Dette vil normalt ske ved at øge betonens cementindhold, medens vandindholdet bibeholdes uændret.

Hvis den målte middelstyrke ikke er lavere end den middelstyrke, der blev opnået under forprøvningen, så må betonens spredning være skønnet for lavt. Hvis dette er tilfældet, er produktionen ikke under så omhyggelig kontrol, som man oprindeligt havde antaget. Betonen må da omproportioneres på grundlag af en ny proportioneringsstyrke, der beregnes på basis af den målte værdi for spredningen.

Sideløbende med omproportioneringen af betonen må årsagerne findes til den lave middelstyrke eller den høje spredning, og fejlene må rettes. Ved denne fejlsøgning kan man f.eks. følge de retningslinier, der er angivet i tabel 5.11, som er hentet fra CtO's kompendium i betontechnologi.

ad 3. Figur 5.1 giver retningslinier for lokalisering og undersøgelse af den underlødige beton i den færdige konstruktion og for vurdering af, hvad det betyder, at betonen ikke opfylder styrkekravet. Figur 5.1 giver også retningslinier, på grundlag af hvilke man kan træffe afgørelse om, hvad der videre skal ske med den underlødige beton. Figur 5.1 er hentet fra European Concrete Committee, Bulletin No. 110, May 1975.

Hvis det viser sig, at betonens manglende styrke er af afgørende betydning for konstruktionens sikkerhed og holdbarhed, må den underlødige beton lokaliseres, og dens virkelige styrke i konstruktionen må bestemmes. På grundlag af entreprenørens journal, suppleret med ikke-destruktiv prøvning, vil det som regel være muligt at lokalisere konstruktionselementer, der er støbt på de tidspunkter, da styrkerne har været særligt lave. Derefter vil bestemmelsen af den virkelige styrke hos betonen i disse konstruktionselementer som regel ske ved udboring af cylindre i henhold til DS 423.22. Hvis entreprenøren på grundlag af resultater fra prøvning af udborede cylindre kan eftervise, at betonen i konstruktionen har en karakteristisk styrke på mindst 80% af den for de støbte prøvelegemer forlangte karakteristiske styrke, godkendes konstruktionsafsnittet i henhold til DS 411. Hvis entreprenøren ikke kan påvise dette, må man undersøge mulighederne for at forstærke konstruktionen eller at reducere belastningen. Eventuelt må der foretages en prøvebelastning af konstruktionen.

Af praktiske grunde vil man kun i yderste nødstilfælde skride til at nedrive betonen. Derimod vil en underkendelse af et kontrolafsnit som regel medføre en bod for entreprenøren af en størrelse, der bør være aftalt på forhånd. For eksempel kan man reducere entreprenørens betaling for kontrolafsnittet som helhed med 2% for hver procent, betonens beregnede karakteristiske styrke ligger under den krævede karakteristiske styrke.

I det følgende skal gennemgås en række metoder til undersøgelse af betonens kvalitet i færdige konstruktioner.

Tabel 5.11 Fejlfinding ved en betonproduktion i henhold til CtO's kompendium i betontechnologi

Nr.	Målt egenskab	Prøvemethode	Fejlfinding
1	Beton, bearbejdelighed	Sætmål	Vandur/tank omstilles. Viser ændringen, at resultatet ikke er i overensstemmelse med forskrift og proportionering, undersøges gruset (kornkurve) og afmåling af grus. (Evt. ændres proportionering.)
2		Vebe	
3	Beton, vandindhold	Aflæsning af vandtank + beregning af fugt i grus	Ved uoverensstemmelse mellem 3, 4 eller 5 undersøges vanddosering og afmåling af grus
4		Pyknometer	
5		Udtørring	
6	Beton, luftindhold	Specialapparat	Undersøgelse og justering af apparatur til prøvning af luftindhold
7		Pyknometer	
8		Rumvægt af frisk beton	
9	Beton, rumvægt af frisk beton	Afvejning i kendt målekar	Undersøg om 6 og 7 er i orden. Undersøg om resultatet stemmer med proportionering. Kontroller kornvægtfylden 21.
10	Sand, fugtighed	Pyknometer	Vægt omstilles Proportionering korrigeres.
11		Udtørring	
12		Karbidapparat	

Nr.	Målt egenskab	Prøvemethode	Fejlfinding
13	Betonstyrke	Trykprøvning af cylindre	Kontroller blandingsforhold og lagring. Planhed på prøvelegemer. Justering af trykprøveapparat. Evt. prøveanstalt
14		Spalteprøvning af cylindre	
15		Bøjeprøvning af bjælker	
16	Beton, frisk (cementindhold)	Udvaskning	Justering af vægtindstilling og vægte. Kontroller grusets fillerindhold. 32. Evt. ny proportionering.
17	Beton, frisk (v/c)	Udvaskning	
18	Beton, frisk (blandingsforhold, kornkurver)	Udvaskning	
19	Grus, kornkurve	Sigtning	Kan være årsag til ændringer i bearbejdelighed og vandbehov. Evt. ny proportionering. Kontroller sigteduge.
20	Grus, humusindhold	Natriumhydroxid-prøve	Pludseligt fald i styrker. Betonens afbinding og hårdning retarderes. Gruset kasseres - bruges evt. med øget cementindhold. Udfør prøvestøbning.
21	Grus, kornvægtfylde	Pyknometer	Kan være årsag til ændringer - 9.
22	Sten, fugtighed	Pyknometer	Får betydning ved 3.
23		Udtørring	
24	Beton, hårdnet rumvægt	Pyknometer	Kan være forklaring til 13, 14 og 15. Evt. dårlig udstøbning.
25		Opmåling og vejning	
26	Beton, vandudskillelse	Opsamling af overfladevand	Evt. ændres blandingsforhold (grussammensætning)
27	Grus, lerindhold	Bundfældning	Udfør prøvestøbning. Kan bevirke ændringer i bearbejdelighed og dårlig vedhæftning. Evt. kassering af grus.
28		Opslemning	
29		Udvaskning	
30	Grus, kalk og øvrige porøse korn	Sortering	Evt. petrografisk analyse.
31		Udvaskning med saltsyre	
32	Grus, fillerindhold	Vådsigtning	Kan ændre bearbejdeligheden. Bruges ved 16, 17 og 18.
33	Grus, kornform og overflade	Sortering	Evt. petrografisk analyse kan forklare ændring i bearbejdelighed.

Nr.	Målt egenskab	Prøvemethode	Fejlfinding
34	Grus, absorberet vand	Udtørring til overfladetør tilstand	Har betydning ved porøse grusmaterialer og bestemmelse af effektivt v/c.
35	Vand, urenheder	Laboratorieundersøgelse	Evt. prøvestøbning. Evt. kemisk analyse. Evt. kassering
36	Vand, afmåling	Kontrolmåling	Justering. Evt. kassering af ur.
37	Grus, dosering vægt eller volumen	Kontrolmåling	Kan være årsag til ændringer i udbytte m.v. Justering. Evt. kassering.
38	Blandemaskine blandeevne (ensartethed)	16, 17 og 18 samt 32	Evt. kassering af blandeskovle måske blander.
39	Luftindblandingsstof, afmåling	Kontrolmåling	Justering. Evt. ny afmålingsmetode.
40	Luftindblandingsstof, kvalitet	Laboratorieundersøgelse	Evt. kassering.
41	Cement, normstyrke	Prøveanstalt	Kan evt. forklare ændringer i styrkerne

### 5.1.9 Vurdering af betonens kvalitet i færdige konstruktioner

De to mest almindelige ikke-destruktive prøvemethoder til vurdering af betonens kvalitet i færdige konstruktioner er måling af lyd hastigheden i betonen med ultralyd og måling af betonoverfladens hårdhed med en slaghammer. Ingen af disse to metoder egner sig imidlertid til bestemmelse af betonens absolutte styrke. De er derimod velegnede til at afgøre, om betonens styrke i et tvivlsomt konstruktionselement virkelig afviger fra betonstyrken i et lignende konstruktionselement af godkendt kvalitet. Lok-testen og Capotesten er bedre egnet til at bestemme betonens virkelige styrke i konstruktionen end prøvning med ultralyd eller slaghammer.

#### 5.1.9.1 Prøvning med ultralyd

Ultralydprøvning kan give en vis opfattelse om betonens styrkeniveau. Prøvning med ultralyd af hårdnet beton med ukendt sammensætning og forhistorie er dog behæftet med så stor en usikkerhed, at pålidelige styrkeresultater sjældent kan opnås. Metoden, som iøvrigt er standardiseret i DS 423.23, kan derfor ikke umiddelbart anbefales.

### 5.1.9.2 Prøvning med slaghammer

Slaghammeren, eller den såkaldte Schmidthammer, kan anbefales som et bekvemt, omend ikke særlig nøjagtigt instrument til registrering af varierende betonkvalitet i et bygværk. Hammeren kan derfor bruges til at lokalisere placering af underlødige beton i en færdig konstruktion. Hammerens stempel trykkes mod betonoverfladen. Når en indre fjeder er blevet sammentrykket et bestemt stykke, udløser den en ståklods, som slynges mod stemplet. Herved overføres et slag til konstruktionsdelen, som giver ståklodsen et tilbageslag. Dette tilbageslag afhænger af betonens elasticitetskoefficient, indre dæmpning og fugtindhold, samt af konstruktionsdelens stivhed. Tilbageslaget aflæses på en skala og kan anvendes til vurdering af styrken. Jo højere tilbageslagstallet er, desto højere vil betonens styrke være. Metoden er standardiseret i DS 423.30.

Uden kalibrering kan hammeren bruges til at lokalisere underlødige beton i en færdig konstruktion. Konstruktionens overflade inddeles i et netværk med større eller mindre maskevidde, og der foretages 10-15 aflæsninger omkring hvert knudepunkt i netværket. Gennemsnitsværdien af disse aflæsninger benyttes som et mål på betonens kvalitet på dette bestemte sted i konstruktionen. Såfremt der forekommer systematiske afvigelser i betonkvaliteten gennem bygværket, vil dette afsløres ved indtegnning af niveaukurver for tilbageslagsværdierne. På grundlag af sådanne niveaukurver kan man derefter lokalisere områder i konstruktionen, hvor betonen må formodes at have særlig lav styrke. Det vil være naturligt at koncentrere sig om disse områder ved eventuel senere udboing af cylindre fra konstruktionen.

Hvis man ønsker at vurdere betonens absolutte trykstyrke i konstruktionen, må hammeren kalibreres på prøvelegemer, der fremstilles af samme beton, som bruges i konstruktionen. Denne kalibrering kan passende foregå på prøvecylindre fra de oprindelige prøveblandinger, der måtte være fremstillet med forskellige vand-cement forhold. Hvis der foretages aflæsninger af tilbageslagstallene efter 3 døgn, 14 døgn, 28 døgn og 91 døgn på prøvelegemer fra fire prøveblandinger med forskellige vand-cement forhold, kan der fastlægges en kalibreringskurve for slaghammeren. På grundlag af sådanne kurver kan man ved brug af hammeren bestemme betonstyrken i den færdige konstruktion med en nøjagtighed på  $\pm 15\%$ . Sådanne kalibreringskurver kan bruges, ikke blot ved godkendelsesprøvning, men også når entreprenøren under den løbende produktion skal godtgøre, at konstruktionen har

den fornødne styrke til afformning af bærende forme, belastning af konstruktionsdele udført ved støbning i koldt vejr, eller opspænding af kabelbeton henholdsvis kapning af strengbetontråde. For at prøvecylindrene skal få den fornødne støtte og stivhed, kan det ved kalibrering af slaghammeren anbefales at anbringe prøvecylindrene i prøvemaskinen og fastholde dem med en belastning på ca. 15% af betonens skønnede trykstyrke, inden der foretages aflæsninger af tilbageslagstallet.

Ved vurdering af slaghammeraflæsninger skal man være opmærksom på, at tilbageslagstallene er højere for massiv beton end for tynde elementer, højere for indspændte end for frie prøveemner, højere for flade end for konvekse overflader, højere for tørre overflader end for våde overflader og højere for vandret stilling af hammeren ved prøvning af en lodret overflade (f.eks. en væg) end for prøvning lodret nedad mod en vandret overflade (f.eks. et gulv), men lavere end ved prøvning opad mod en vandret overflade (f.eks. et loft).

### 5.1.9.3 Prøvning ved lok-test og capo-test

Afformning af bærende forme, belastning af konstruktionsdele udført ved støbning i koldt vejr, samt opspænding af kabelbeton henholdsvis kapning af strengbetontråde, må først finde sted, når entreprenøren har godtgjort, at konstruktionen har den fornødne styrke.

Denne eftervisning kan f.eks. ske ved prøvning af i forvejen indstøbte "lok-test" bolte. En prøvebolt placeres inden støbningen i formen på de steder, hvor styrken ønskes målt. På prøvningstidspunktet skrues boltens skaft ud, en trækstang fra en donkraft skrues ind i stedet, og boltens trækstyrke ud. Udtrækningskraften er et mål for betonens styrke. Der er påvist en god korrelation mellem lok-styrkemålinger og styrken af støbte cylindre som vist i figur 5.2.

Metoden kan anvendes ikke-destruktivt, hvis man kun ønsker oplyst, om betonkvaliteten er tilstrækkelig til et bestemt formål. I så fald kan man nøjes med at belaste boltene op til den til den krævede karakteristiske værdi svarende belastning. Holder de første 14 tilfældigt valgte bolte til dette, er betonen i orden.

Capo-testen (cut and pull out) er en videreudvikling af lok-testen. Her bores hullerne og boltene indsættes, efter betonen er hærnet. Iøvrigt foregår prøvningen på samme måde som for lok-testens vedkommende. Metoden er standardiseret i DS 423.31.

#### 5.1.9.4 Prøvning af udborede cylindre

Det kræver medvirken af en ekspert at udvælge sådanne steder i en konstruktion, hvor der kan udbores cylindre uden at forringe konstruktionens bæreevne. Ligeledes kræver det betydelig erfaring at vurdere resultaterne fra styrkeprøvning af udborede cylindre. Metoder til udboring og behandling af cylindre til styrkebestemmelse er standardiseret i DS 423.22.

En diskussion af problemerne i forbindelse med vurdering af sådanne resultater ligger uden for rammerne af dette kompendium. Der skal i stedet henvises til publikationen "Concrete Core Testing for Strength", Concrete Society. Technical Report No. 11, London, May 1976.

#### 5.1.9.5 Prøvebelastning af konstruktioner

Hvis der stadig hersker tvivl om en betonkonstruktions eller en konstruktionsdels bæreevne, efter at der er udført ikke-destruktiv prøvning og prøvning af udborede cylindre, kan der foreskrives en prøvebelastning af konstruktionen som helhed, eller af den pågældende konstruktionsdel. En diskussion af fremgangsmåden ved prøvebelastninger ligger uden for rammerne af dette kompendium. Det skal dog bemærkes, at prøvebelastning altid kræver medvirken af en ekspert.

Resultatet af en prøvebelastning vurderes i henhold til DS 411 efter følgende retningslinier.

Ved prøvebelastningen bør det eftervises, at bæreevnen er tilstrækkelig stor i den for de undersøgte snit farligste stilling af belastningen.

Prøvebelastningen sættes for konstruktioner i lav sikkerhedsklasse lig med de regningsmæssige belastninger. For konstruktioner i normal og høj sikkerhedsklasse multipliceres med henholdsvis 1.1 og 1.2.

Den maksimale belastning bør virke på konstruktionen mindst et døgn. For at resultatet af belastningsprøven kan anses for tilfredsstillende, bør det kræves af belastningsprøven:

- 1) at konstruktionen ikke har lidt væsentlig skade
- 2) at der i den sidste trediedel af tidsrummet med maksimal belastning kun har vist sig ubetydelige tilvækster i deformationerne, samt
- 3) at konstruktionens blivende udbøjninger efter aflastning højst udgør 25 procent af de tilsvarende målte totale udbøjninger ved maksimal belastning.

Når særlige omstændigheder begrundet det, kan der stilles supplerende krav f.eks. vedrørende grænser for tøjninger i visse kritiske tværsnit.

Prøvetidspunktet bør normalt tidligst være 45 døgn efter støbningens afslutning.

#### 5.1.10 Kontrol af hærningens tidsforløb

For betonarbejde i samtlige kontrolklasser gælder, at afformning af bærende forme, belastning af konstruktionsdele udført ved støbning i koldt vejr, samt opspænding af kabelbeton henholdsvis kapning af strengbetontråde, først må finde sted, når entreprenøren har godtgjort, at konstruktionen har den fornødne styrke.

Eftervisningen kan eventuelt ske ved konstant registrering af betonens temperaturforløb med påfølgende beregning af betonens modenhed. En diskussion af denne metode ligger uden for rammerne af kompendiet.

Eftervisning kan også ske, enten ved prøvning af mindst 6 støbte prøveemner udtaget fra et kontrolafsnit og lagret på konstruktionen under samme forhold som denne, eller ved prøvning i den færdige konstruktion, for eksempel ved prøvning af i forvejen indstøbte "lok-test" bolte som omtalt i afsnit 5.1.9.3. I sidstnævnte tilfælde skal prøvemethode og prøveomfang godkendes af tilsynet. Med hensyn til kontrol af hærningens tidsforløb henvises iøvrigt til afsnit 6.14.2 og 6.14.3.



### 5.1.11 Kontrol med udstøbning og efterbehandling

For betonarbejde i skærpet og normal kontrolklasse skal entreprenøren føre en journal, der angiver alle for udstøbningen og efterbehandlingen relevante forhold såsom:

- 1) Metode for betonens tilbringning til formen
- 2) Komprimeringsmateriellets art og type
- 3) Tidspunktet for støbningens påbegyndelse og afslutning
- 4) Støbetakten
- 5) Afbrydelser og forstyrrelser under støbningen
- 6) Vejrliget under udstøbningen (nedbør, vind, lufttemperatur)
- 7) Overfladebearbejdningens art
- 8) Placering i konstruktionen af den beton, af hvilken der er udtaget prøver
- 9) Temperaturforhold i beton og luft i hærdningsperioden, herunder den friske betons temperatur
- 10) Temperaturdifferencer i betonen
- 11) Afformningstidspunkter
- 12) Besigtigelse af overflader, herunder angivelse af placering af eventuelle støbefejl, samt metode for disses afhjælpning
- 13) Efterbehandlingens art og varighed (ved vinterstøbning endvidere vinterforanstaltningernes art og omfang)
- 14) Kontrol af opspænding og injicering af kanaler
- 15) Eventuelle prøvebelastninger

I journalen skal det endvidere noteres, på hvilket tidspunkt og af hvem inspektioner er udført. Journalen skal opbevares til brug ved eventuelt senere eftersyn.

Ved anvendelse af fabriksbeton skal der med hvert læs beton følge en følgeseddel med angivelse af betonkvalitet, rekvirent, vognnummer samt tidspunkt for vognens fyldning. Entreprenøren skal kontrollere, at følgesedlen er i overensstemmelse med bestillingen, og derefter opbevare følgesedlen. Entreprenøren skal i journalen notere transportvognens type, betonens indbygnings-tidspunkt samt beregne og notere transporttiden.

### 5.2 Proceskontrol

Proceskontrol er den kontrol, som entreprenøren eller betonfabrikken må udføre for at kunne styre betonproduktionen på en teknisk og økonomisk forsvarlig måde.

Data, som indsamles ved den rutinemæssige kvalitetskontrol, der kræves af DS 411, bruges primært af tilsynet til at afgøre, om betonen inden for hvert enkelt kontrolafsnit har den styrke, som kræves for godkendelse ifølge DS 411.

Ifølge DS 423.1 har man kun ret til at ændre kontrolafsnittets størrelse, hvis der under arbejdets gang opstår begrundet formodning om, at der, ud over hvad der svarer til sædvanlige tilfældige variationer, sker væsentlige ændringer i materialeegenskaber eller produktionsbetingelser, som er forudsat holdt konstant.

DS 423.1 må tolkes således, at tilsynet ingen ret har til at gribe ind i den udførendes interne styring af betonproduktionen, så længe der ikke skiftes cement eller tilslagsmaterialer, og så længe entreprenøren benytter samme produktionsudstyr.

Det er den udførendes opgave og ansvar at styre betonproduktionen således, at hvert kontrolafsnit godkendes, når de aftalte resultater foreligger. Det står den udførende frit for at justere betonsammensætningen inden for rimelige grænser under arbejdets gang, således at der inden for de økonomiske rammer er størst mulig sandsynlighed for, at hvert afsnit godkendes som en helhed. Entreprenøren har dog pligt til at meddele tilsynet, når han foretager væsentlige ændringer i betonsammensætningen.

Det er muligt for entreprenøren at styre betonproduktionen på grundlag af styrkeresultater, som opnås efter 1 døgn eller endnu kortere tids accelereret hærdning under omhyggeligt kontrollerede forhold. En nærmere behandling af problemer i forbindelse med statistisk kvalitetsstyring af en betonproduktion ligger imidlertid uden for rammerne af dette kompendium. Der henvises i stedet til C. Justesen, "Betonproduktion og statistik", Beton-Teknik, CtO, 4/05/1980.

## 6. BETONARBEJDETS UDFØRELSE

Udførelse af stærke og holdbare betonkonstruktioner er ikke alene et spørgsmål om valg af delmaterialer og hensigtsmæssig proportionering af betonen. Betonarbejdets udførelse og betonens efterbehandling og beskyttelse efter udstøbningen har stor betydning for den opnåede kvalitet.

I det følgende anføres nogle generelle regler for betonarbejdets udførelse i henhold til Vejdirektoratets almindelige arbejdsbeskrivelser for betonbroer.

### 6.1 Materialernes levering og opbevaring

Såfremt cement- og gruslageret ved blandedanlægget ikke dækker hele den planlagte støbning, skal entreprenøren dokumentere, at fornødne leverancer er sikret.

Grusmaterialerne skal opbevares helt adskilte på en sådan måde, at sammenblanding af de enkelte fraktioner og forurening fra underlaget undgås.

Forskellige cementtyper og forskellige tilsætningsstoffer skal opbevares, således at forvekslinger undgås.

Cementen skal opbevares tørt i lukket, tæt silo eller skur.

Lagringstiden på arbejdspladsen skal være så kort som mulig.

Tilsætningsstoffer skal opbevares i henhold til leverandørens anvisninger.

### 6.2 Støbeskel

Et støbeskel er en grænseflade, som opstår, når betonstøbningen afbrydes og genoptages, efter at den først udstøbte beton er hærnet.

Støbeskel skal placeres, udformes og udføres således, at konstruktionens bæreevne og holdbarhed svarer til forudsætningerne. Ved pauser i støbearbejdet opstår midlertidige støbeskel. Pauserne må ikke være så lange, at betonen i sådanne midlertidige støbeskel begynder at binde af. Efter pauser i støbearbejdet arbejdes gammel og ny beton så godt sammen, at det midlertidige støbeskel ophæves.

Støbeskel skal placeres som angivet på tegningerne.

I almindelighed må andre støbeskel ikke indlægges. Såfremt entreprenøren ønsker at foreslå ændring af de projekterede støbeskel, skal detaljeret forslag hertil (forskallings- og støbeplan) i god tid fremsendes til tilsynets godkendelse.

Inden der på ny skal støbes mod et støbeskel, skal der drages omsorg for, at den sidst udstøbte beton er kompakt og stærk. Al løs og porøs beton samt cementslam skal omhyggeligt fjernes ved sandblæsning eller behugning og stålborstning, og overfladen renses ved spuling med trykvand. Det sidste døgn før støbningen genoptages, skal betonoverfladen gennemvædes gentagne gange, således at den ved støbningens genoptagelse er gennemvædet, men overfladetør. Ved vandrette støbeskel skal støbningen genoptages ved udstøbning af et ca. 0.1 m tykt lag af særlig mørtelrig beton, der indarbejdes i den umiddelbart derefter udstøbte beton.

Lodrette støbeskel skal altid udføres mod begrænsning. Ved støbning mod afbunden beton skal denne betonoverflade inden påstøbning af ny beton renses og vandmættes.

### 6.3 Støbeprogram

Forud for hver større støbning skal entreprenøren udarbejde et komplet støbeprogram med bemandings- og materialeoversigt samt redegørelse vedrørende reservekapacitet for materialer og materiel og planlagt kontrolprogram.

Støbeprogrammet skal fremsendes til tilsynet.

Vedrørende særlige vejrligsforanstaltninger se afsnit 6.14.

### 6.4 Materiel

Før en støbning påbegyndes, skal entreprenøren over for tilsynet godtgøre, at han disponerer over det nødvendige klargjorte reservemateriel til blanding, transport, udstøbning og bearbejdning af betonen, således at en påbegyndt støbning med sikkerhed kan udføres kontinuert og fuldføres inden for det forudsatte støbeafsnit.



Ingen støbning må påbegyndes, før entreprenørens dispositioner er forelagt tilsynet, og dette har afgivet eventuelle kommentarer.

#### 6.5 Klargøring af form og armering

Støbeform og stilladser skal være så stive, at kvalitetskravene til geometri og udseende kan overholdes.

Hvor formclampsjern anvendes i synlige flader, skal de anbringes i et regelmæssigt mønster, der på forhånd skal godkendes af tilsynet.

Forme for bjælker og plader udføres med overhøjder efter aftale med tilsynet.

Alt forskallings- og armeringsarbejde skal være færdigt, synet og godkendt af tilsynet, inden støbningen påbegyndes. Forankringer ved støbeskel skal efterstrammes. Formen skal være helt tæt og rensed fuldstændigt for snavs, spåner, træklodser, bindetråd m.v. Forskallingen skal være grundigt gennemvandet, hvortil kun må anvendes vand af kvalitet som støbevand. Der skal afsættes de fornødne spulehuller, som lukkes inden støbningen.

For fundamenter m.v. gælder tillige, at formen skal lenses, så støbningen foregår tørt.

#### 6.6 Afmåling af delmaterialer

Cementen skal afvejes direkte eller tilsættes i hele sække.

Sand og sten skal afvejes direkte på vægt.

Vandet skal doseres efter volumen eller vægt. Gennemstrømsvandmåler må ikke benyttes.

Tilsætningsstoffer skal tilsættes ved doseringsapparat, eller tilsættes manuelt i fortyndet tilstand. Det skal sikres, f.eks. ved omrøring, at koncentrationen af tilsætningsstoffet er konstant.

#### 6.7 Blanding

Såfremt betonen ikke er blandet tilstrækkeligt effektivt, kan fordelingen af cement, flyveaske, mikrosilica og tilsætningsstoffer være uensartet. Dette medfører bl.a. vanskeligheder med at styre luftindblandingen, og det giver ekstra problemer, såfremt betonen skal udsættes for lang transport, pumpning og kraftig bearbejdning.

Blandetiden skal for fritfaldsblandere være min. 90 sekunder og for tvangs-blandere min. 60 sekunder. For beton med cementindhold større end 350 kg pr. m<sup>3</sup> og beton med tilsat flyveaske skal disse blandetider dog forøges.

Blandetiden skal meddeles tilsynet.

#### 6.8 Transport

Egenskaberne hos en frisk beton ændrer sig under transport. Især konstateres tab af bearbejdelighed og luftindhold. Disse problemer kan formindskes gennem valg af stabile betonsammensætninger og ved valg af egnede tilsætningsstoffer. Beton, som proportioneres i henhold til de principper, der er angivet i dette kompendium, vil opnå størst mulige stabilitet, uden at der træffes yderligere forholdsregler.

Tilbringningstiden må ikke være længere end, at betonen med sikkerhed kan være endeligt indbygget i formen, inden afbindingen begynder, hvilket primært afhænger af cementtype og temperatur.

Tilbringningstiden fra transportvognens fyldning til betonens endelige indbygning må således normalt maksimalt ved anvendelse af trugvogn være 45 min. og ved anvendelse af rotervogn 90 min. for koldblandet beton og 75 min. for varm beton til vinterstøbning.

Iøvrigt skal tilbringningstiden afpasses efter forholdene, og entreprenøren skal følge tilsynets eventuelle krav om ændret fremgangsmåde, hvor dette skønnes nødvendigt under de aktuelle forhold.

Under transporten skal betonen beskyttes mod regn, sne, udtørring og kulde.

### 6.9 Udstøbning, komprimering og afformning

Udstøbning og komprimering af beton skal ske på en sådan måde, at betonen danner en ensartet, tæt masse, der overalt omslutter eventuel armering og helt udfylder formen.

Betonen skal også være så stabil, at den ikke separerer under udstøbningen, der omfatter placering, komprimering og afretning.

Et hyppigt forekommende problem er stenseparation, som kan opstå enten ved selve udstøbningen eller under komprimeringen. Stenseparation ses især ved kraftig overfladekomprimering eller -afretning af betonen. Stenseparation undgås ved højt stenindhold, graderet stenkornkurve og beskeden overfladekomprimering. Se iøvrigt afsnit 4.4.8.

Et andet almindeligt problem er vandseparation (bleeding), hvor vandet kort tid efter udstøbningen ses som en vandfilm på betonoverfladen. Vandseparationen kan også forekomme inde i betonen, hvor der dannes vandhinder på tilslagskornene og vandlommer under disse, især under stenene. Vandseparation kan skyldes et uheldigt samspil mellem cementtype, vand-cement forhold, fillerindhold, fillertype, sandskornkurven, sandets kornform, tilsætningsstofferne o.s.v. Se iøvrigt afsnit 4.4.7.

Beton, som proportioneres i henhold til de principper, der er angivet i dette kompendium, vil opnå størst mulig stabilitet og mindst mulig vandseparation, uden at der træffes yderligere forholdsregler.

Betonens konsistens (bearbejdighed) skal vælges ud fra konstruktionens udformning og komprimeringsudstyret. Komprimeringsomfanget kan mindskes ved at anvende en letbearbejdelig beton, evt. en flydebeton.

Udstøbningen skal ske kontinuert i konstruktionsdelens fulde bredde og højde om fornødent med flere støbehold, der arbejder på skift.

Udstøbningen skal ske i tynde lag, højst 0.4 m, således at en gennemvibrering og sammenvibrering med det underliggende lag med sikkerhed kan gennemføres.

I afbindingsperioden kan der forekomme plastisk svind og sætninger i den plastiske betonmasse. Det kan medføre revner, f.eks. over armeringsjern eller ved overgangen mellem søjler og bjælker eller dæk. Der kan endvidere opstå hulrum under armering og større sten. Ved planlægning og omhyggelig udførelse af støbearbejdet kan disse revne- og hulrumsdannelser forhindres, blandt andet ved hensigtsmæssig proportionering og vibrering samt begrænsning af vandfordampning fra frie overflader.

Afformning af bærende forme, belastning af konstruktionsdele udført ved støbning i koldt vejr, samt opspænding af kabelbeton henholdsvis kapning af strengbetontråde, må først finde sted, når entreprenøren har godtgjort, at konstruktionen har den fornødne styrke.

Eftervisningen kan ske ved løbende registrering af betonens temperaturforløb med påfølgende beregning af betonens modenhed.

Eftervisning kan også ske, enten ved prøvning af mindst 6 støbte prøvelegemer udtaget fra et kontrolafsnit og lagret på konstruktionen under samme forhold som denne, eller ved prøvning i den færdige konstruktion, f.eks. ved prøvning af i forvejen indstøbte "lok-test" bolte. I sidstnævnte tilfælde skal prøvemethode og prøveomfang godkendes af tilsynet.

Udvaskning af betonen, f.eks. på grund af regn, vandtryk, vandstrømning eller ved støbning under vand, må ikke finde sted.

Hvor betonen under udstøbningen kommer i berøring med jord, klippe, forme, gamle betonoverflader etc., skal den friske beton sikres mod forurening og skadelig vandsugning.

Der skal drages omsorg for, at betonen ikke afblandes og ikke hænger fast i armering eller form.

Ifyldningsstederne skal være så tætliggende, at sideværts flytning ved vibreringen undgås.

Udstøbningen skal udføres således, at form og stillads på intet tidspunkt belastes med større kræfter, end de er beregnet for.

Betonen må ikke styrtes mere end 1 meter. Ved høje konstruktioner (søjler, vægge, tykke brodæk o.lign.), hvor dette krav ikke kan opfyldes ved direkte udstøbning, skal udstøbningen ske gennem rør dannet af fleksibelt materiale.

Al beton med krav til styrke og tæthed skal komprimeres ved vibrering. Bearbejdningen skal være effektiv og systematisk (ensartet), således at betonen overalt bliver tæt og kompakt, og separation som følge af overvibrering undgås. Ved anvendelse af beton med sætmål større end 6 cm skal der udvises særlig agtpågivenhed i forbindelse med vibreringen, således at overvibrering undgås.

Ved støbning af høje, massive konstruktioner, hvor der kan optræde større sætninger af betonen efter vibreringens afslutning, skal der foretages en genvibrering af betonen en passende tid efter udstøbningen.

Der skal til vibreringen normalt anvendes stavvibratorer. Formvibratorer må kun anvendes efter tilsynets særlige tilladelse.

Under udstøbningen skal der udvises størst mulig omhu for, at kabelrør, forankringselementer m.v. ikke lider overlast eller tvinges bort fra korrekt placering. Kabelrør, forankringselementer m.v. må ikke berøres med vibratorerne.

## 6.10 Overfladebehandling

### 6.10.1 Afrevne overflader

Afretning og glitning af vandrette overflader kan føre til separation af betonen i overfladen. Dette sker især ved kraftig behandling af beton med separationstendens. Separationen fører til forøget porøsitet og forøget pastaindhold i overfladelaget. Et sådant lags holdbarhedsmæssige egenskaber er derfor meget ringere end den underliggende betons og svarer i mange tilfælde ikke til det forventede.

Oversiden af betonkonstruktionerne skal afrettes nøjagtigt til den på tegningerne angivne form og til de krævede højder ved hjælp af nødvendige ledere og skabeloner med tilstrækkelig stivhed.

Overfladerne skal på et passende tidspunkt, inden betonen er færdig afbundet, afrives med bræt uden tilførsel af nyt materiale. Afrivnings-tidspunktet skal vælges så passende, at afrivningen kan gennemføres uden oparbejdning af slam i overfladen. Der skal lægges vægt på, at overfladen bliver jævnt afrevet - uden grater, huller eller knolde.

Oversiden af kantdragere og fløje skal afrives mod nøjagtigt tilskåret formkant.

Synlige flader skal efter afrivningen fremtræde med ensartet struktur, f.eks. som angivet ved en af følgende tre kvaliteter:

#### Kvalitet 1 - maskinglittet

Overfladen maskinglittes til plan og jævn flade. Tolerance på niveau  $\pm 5$  mm, tolerance på planhed max. 3 mm målt med 3 m retskede.

#### Kvalitet 2 - plant afrevet

Overfladen afrives til en plan og jævn flade fri for lunker, grater, skarpkantede huller og slamansamlinger. Tolerance på niveau  $\pm 8$  mm, tolerance på planhed max. 10 mm målt med 3 m retskede.

#### Kvalitet 3 - plant afrettet

Overfladen afrettet plant og jævnt svarende til god håndværksmæssig praksis.

Kørebanebelægnings, fortove, rabatter m.v. samt flader, der er direkte underlag for asfaltbelægnings og lignende (f.eks. beskyttelsesbeton), skal efter afrivningen fejes med en stiv kost vinkelret på færdselsretningen (svarende til at fejesporene følger tværfaldet), således at overfladerne kommer til at fremtræde med en ensartet, stribet struktur.

Udjævning af fordybninger samt tætning af betonoverfladen må ikke udføres ved udlægning af cementmørtel eller efterpudsning.

### 6.10.2 Formstøbte overflader

Alle clampsjern fjernes ved udtrækning eller afhugning i mindst dæklagets dybde, og samtlige rør og prophuller udstoppes med jordfugtig cementmørtel 1:3.

På synlige flader skal alle clampshuller udsættes ensartet, svagt tilbage-liggende, så hulranden står skarpt, og således at mørtelen efter hærdenin-gen fremtræder med samme farve som den omliggende beton.

På synlige flader fjernes efter afformningen alle grater. Større porer og skæmmende poreansamlinger skal udfyldes med cementmørtel ved filtsning. Der må drages omsorg for, at der ikke afsættes mørtel eller cement på de dele af fladerne, der er støbt uden porer. Behandlinger ud over ovennævnte må ikke foretages uden særlig aftale herom med tilsynet.

Hvis stenreder og tilsvarende mangler undtagelsesvis forekommer, skal de forevises tilsynet og forslag til en forsvarlig reparation forelægges.

Dersom synlige betonoverflader med den angivne behandling efter en rimelig periode udsat for vejrliget fremtræder med groft uensartet udseende som følge af udbredte lokale støbefejl eller misfarvninger hidrørende fra fremmede stoffer, skal entreprenøren efter nærmere aftale udføre en total overfladebehandling.

Kvalitetskrav til formstøbte overflader kan anføres efter følgende principper.

#### Kvalitet GF, glat form

Der anvendes f.eks.

- stålform eller
- form beklædt med minimum 12 mm vandfast krydsfiner.

Hvis krydsfinerform anvendes, skal denne overfladebehandles, således at den kan tåle det påtænkte antal genanvendelser, uden at betonoverfladens kvalitet forringes.

Fladerne skal efter afformningen fremtræde med glat, plan og ensartet overflade uden misfarvninger. Det kan accepteres, at stød i formbeklædninger samt mærker efter afstandsklodser, søm og skruer fremtræder synligt i den færdige overflade i et efter aftale med tilsynet fastsat mønster.

Andet formmateriale (f.eks. plast) kan anvendes, hvis det kan godtgøres, at en tilfredsstillende overflade kan opnås.

#### Kvalitet RF, ru form

Formen skal udføres af minimum 32 mm tykkelses- og kanthøvlede brædder. Stød i brædder udføres vinkelrette og tætte. Stødene skal forsættes, så de danner et regelmæssigt mønster efter aftale med tilsynet. Hvis intet er nævnt i beskrivelsen af de enkelte arbejder, anbringes brædderne lodret. Der støbes mod den ru side af brædderne.

#### Kvalitet NF, normal form

Form udføres af tykkelseshøvlede og kanthøvlede brædder, min. dimension 25 mm.

Der støbes mod den ru side.

Formplader kan tillades anvendt efter godkendelse af tilsynet, dog må der ikke anvendes formplader til flader, der senere skal pudses.

#### Kvalitet UF

Form udføres af almindelige ru brædder, min. dimension 25 mm eller formplader. Støbning mod jord i naturlig fast aflejring kan tillades, såfremt de forlangte dimensioner med sikkerhed kan overholdes.

#### 6.11 Efterbehandling i hærtningsperioden

Efter støbningen skal frie betonoverflader beskyttes mod udtørring på en sådan måde, at det sikres, at den til cementens hydratisering fornødne vandmængde til stadighed er til stede i betonens overflader. Ved efterbehandling forstås normalt metoder, der benyttes for at beskytte frie betonoverflader mod udtørring. Normens krav om styring af temperaturforløb i mere massive konstruktionsdele behandles i afsnit 6.14 under begreberne Vejrligsforanstaltninger og Hærdestyring.

Manglende eller dårlig beskyttelse af betonen indtil tilstrækkelig hærning er opnået kan føre til udtørring af overfladen. Dette betyder afbrudt hydratisering af pastaen og dermed forøget porøsitet og revnedannelser som følge af udtørringssvind. Beskyttelse mod udtørring er særlig væsentlig i de første 24 modenhestimer, d.v.s. ækvivalent hærde tid ved 20° C.

Frisk udstøbt beton tildækkes hurtigst muligt. Indeholder betonen flyveaske eller mikrosilica, er en hurtig og omhyggelig tildækning især vigtig,

da den reducerede bleedingstendens giver øget risiko for revner på grund af plastisk svind.

Efterbehandlingen skal ske ved tildækning (indhylning) med vanddamptætte membraner, som plastpresenninger eller svær plastfolie. Samlinger i tildækningsmaterialer skal ligeledes udføres tætte.

Såfremt tilførsel af vand alligevel er nødvendig for at holde overfladen fugtig, skal denne tilførsel ske i netop nødvendigt omfang med vand af en passende temperatur, således at skadelige temperaturgradienter ikke opstår i betonen.

Påsprøjtning af et forseglingsmiddel kan tillades, såfremt dette er anført i arbejdsbeskrivelserne. Dog må støbeskel aldrig påføres forseglingsmiddel.

Alle frie overflader (vandrette, lodrette og skrå) skal efterbehandles i hærdningsperioden. Såfremt ikke afformede flader er udsat for udtørring, skal disse ligeledes efterbehandles.

Efterbehandlingen skal udføres i mindst to uger efter støbningen. Ved forspændte konstruktioner dog mindst indtil det tidspunkt, hvor den fulde forspændingskraft er påført.

Til efterbehandling skal anvendes vand, godkendt som støbevand, således at misfarvning af synlige betonoverflader forhindres.

#### 6.12 Synlige fejl

Tilsynet skal straks underrettes, såfremt der ved afformningen viser sig fejl på betonoverfladerne. Ophugninger eller reparationer af fejl må ikke foretages, førend særlig aftale er truffet om omfang og metodik.

Såfremt udstøbningens forløb giver tilsynet formodning om, at konstruktionen ikke er fejlfri udstøbt, skal entreprenøren på forlangende og uden vederlag godtgøre, at der ikke er fejl. Der kan ikke gives tilladelse til opspænding af konstruktionen, førend en sådan eventuel eftervisning og godkendelse har fundet sted.

Ovennævnte er ligeledes gældende, såfremt der konstateres fejl i bygværkets geometri.

#### 6.13 Skjulte fejl

Såfremt der forekommer revner, afsprængninger eller gennemsvivninger m.m., som skyldes større indhold af skadelige (f.eks. frostfarlige) bjergarter end oprindeligt tilladt, eller udførelsesmangler (f.eks. porøsitet m.m.), er entreprenøren pligtig for egen regning at udbedre skader efter tilsynets nærmere anvisning.

#### 6.14 Vejrligsforanstaltninger

##### 6.14.1 Generelle

Nedenstående vedrører ikke egentlige vinterforanstaltninger. Sådanne behandles senere i afsnittet. Betonen skal beskyttes mod skadelige påvirkninger fra vejrliget (regn, sol, varme, kulde, blæst m.v.).

Entreprenøren skal således:

- a) beskytte den frisk udstøbt beton mod udvaskning hidrørende fra regn (f.eks. ved udførelse af en effektiv tildækning med presenninger, der ikke må beskadige afrevne overflader),
- b) beskytte den hærdnende beton mod udtørring, jvf. 6.11.
- c) beskytte den hærdnende beton mod skadelige virkninger hidrørende fra temperaturforskelle, idet det ved passende foranstaltninger skal sikres, at trækspændinger herfra i betonens overflade altid er mindre end betonens øjeblikkelige trækstyrke, således at revnedannelser undgås.

ad c. Risikoen for revnedannelse i den unge beton afhænger dels af temperaturforskellene i konstruktionen, dels af den enkelte konstruktionsdels understøtningsbetingelser.

For en væg med samme temperatur på begge sider kan det eksempelvis antages, at revnedannelser undgås, hvis forskellen mellem væggen's middeltemperatur og overfladetemperatur holdes under ca. 15° C. Dette svarer normalt til, at temperaturforskellen mellem midte og rand holdes under ca. 20° C. Hvis væggen sammenstøbes med et tidligere udstøbt fundament,

må det sikres, at forskellen mellem væggenes middeltemperatur og fundamentets temperatur i nærheden af støbeskellet på intet tidspunkt overstiger ca. 15° C.

Følgende foranstaltninger kan alt efter forholdene (d.v.s. konstruktionsdelens udformning, anvendte formmateriale, afformningstidspunkt m.v.) blive nødvendige:

Anvendelse af cement med lille varmeudvikling.

Betonproportionering, der medfører mindst mulige cementindhold.

Anvendelse af beton med passende lav udgangstemperatur.

Udførelse af varmeisolering af overflader.

Entreprenøren skal i særlig grad have opmærksomheden henledt på de problemer, der kan opstå på grund af uensartet afkøling af formstøbte og frie betonflader, afkøling ved støbeskel samt på grund af forskellige temperaturer i betonen forårsaget af forskellige dimensioner i tværsnittet.

Temperaturforskellen mellem tidligere udstøbt beton og den efterfølgende udstøbte beton skal holdes så lav som muligt f.eks. ved opvarmning og/eller isolering af den tidligere udstøbte beton. Ved opvarmning af tidligere udstøbt beton må der imidlertid ikke opstå skadelige temperaturforskelle i denne beton.

For at reducere temperaturforskellene i den hærtnende beton kan det ud over en forlænget formperiode være påkrævet at afdække såvel form som frie overflader med presenninger, vintermætter eller lignende.

Entreprenøren skal over for tilsynet meddele, hvilke foranstaltninger han agter at anvende for at sikre temperaturkravets overholdelse, samt ved beregning godtgøre at foranstaltningerne er tilstrækkelige.

Entreprenøren skal desuden i forbindelse med støbningerne efterwise, at kravet er opfyldt ved måling af betontemperaturerne med termoelementer forskellige steder i konstruktionen. Program for målingerne samt det anvendte udstyr skal aftales med tilsynet.

De problemer, som styring og dokumentation af temperaturforløb i hærtnende betonkonstruktioner med henblik på at undgå såkaldte termorevner giver anledning til, behandles nærmere i afsnit 6.14.3 og i P. Freisleben-Hansen og E.J. Pedersen: "Vinterstøbning af beton", S.B.I. Anvisning nr. 125.

Entreprenøren skal i sin arbejdsplan tage hensyn til de bindinger, ovennævnte foranstaltninger giver i arbejdstakten.

#### 6.14.2 Vinterforanstaltninger

I de særlige arbejdsbeskrivelser for et betonbyggeri vil det normalt være anført, i hvilket omfang entreprisen skal påregnes gennemført i vinterperioden som egentligt vinterbyggeri med særlige vinterforanstaltninger. Der vil normalt være tale om en af følgende former:

- 1) Såfremt entreprisen ikke skal påregnes gennemført i vintermånederne som egentligt vinterbyggeri, vil vinterperiodens længde være defineret i arbejdsbeskrivelserne. I denne periode kan arbejderne således være helt eller delvis indstillet.

Hvis entreprenøren vælger at gennemføre dele af arbejdet i denne periode, skal han for egen regning iværksætte de for den kvalitetsmæssigt tilfredsstillende udførelse nødvendige forholdsregler.

- 2) Såfremt entreprisen forudsættes gennemført i vintermånederne, vil omfanget fremgå af en i arbejdsbeskrivelsen angivet opgørelse af de arbejder, som alene forudsættes gennemført som egentligt vinterbyggeri.

Alle øvrige arbejder påregnes udført på sådanne årstider, at vinterforanstaltninger ikke er påkrævede. Hvis entreprenøren tilrettelægger sit arbejde således, at vinterforanstaltninger alligevel skulle blive nødvendige, skal udgifterne til disse afholdes af entreprenøren.

Hvis entreprisen skal gennemføres som egentligt vinterbyggeri, skal der ud over de tidligere i afsnittet anførte foranstaltninger træffes særlige vinterforanstaltninger, som sikrer:

- d) at arbejdet holdes i gang i det for arbejdets fremdrift fornødne omfang,
- e) at der ikke sker skade på udført eller igangværende arbejder,
- f) at arbejdet kan udføres i overensstemmelse med de stillede krav,
- g) at arbejdet umiddelbart igen kan optages, såfremt ekstreme forhold har medført standsning.

På basis af den detaljerede arbejdsplan skal entreprenøren inden 15. oktober eller ved senere igangsætning samtidig med denne udarbejde en vinterforanstaltningsplan, der efter tilsynets godkendelse vil være bindende, for så vidt angår materialeindkøb og materielindsats.

I forbindelse med den detaljerede arbejdsplan skal entreprenøren over for tilsynet meddele, hvilke foranstaltninger han agter at anvende for at undgå, at den nystøbte beton skades af frost, og at der opstår skadelige temperaturgradienter i konstruktionen, samt ved beregning godtgøre, at foranstaltningerne er tilstrækkelige.

Entreprenøren skal desuden i forbindelse med støbningerne efterwise, at kravet om frostsikkerhed hos den nystøbte beton på ethvert tidspunkt er opfyldt overalt i konstruktionen. Sådan eftervisning skal foregå ved måling af betontemperaturerne med termoelementer forskellige steder i konstruktionen. Program for målingerne samt det anvendte udstyr skal aftales med tilsynet.

De problemer, som styring og dokumentation af temperaturforløb med henblik på at undgå frostskafer hos den hærdenende beton giver anledning til, behandles i afsnit 6.14.3 og i P. Freisleben-Hansen og E.J. Pedersen: "Vinterstøbning af beton", S.B.I. Anvisning nr. 125.

Standsning af arbejdet fra tilsynets side som følge af, at de i vinterforanstaltningsplanen fastlagte vinterforanstaltninger ikke er udført eller er udført utilstrækkeligt, berettiger ikke entreprenøren til tidsfristforlængelse eller ekstrabetaling.

Arbejdet skal tilrettelægges blandt andet under hensyn til, at det ikke tillades, at færdig, i formen indlagt armering henligger i længere perioder for senere støbning end en normal kontinuert arbejdsgang forudsætter.

Det må påregnes, at tilslagsmaterialer skal afdækkes mod nedbør.

Det påhviler entreprenøren ved lufttemperaturer under  $+5^{\circ}$  C at udføre de krævede foranstaltninger, således som det fremgår af den godkendte vinterforanstaltningsplan. Tilsynets tilladelse til støbning skal i hvert tilfælde indhentes.

Varm betons temperatur skal udlagt i bygværket ligge mellem 15 og  $20^{\circ}$  C.

Ved lufttemperatur under  $-5^{\circ}$  C må betonstøbning kun finde sted, når særligt vidtgående foranstaltninger er aftalt.

De i forbindelse med iværksættelsen af vinterforanstaltninger supplerende målinger og forsøg påhviler entreprenøren.

Saltning af forme, armering eller færdigstøbte konstruktioner må ikke finde sted.

Med hensyn til udførelse af praktiske vinterforanstaltninger henvises til Statens Byggeforskningsinstituts Anvisninger nr. 48, 49, 55 og 125 samt til "Vinterforholdsregler ved anlægs- og byggearbejder" udgivet af Arbejdsministeriets vinterkonsulenttjeneste, 1980.

Entreprenøren skal i vinterperioder foretage regelmæssige målinger af betontemperaturen i konstruktionen under afbindingen og hærdningen, indtil betonen er frostsikker og har opnået fornøden styrke, ligesom entreprenøren jvf. afsnit 5.1.10 skal udstøbe ekstra prøvelegemer.

#### 6.14.3 Hærdestyring

En effektiv styring af hærdeforløbet i en udstøbt betonkonstruktion stiller en række krav til arbejdets planlægning og udførelse. I det følgende resumeres kort de grundlæggende principper for denne styring.

Et hensigtsmæssigt hærdeforløb er opnået, såfremt betonen ikke beskædige på grund af temperaturbelastning, samtidig med at betonen opnår den nødvendige afformningsstyrke inden for den planlagte hærdetid. Under vinterforhold skal betonen herudover være sikret mod frysning, indtil den fornødne frostsikkerhed er opnået gennem hærdningen.

De principper, der ligger til grund for en styring af hærdeforløbet, er knyttet til følgende tre forhold:

- Hastigheden af en hærdeproces er hovedsagelig bestemt af beton-temperaturen.
- Under betonens hærkning udvikles der varme.
- Temperaturforløbet i en hærtnende betonkonstruktion er bestemt af balancen mellem varmeudviklingen i betonen og varmetabet til omgivelserne.

I praksis har man en række muligheder for at påvirke denne varmebalance i den hærtnende beton, og derigennem for at styre hærdeforløbet; de vigtigste styringsparametre er:

- Betonens udstøbningstemperatur
- Formsystem og formisolering
- Afformningstidspunkt
- Cementtype og cementindhold

Under de fleste forhold kan en styring af hærdeforløbet ske alene ved passende valg af udstøbningstemperatur og formsystem/formisolering. Vælges disse betingelser under hensyntagen til betontype, konstruktionsudformning og vejrlig, kan hærdeforløbet i vidt omfang tilpasses givne krav.

En styret hærkning, der opfylder stillede krav, forudsætter en vis arbejdsindsats i forbindelse med forberedelse og udførelse af støbearbejdet. Det vil herunder især være nødvendigt at

- planlægge udførelsen
- kontrollere støbearbejdet
- kontrollere hærdeforløbet.

Ved planlægning af støbearbejdet forudsættes kendskab til betonens varmeudviklingsegenskaber; data herfor kan fastlægges ved måling af den adiabatiske varmeudvikling i et egnet kalorimeter som angivet i BKI Prøvemethoder for bestemmelse af betoners varmeudviklingsegenskaber ved adiabatisk kalorimetri. Herudover omfatter planlægningen fastsættelse af udstøbnings-temperatur, formtype, isoleringsforanstaltninger samt evt. efterbehandling, således at det ønskede hærdeforløb opnås.

I forbindelse med støbearbejdets udførelse bør det kontrolleres, at de gjorte forudsætninger svarer til de faktiske forhold.

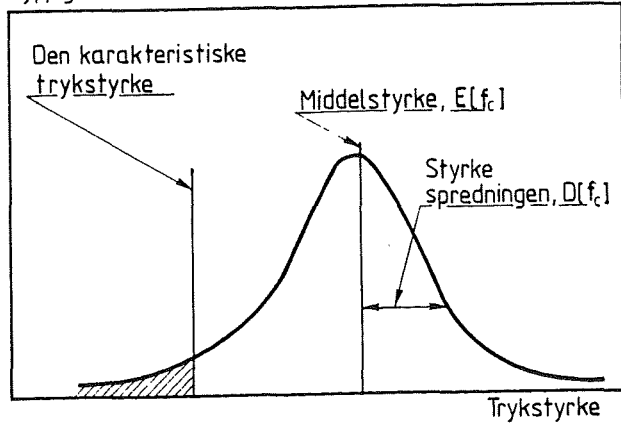
Under betonens hærkning bør temperaturforløbet kontrolleres frem til afformningstidspunktet, og under den efterfølgende nedkøling; herigennem sikres den nødvendige dokumentation i forhold til stillede krav. Tilstræbes tidlig afformning, bør den endelige beslutning om tidspunktet altid baseres på målte værdier; dette kan være in situ test af betonens styrke eller en modenhedsvurdering ud fra et målt temperaturforløb. Temperaturmålinger under betonens hærkning anvendes herudover i forbindelse med:

- Sikring mod beskadigelse ved tidlig frysning
- Kontrol af maksimal hærde-temperatur
- Kontrol af temperaturbelastning under hærkning
- Valg af afformningstidspunkt
- Valg af tidspunkt for opspænding af kabler
- Valg af efterisolering

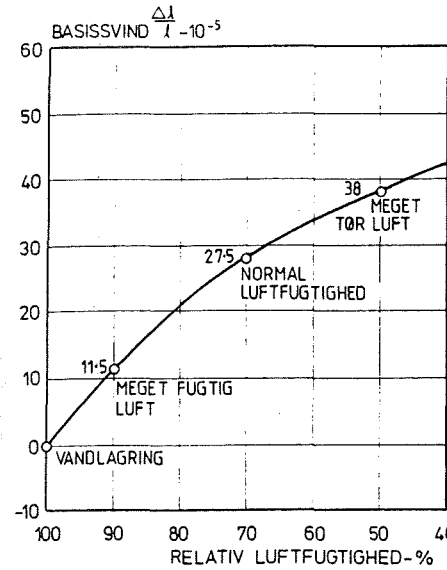
Beregningsprocedurer i forbindelse med styring af temperaturforløb i hærtnende beton er nærmere beskrevet i P. Freisleben-Hansen og E.J. Pedersen: "Vinterstøbning af beton", SBI Anvisning nr. 125.



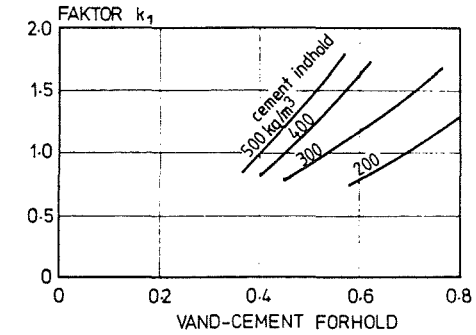
Hyppighed.



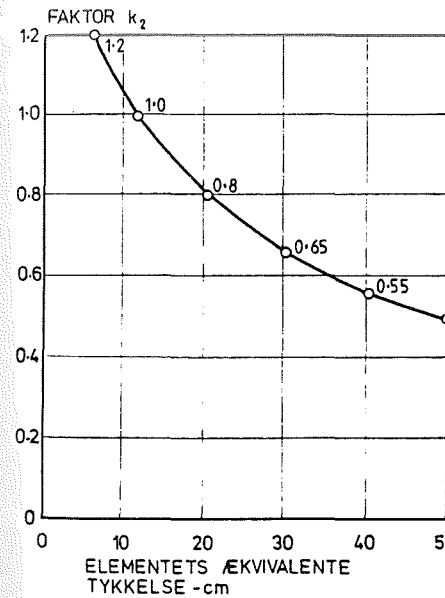
Figur 2.1 Typisk hyppighedsdiagram (frekvensfunktion for en betons trykstyrke).



Figur 2.2 Sammenhængen mellem udtørningssvind af uarmeret beton og relativ luftfugtighed

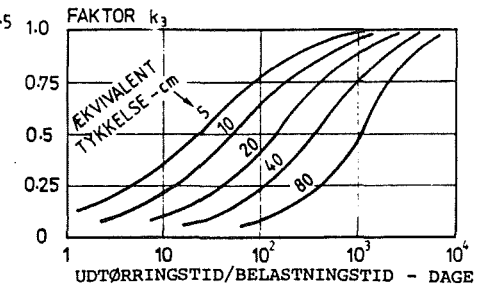


Figur 2.3 Faktor k<sub>1</sub> for betonsammensætning

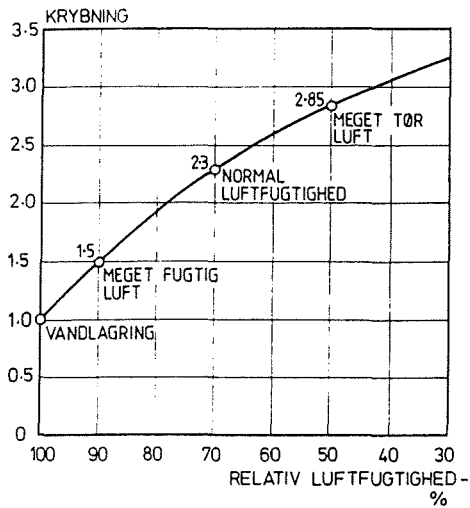


Figur 2.4

Faktor k<sub>2</sub> for konstruktionselementets geometriske form og størrelse. (Konstruktionselementets ækvivalente tykkelse defineres som elementets tværsnitsareal divideret med halvdelen af den del af tværsnittets omkreds, der er udsat for udtørring).

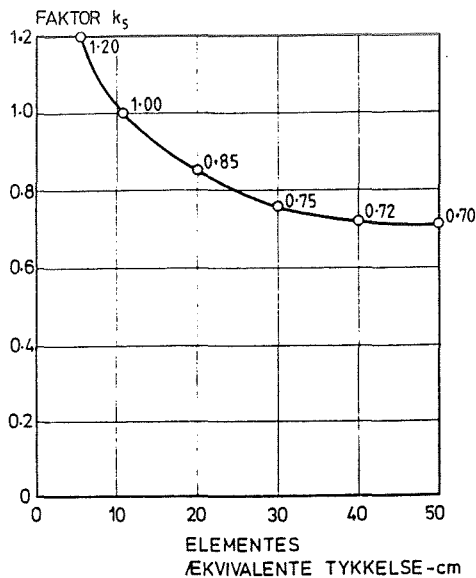


Figur 2.5 Faktor k<sub>3</sub> for udtørningstid ved beregning af svind (for belastningstid ved beregning af krybning)

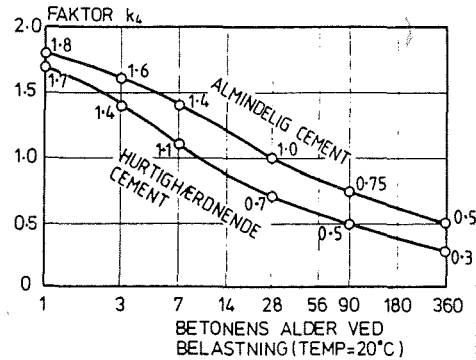


Figur 2.6

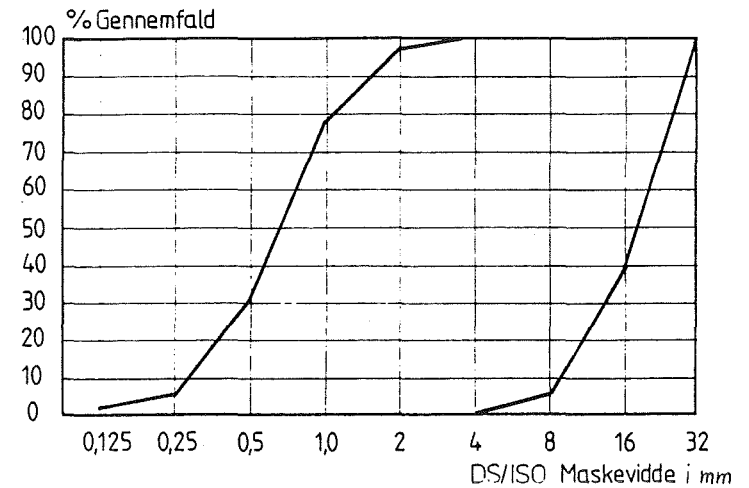
Sammenhæng mellem krybning og relativ luftfugtighed. (Langs ordinataksen er angivet den faktor, som konstruktionselementets elastiske tøjning skal multipliceres med for at få elementets krybning).



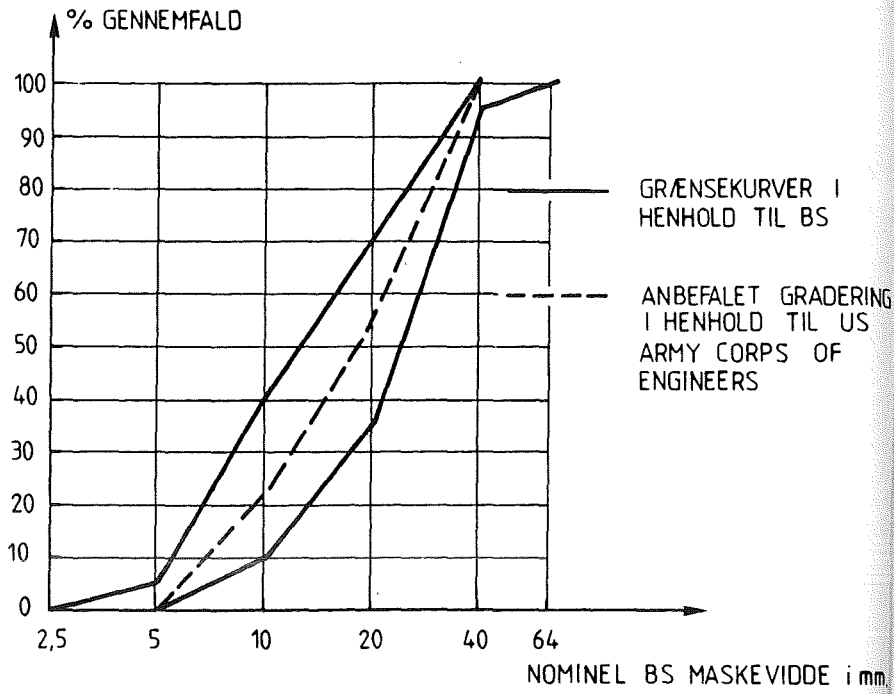
Figur 2.8 Faktor  $k_5$  for geometrisk form og størrelse af konstruktions-element. Konstruktionselementets ækvivalente tykkelse defineres som elementets tværsnitsareal divideret med halvdelen af den del af tværsnittets omkreds, der er udsat for udtørring.



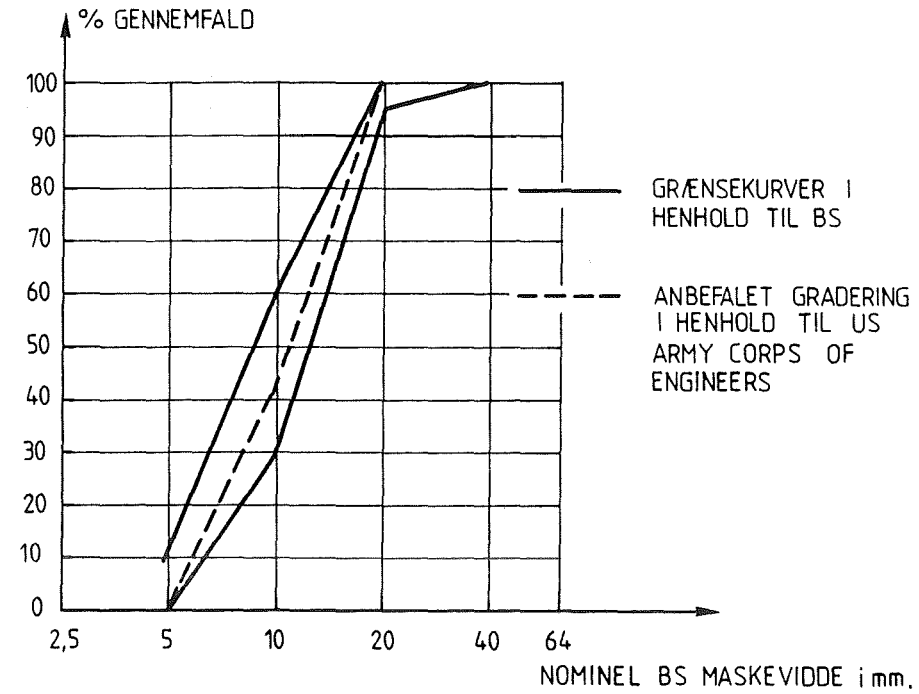
Figur 2.7 Faktor  $k_4$  for betonens alder ved belastning



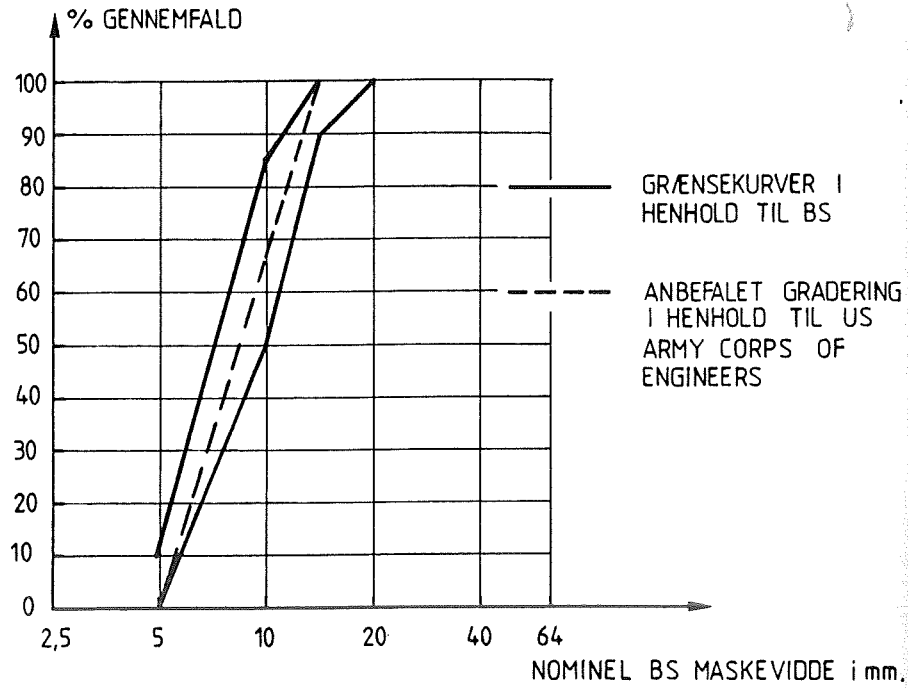
Figur 3.0 Sigtediagram svarende til regneeksempel nr. 1. Sigteanalyse af sand og sten. Se tabel 3.0.



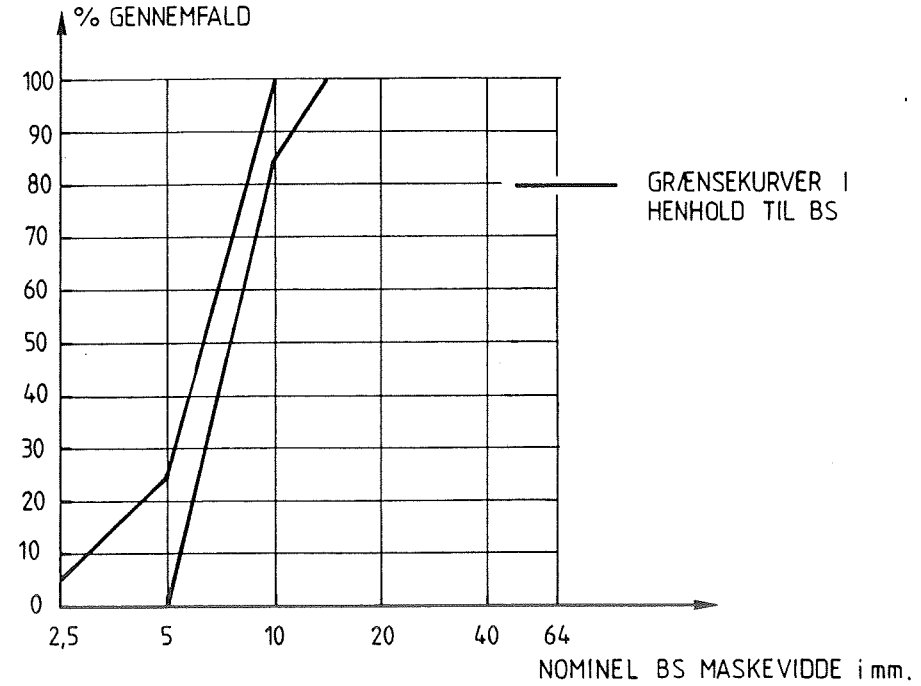
Figur 3.1 Krav til gradering af groft tilslag med 40 mm nominal maksimal stenstørrelse



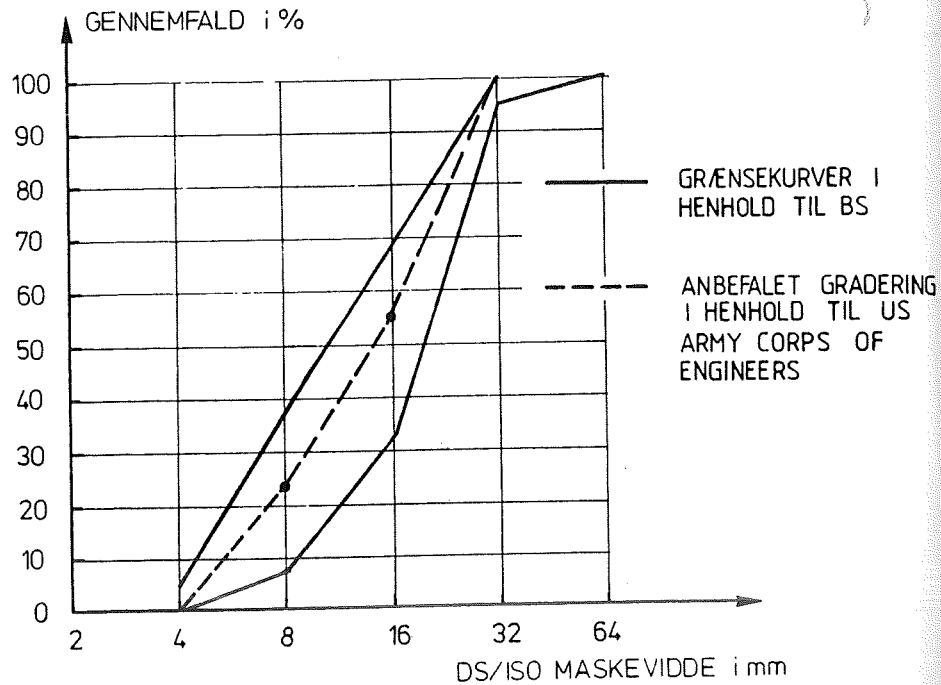
Figur 3.2 Krav til gradering af groft tilslag med 20 mm nominal maksimal stenstørrelse



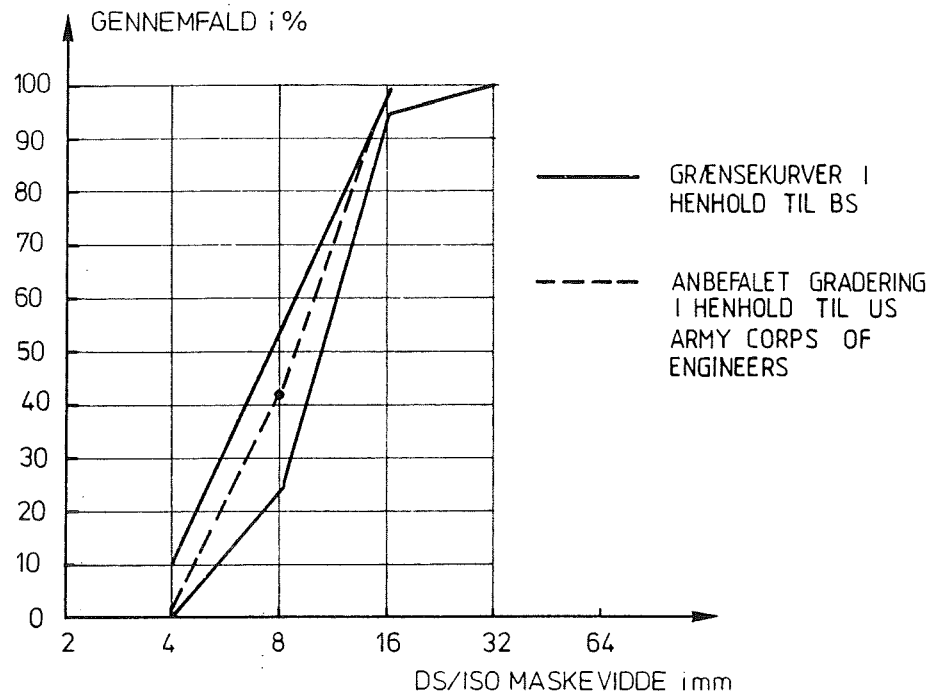
Figur 3.3 Krav til gradering af groft tilslag med 14 mm nominal maksimal stenstørrelse



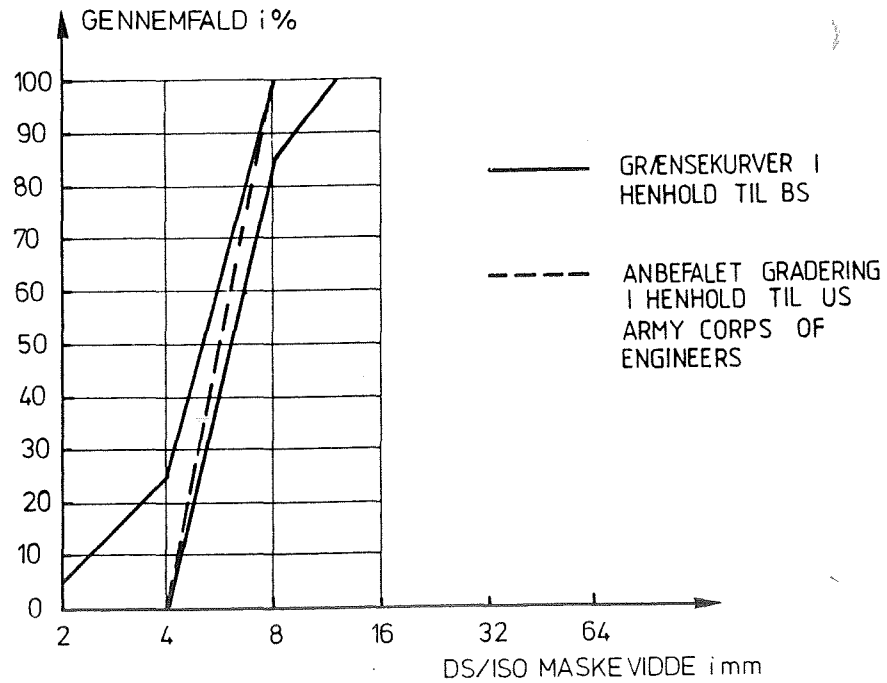
Figur 3.4 Krav til gradering af groft tilslag med 10 mm nominal maksimal stenstørrelse



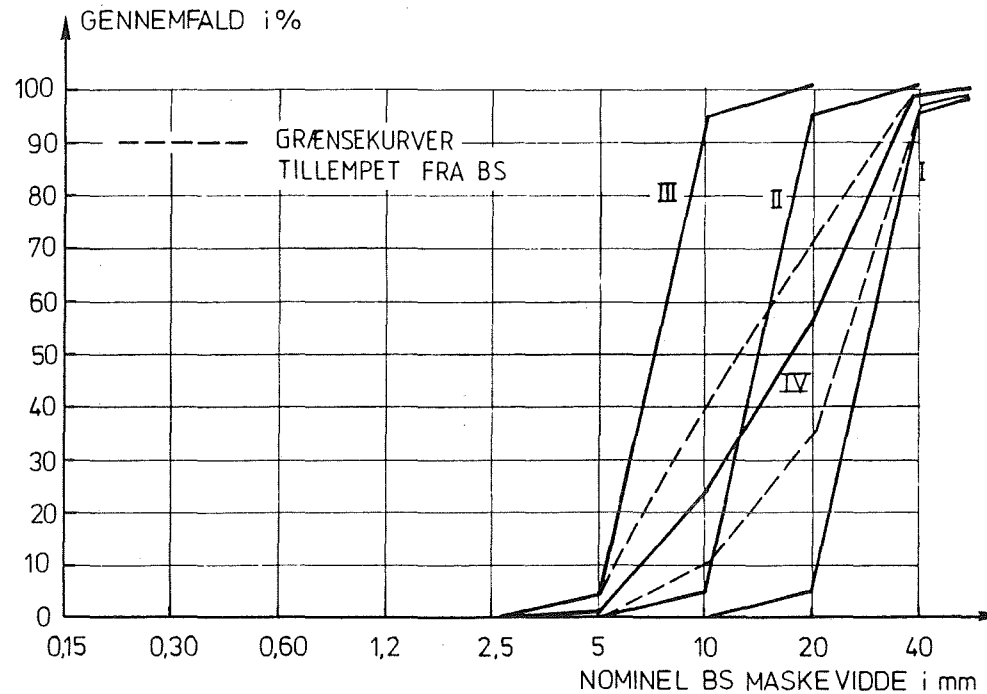
Figur 3.5 Krav til gradering af groft tilslag med 32 mm nominal maksimal stenstørrelse



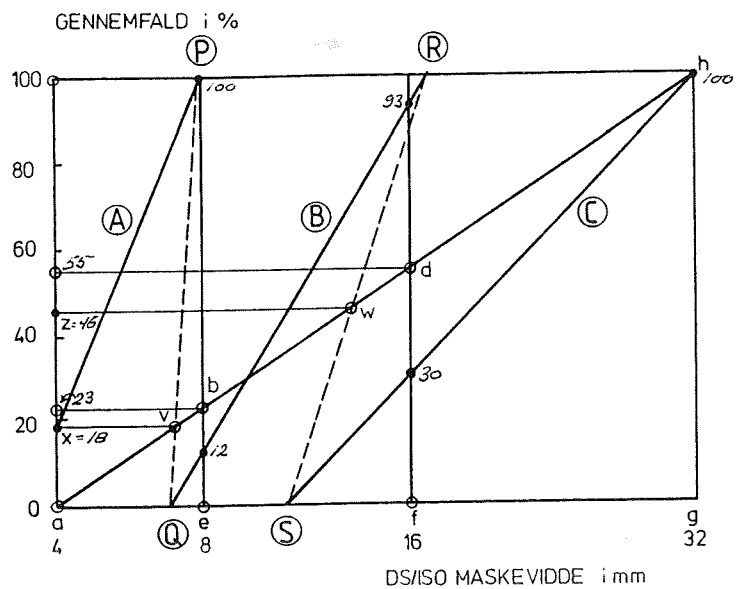
Figur 3.6 Krav til gradering af groft tilslag med 16 mm nominal maksimal stenstørrelse



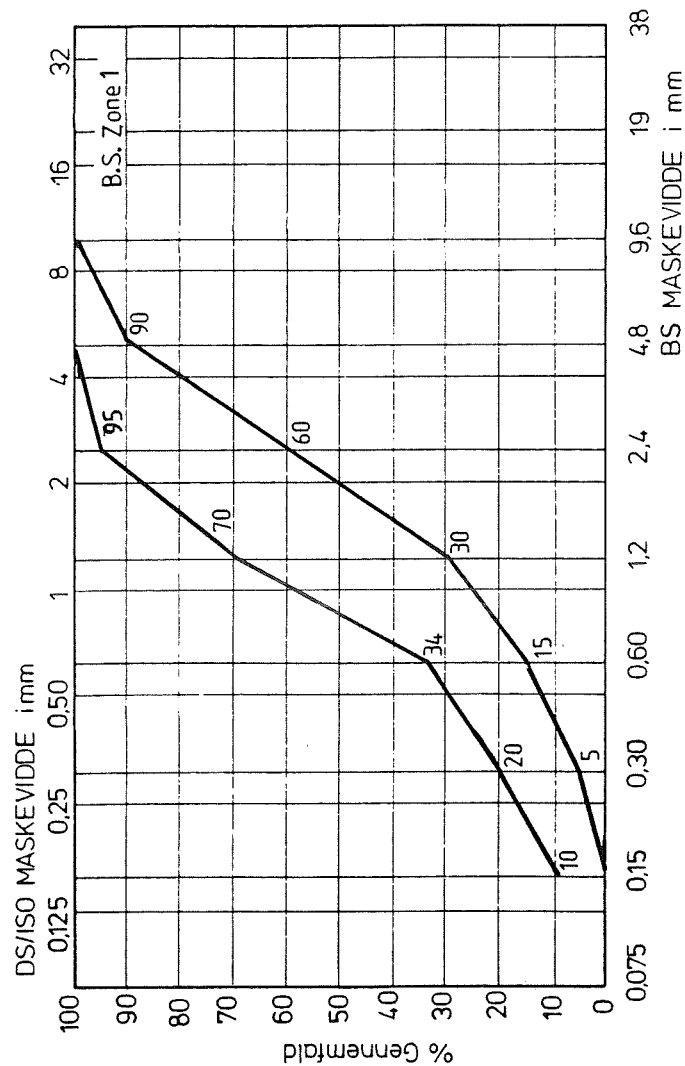
Figur 3.7 Krav til gradering af groft tilslag med 8 mm nominal maksimal stenstørrelse



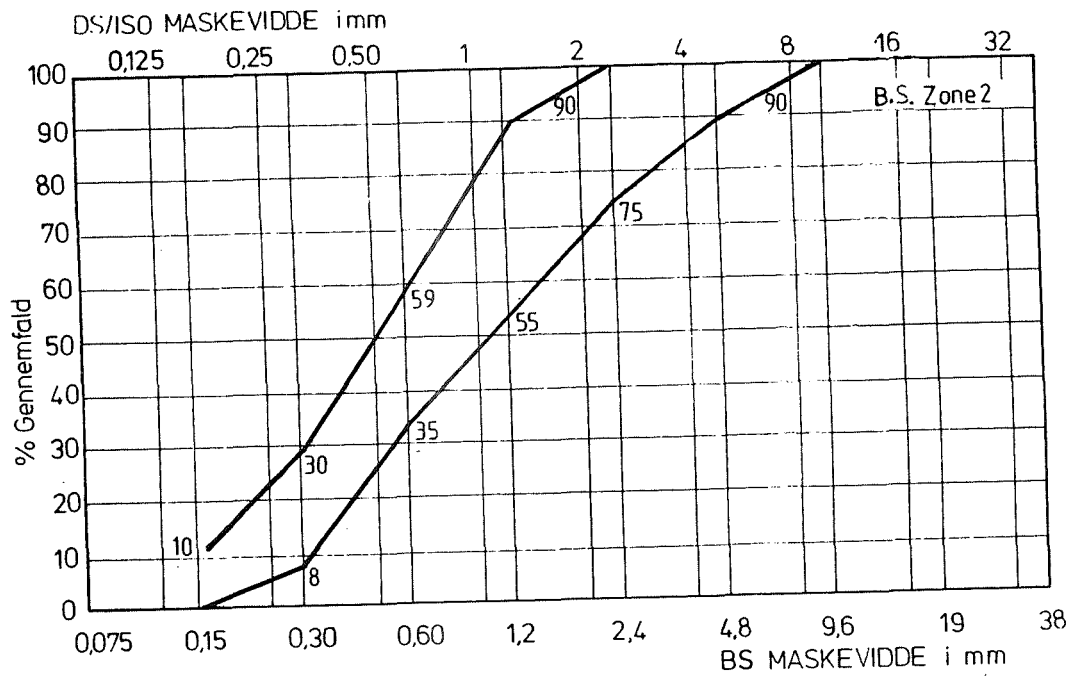
Figur 3.8 Graderingskurve for det samlede stenmateriale IV, når tre enkeltfraktioner sammensættes i forholdene 45% af I, 32% af II og 23% af III (se iøvrigt tabel 3.9)



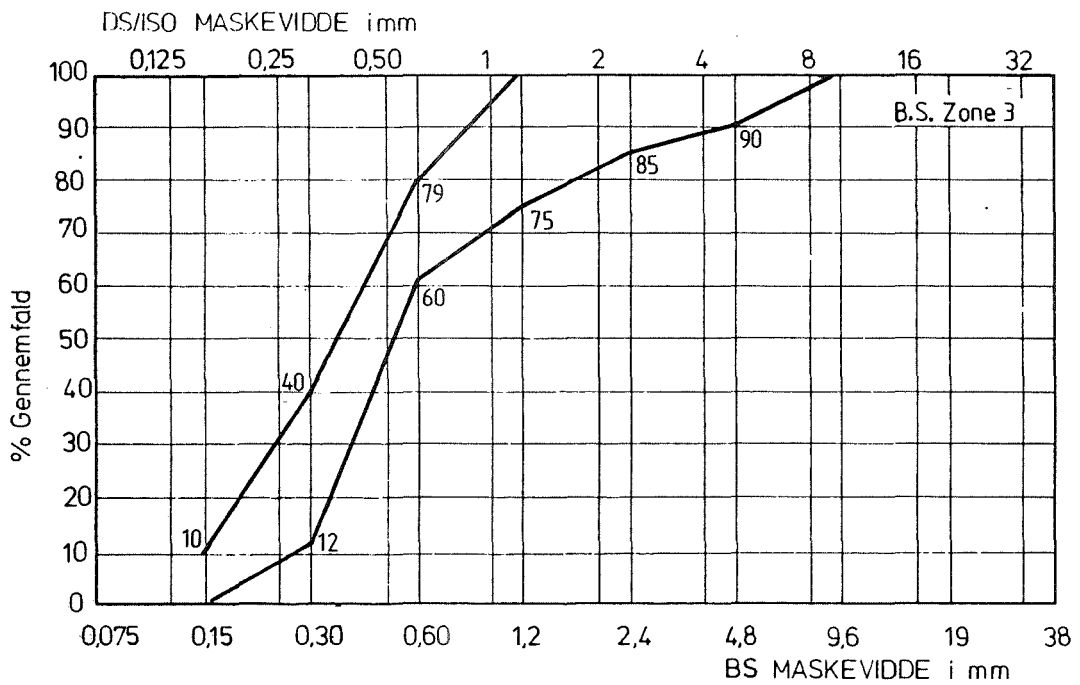
Figur 3.9 Eksempel på sammensætning af tre vilkårligt graderede tilslagsfraktioner til ønsket tilslagsgradering ved hjælp af grafisk metode



Figur 3.10 Grænsekurver for gradering af sand i zone 1 i henhold til BS 882-1973

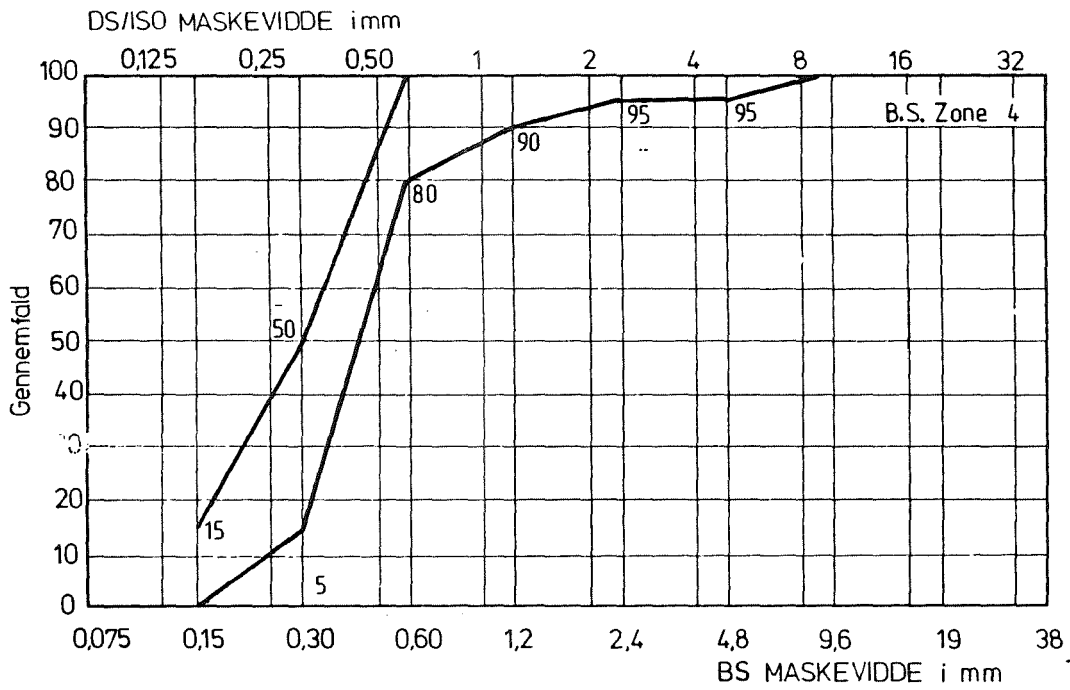


Figur 3.11 Grænsekurver for gradering af sand i zone 2

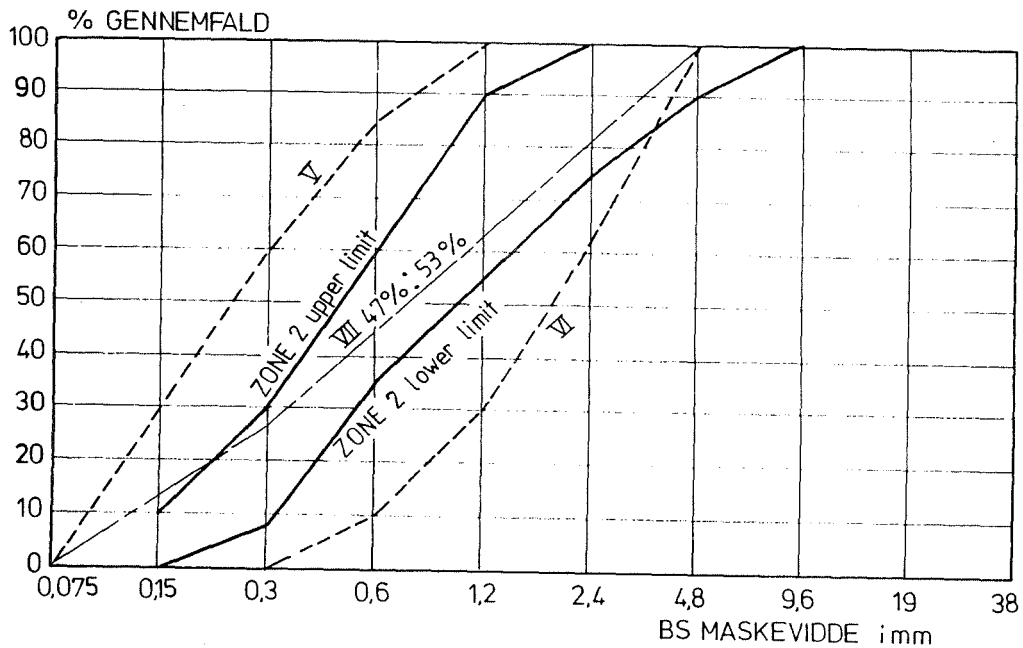


Figur 3.12 Grænsekurver for gradering af sand i zone 3 i henhold til BS 882-1973

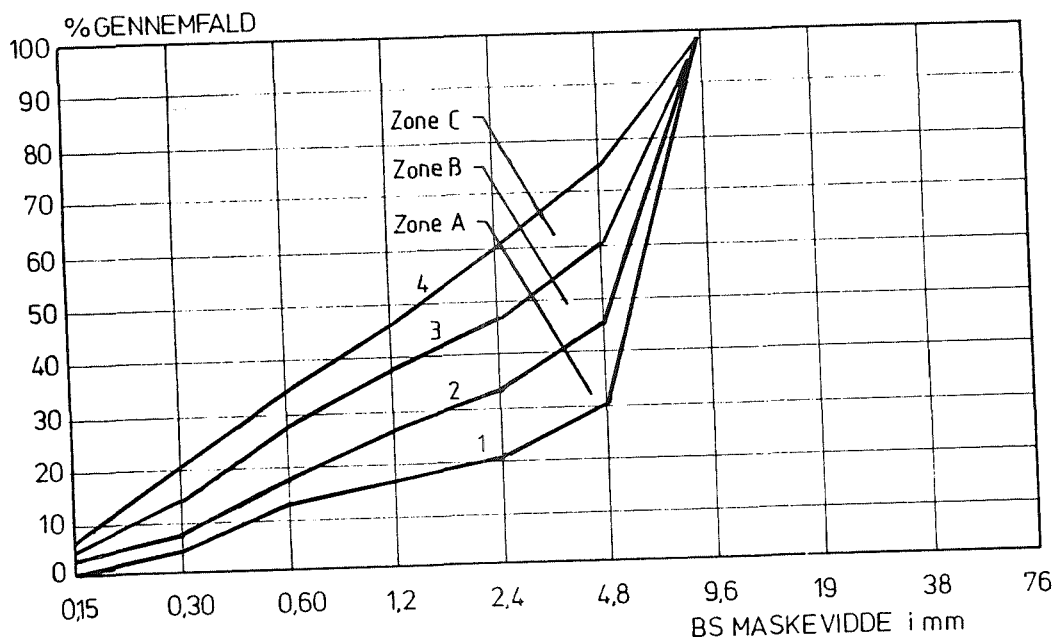




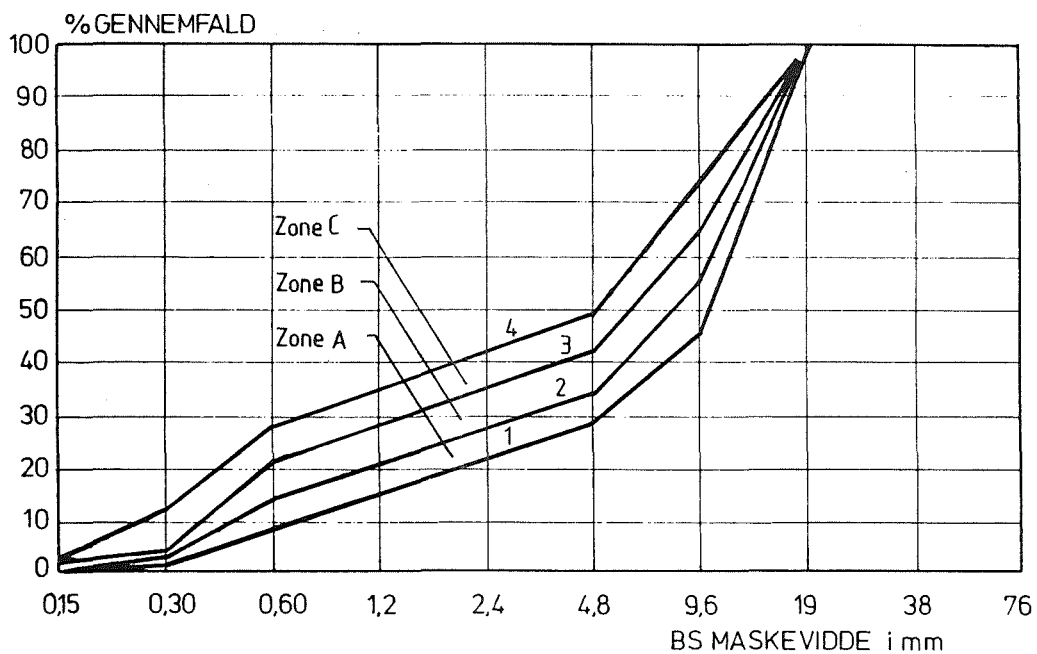
Figur 3.13 Grænsekurver for gradering af sand i zone 4



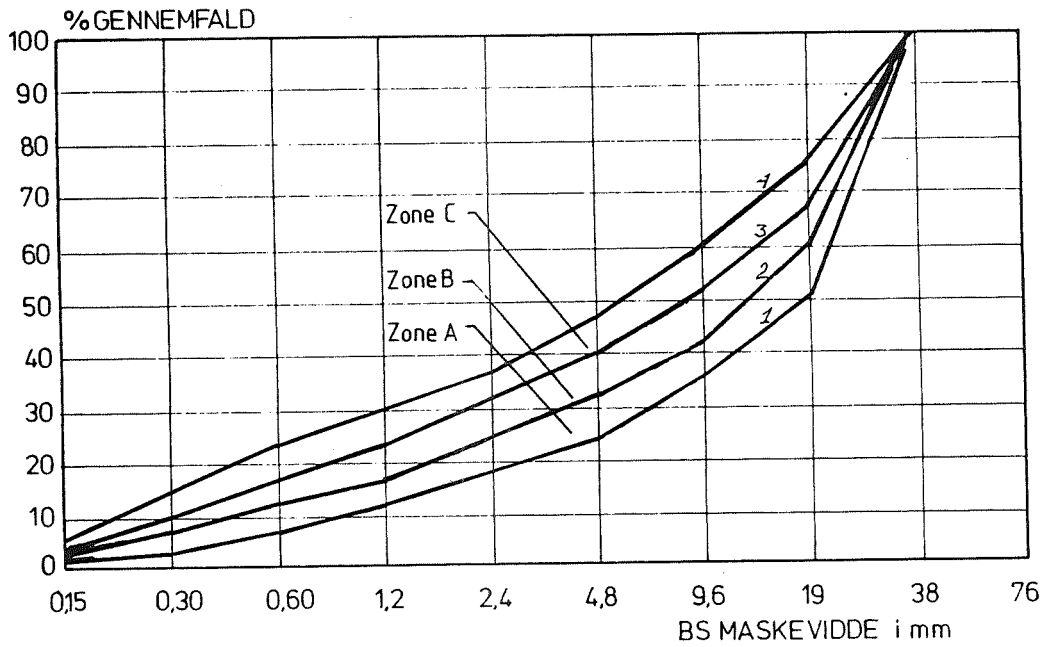
Figur 3.14 Kornkurve VII for fint tilslag, når 47% fint sand V blandes med 53% groft sand VI



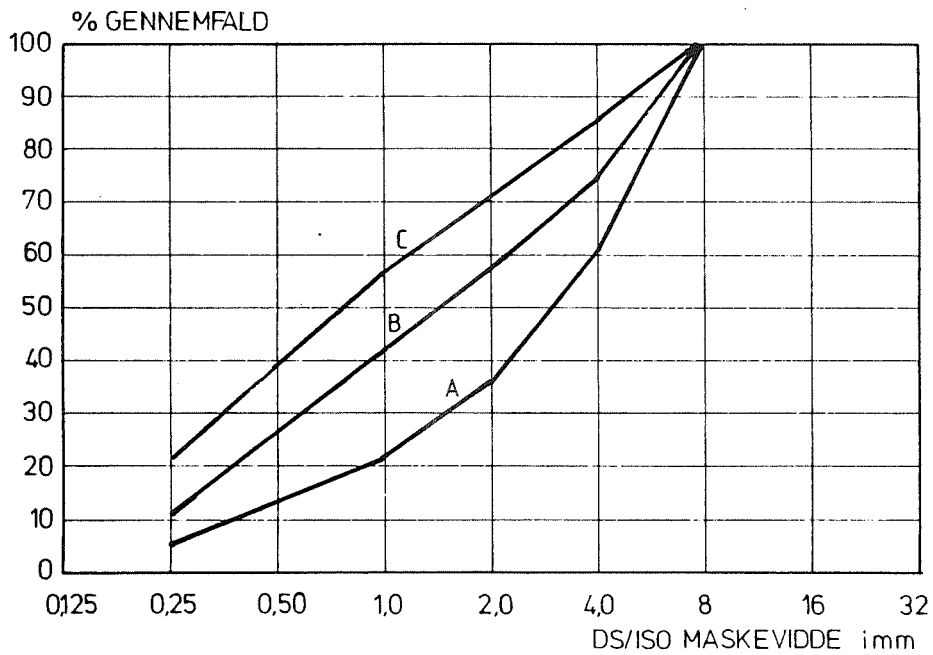
Figur 3.15 Grænsekurver for samlet betontilslag med nominelt 10 mm maksimal stenstørrelse (i henhold til J.D. McIntosh og H.C. Erntroy: "The Workability of Concrete Mixes with 3/8" Aggregates", Cement and Concrete Association, Research Report No. 2, London, June 1955)



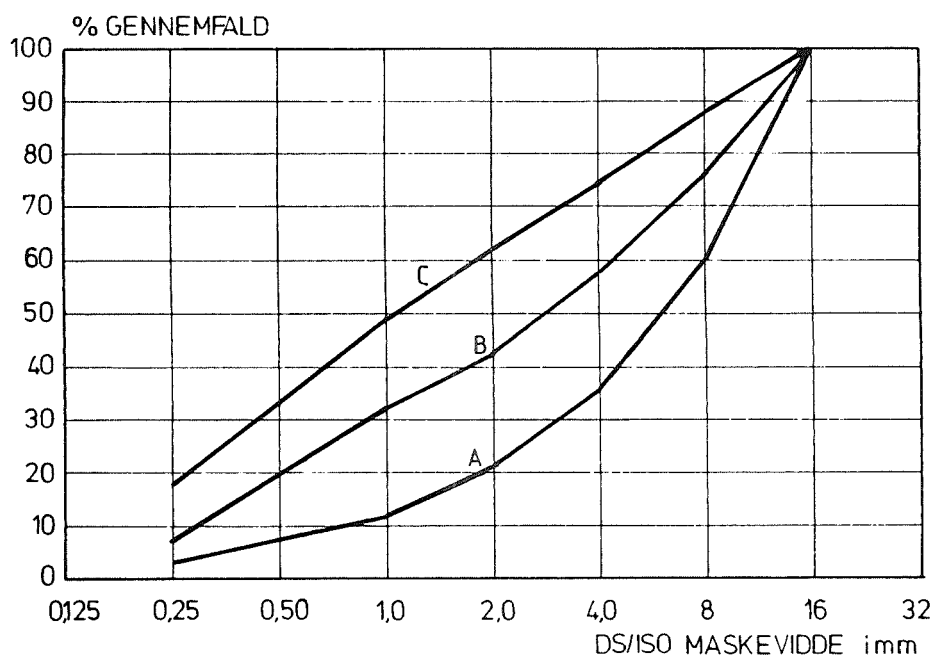
Figur 3.16 Grænsekurver for samlet betontilslag med nominelt 20 mm maksimal stenstørrelse (i henhold til "Design of Concrete Mixes", Road Note No. 4, Road Research Institute, HMSO, London, 1950)



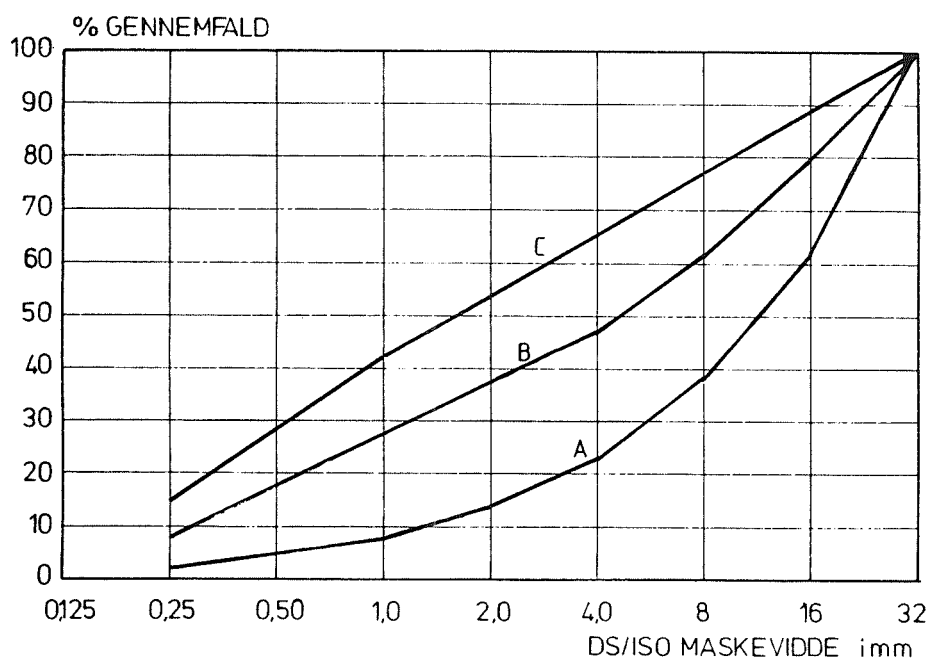
Figur 3.17 Grænsekurver for samlet betontilslag med nominelt 40 mm maksimal stenstørrelse (i henhold til "Design of Concrete Mixes", Road Note No. 4, Road Research Institute, HSMO, London, 1950)



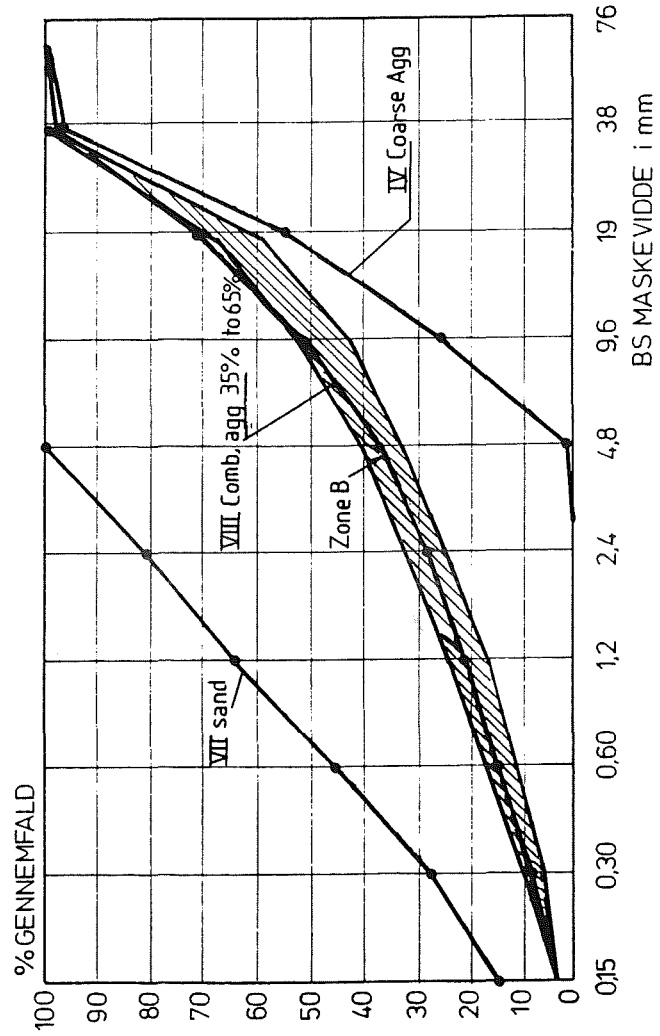
Figur 3.18 Grænsekurver for samlet betontilslag med 8 mm maksimal stenstørrelse (i henhold til DIN 1045)



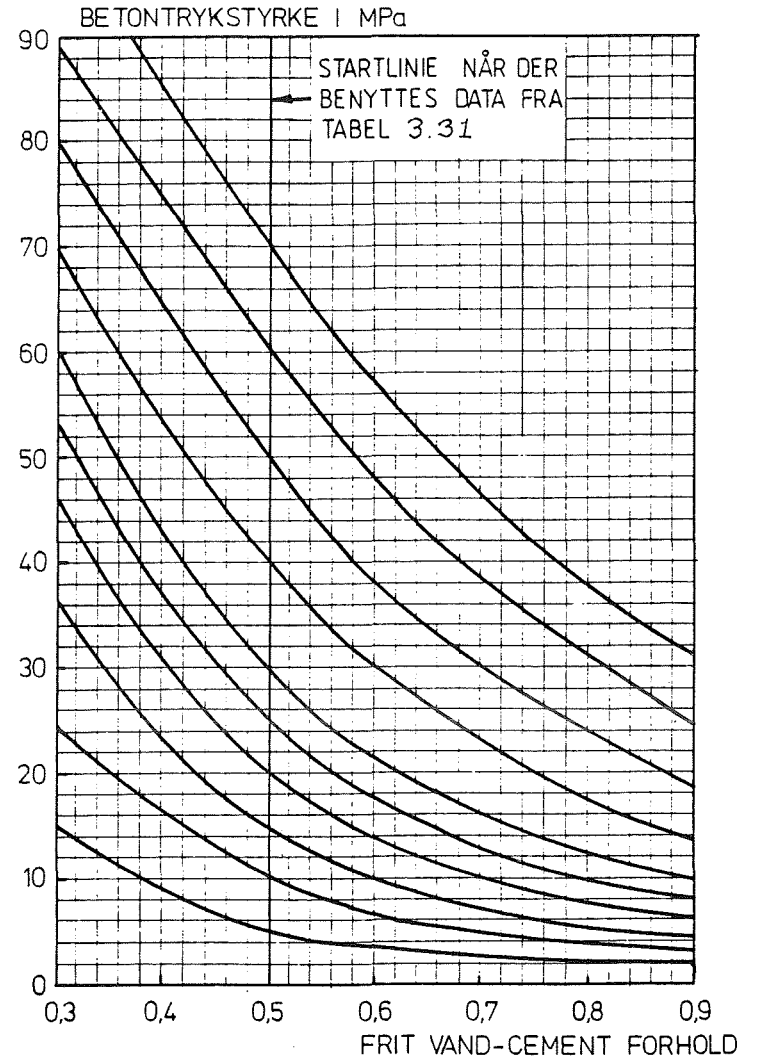
Figur 3.19 Grænsekurver for samlet betontilslag med 16 mm maksimal stenstørrelse (i henhold til DIN 1045)



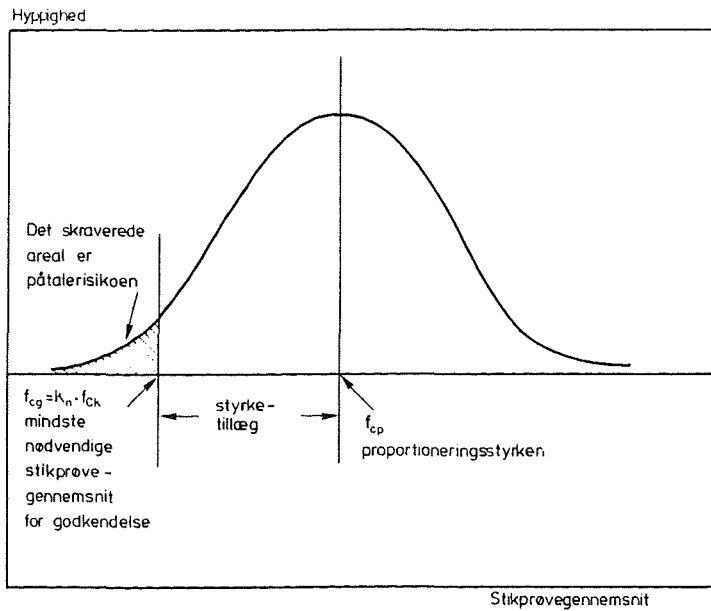
Figur 3.20 Grænsekurver for samlet betontilslag med 32 mm maksimal stenstørrelse (i henhold til DIN 1045)



Figur 3.21 Kornkurve VIII for samlet betontilslag, når 35% fint tilslag VII blandes med 65% groft tilslag.

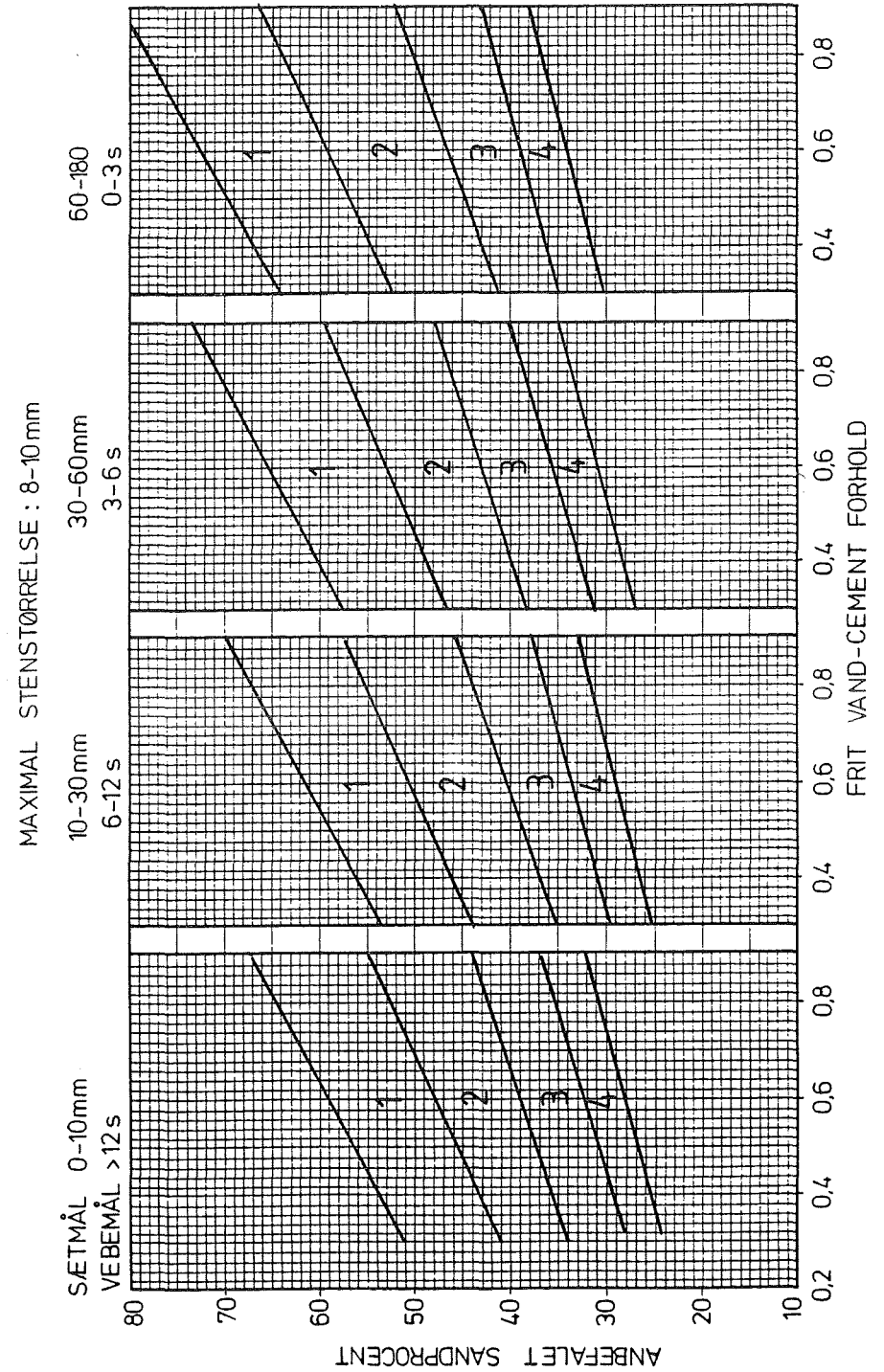


Figur 3.22 Sammenhæng mellem betontrykstyrke og frit vand-cement forhold (fra D.C. Teychenné, R.E. Franklin, and H.C. Erntroy, "Design of Normal Concrete Mixes", Department of the Environment, Building Research Establishment, HMSO, London, 1975)

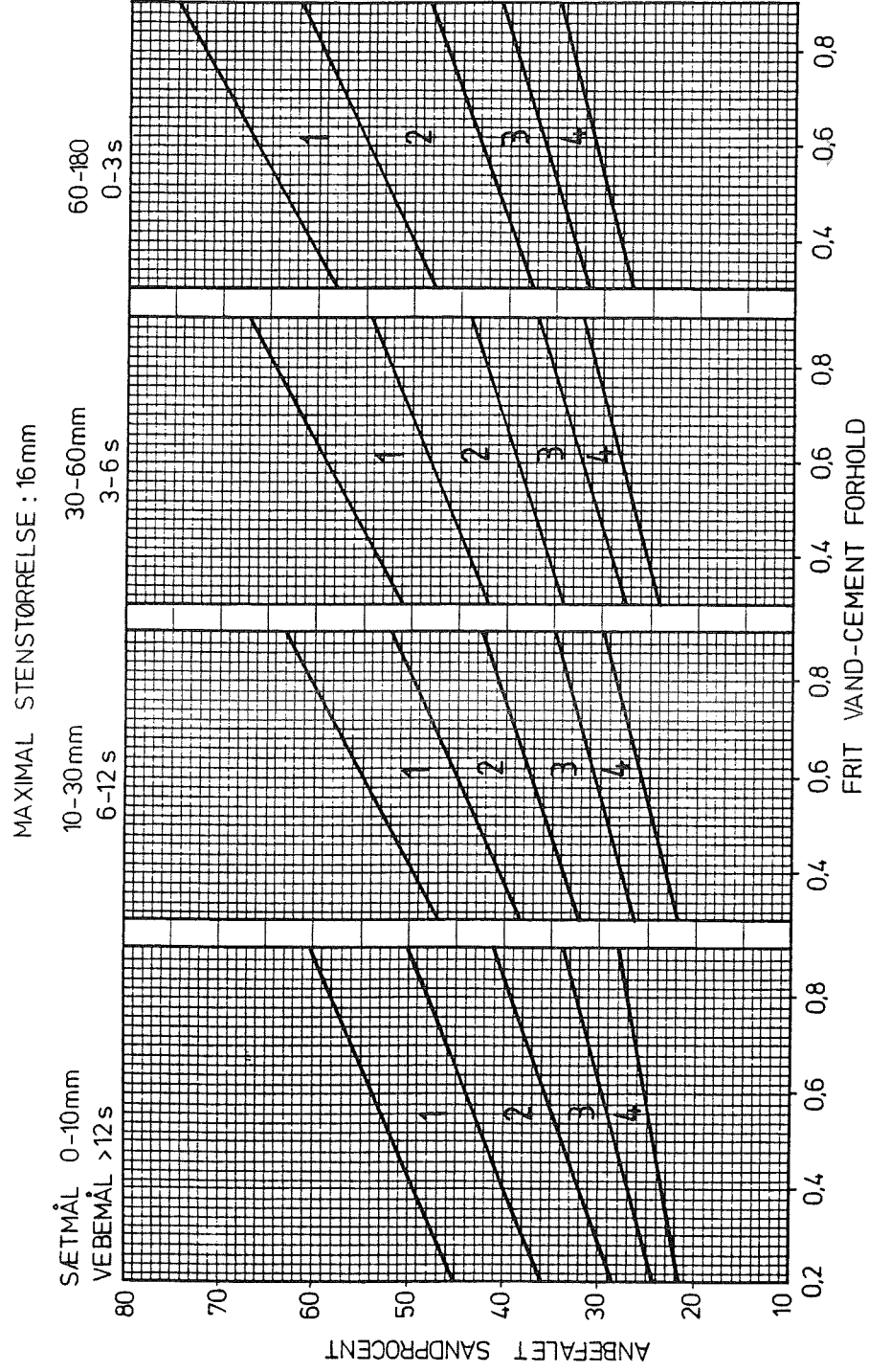


Figur 3.23 Stikprøvegennemsnittets fordelingsfunktion. Falder stikprøvegennemsnittet  $f_{cm}$  under godkendelsesstyrken  $f_{cg} = k_{\eta} f_{ck}$ , vil der finde påtale sted. Derfor er det procentuelle forhold mellem det skraverede areal og hele arealet under kurven lig med det såkaldte påtalerisiko.

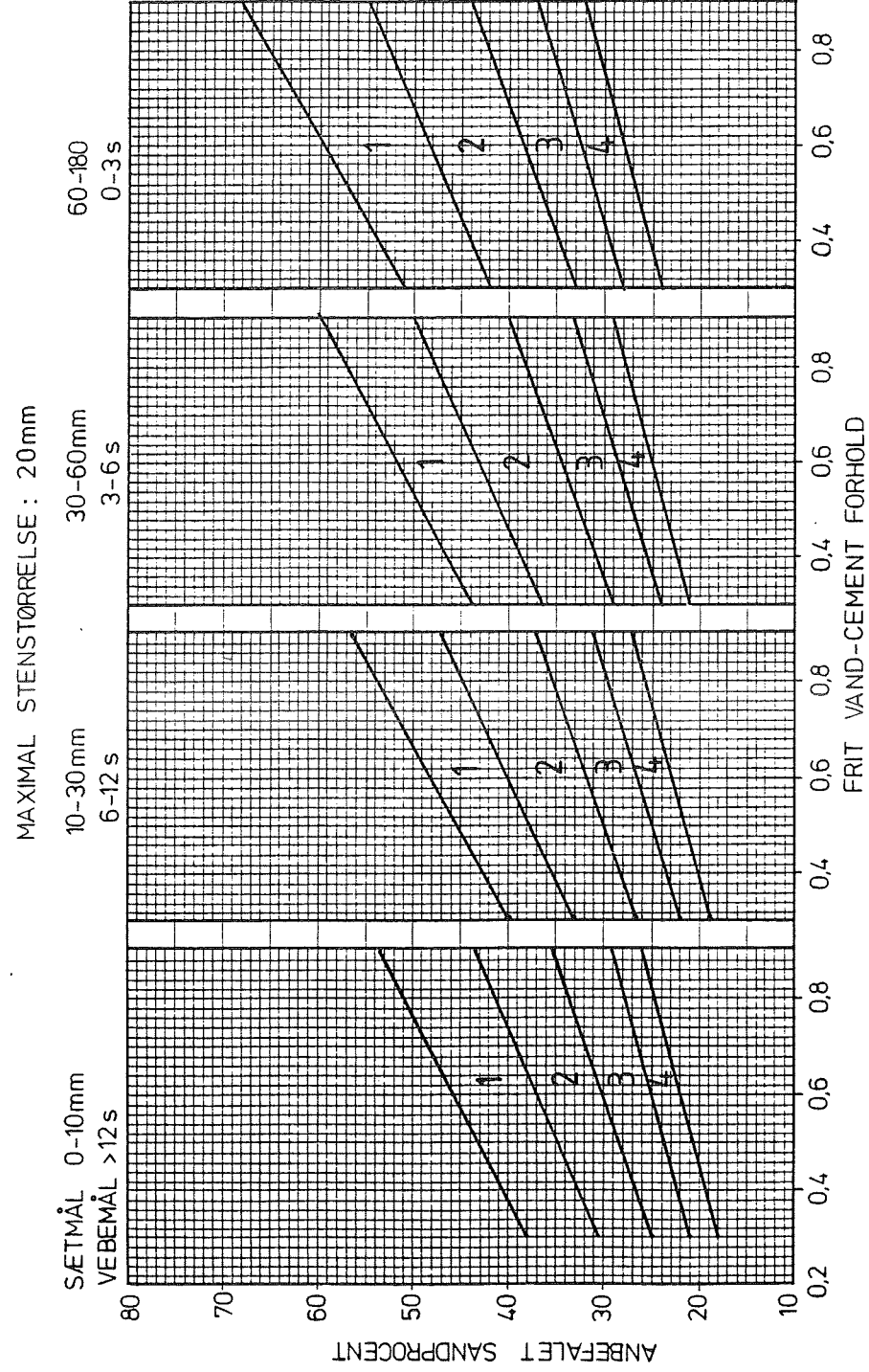
Figur 3.24a. Anbefalede sandprocenter for fint betontilslag med kornkurver i BS zonerne 1, 2, 3 og 4. Max. stenstørrelse: 8-10 mm.



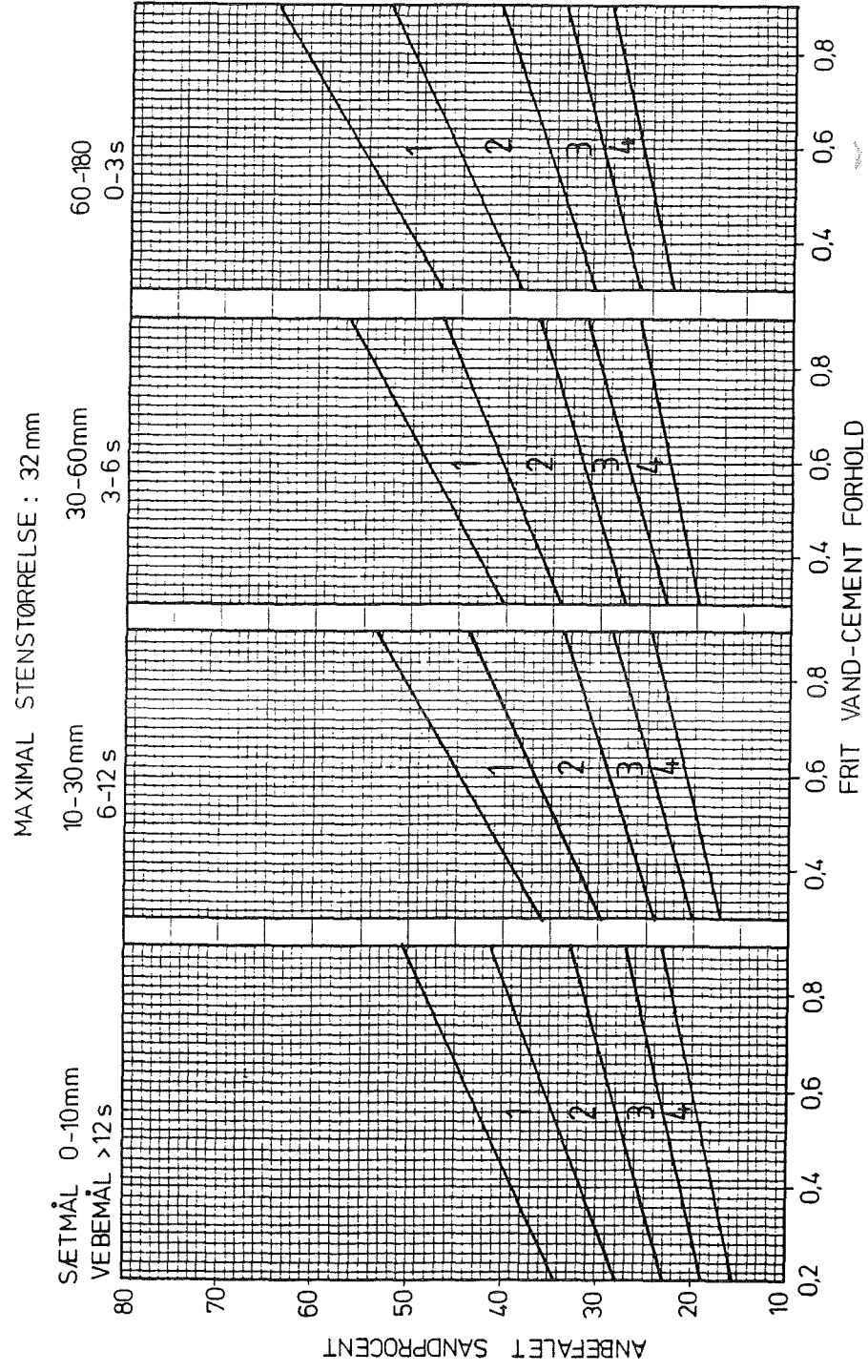
Figur 3.24b. Anbefalede sandprocenter for fint betontilslag med kornkurver i BS zonerne 1, 2, 3 og 4. Max. stenstørrelse: 16 mm.



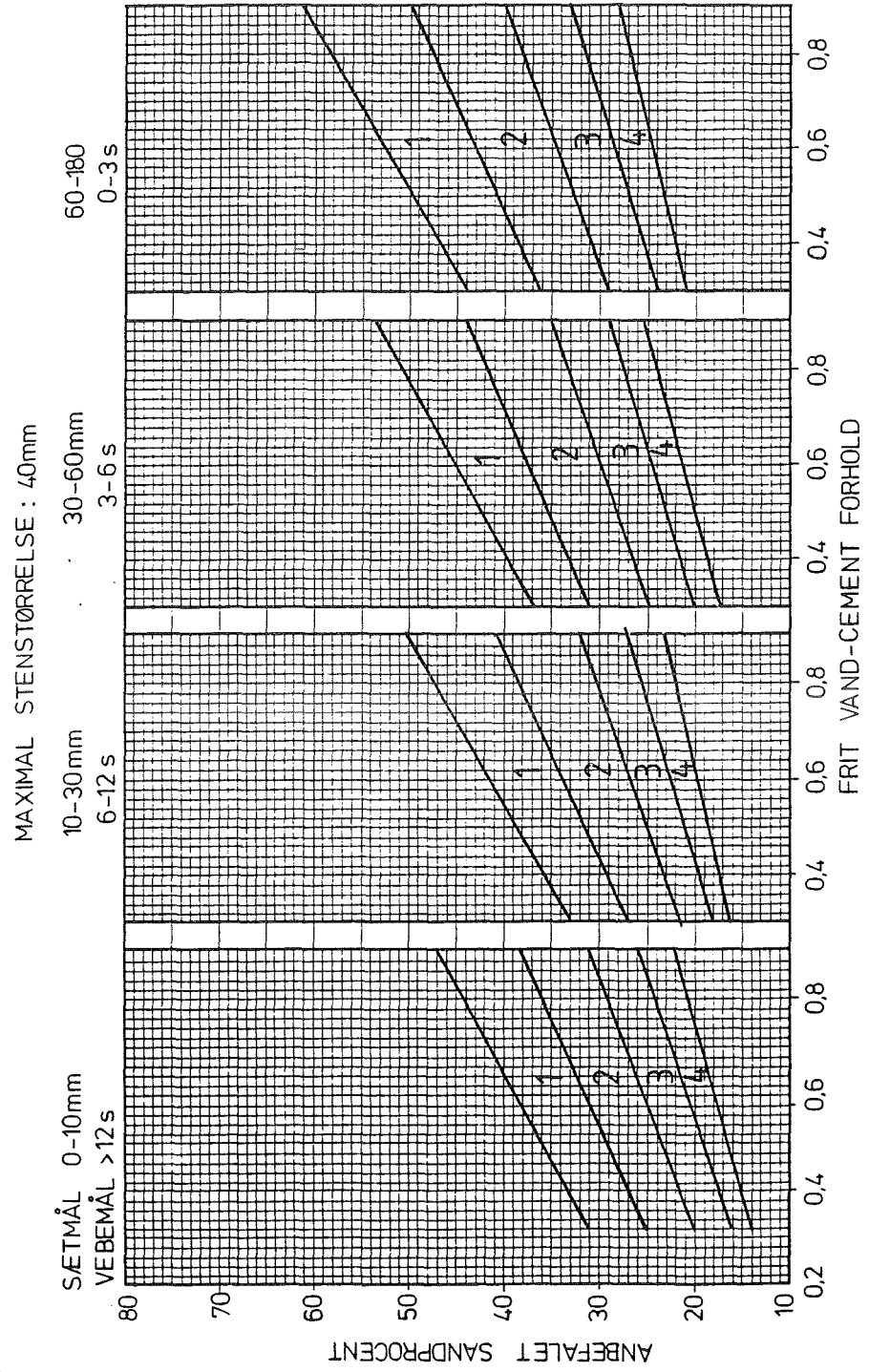
Figur 3.24c. Anbefalede sandprocenter for fint betontilslag med kornkurver i BS zonerne 1, 2, 3 og 4. Max. stenstørrelse: 20 mm.



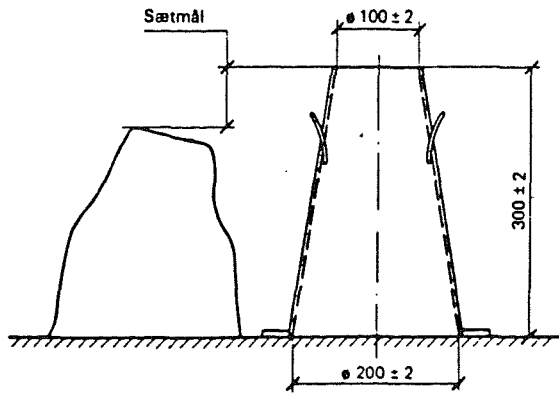
Figur 3.24d. Anbefalede sandprocenter for fint betontilslag med kornkurver i BS zonerne 1, 2, 3 og 4. Max. stenstørrelse: 32 mm.



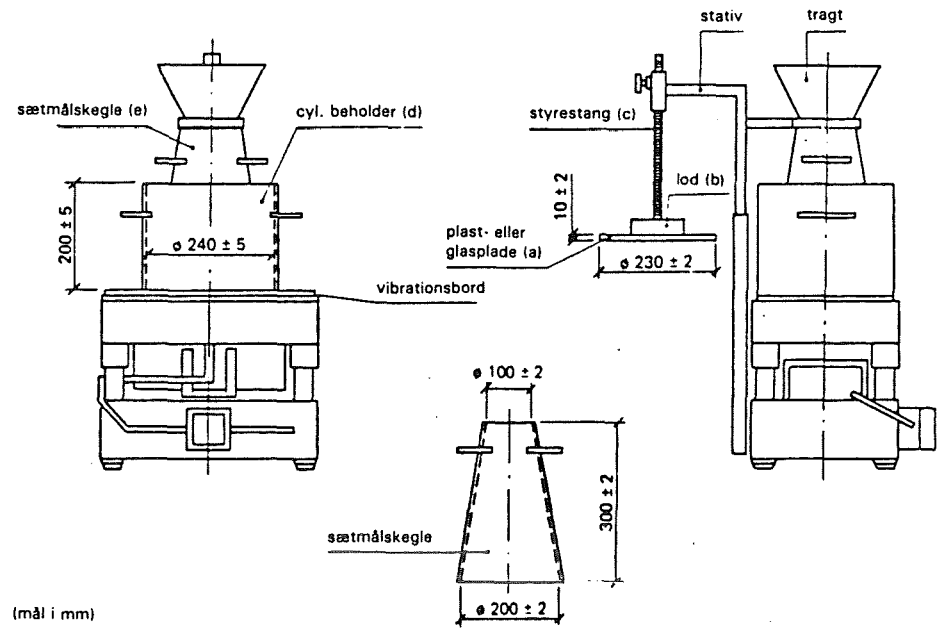
Figur 3.24e. Anbefalede sandprocenter for fint betontilslag med kornkurver i BS zonerne 1, 2, 3 og 4. Max. stenstørrelse: 40 mm.





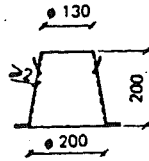


Figur 4.1 Sætmål og princip udmåling

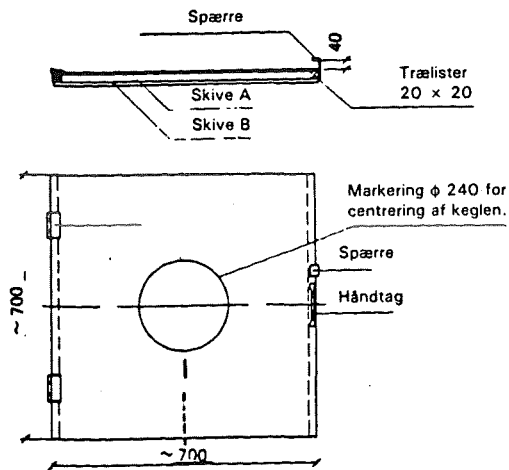


(mål i mm)

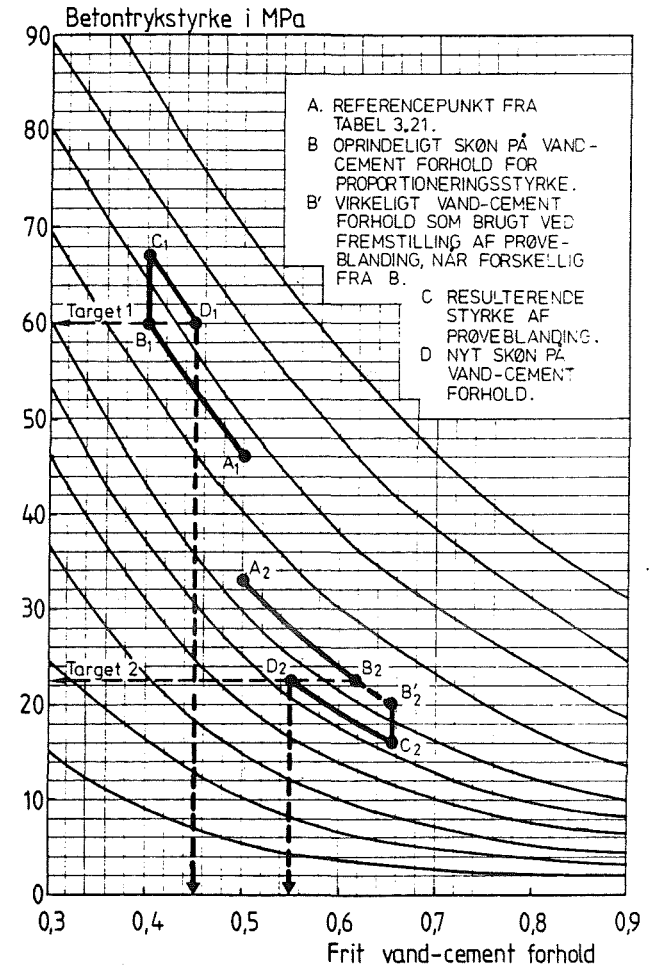
Figur 4.2 Vebeapparat



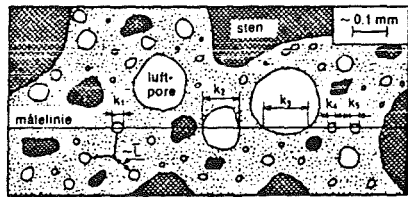
Figur 4.3 Kegle af pladejern



Figur 4.4 Faldbord



Figur 4.5 To eksempler på justering af frit vand-cement forhold på basis af resultater fra prøveblanding (fra D.C. Teychenné, R.E. Franklin, and H.C. Entroy, "Design of Normal Concrete Mixes", Department of the Environment, Building Research Establishment, HMSO, London, 1975)



Figur 4.6 Skitse af slebet betonflade med indlagt linie til måling af luftporefordeling efter "linear traverse"-metoden i ASTM C457.

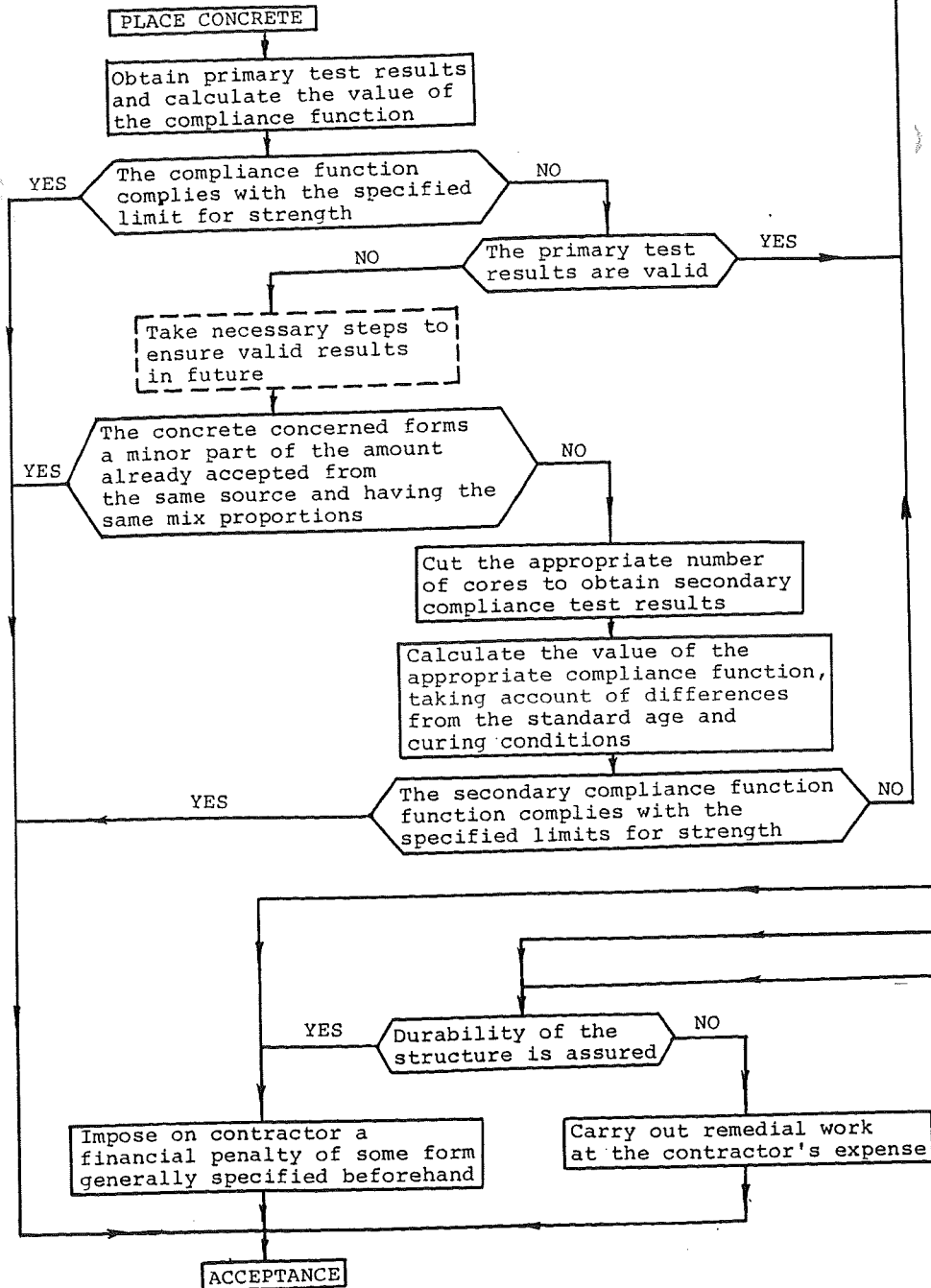


Fig.5.1 Flow-chart for actions following judgement of compliance with specifications.

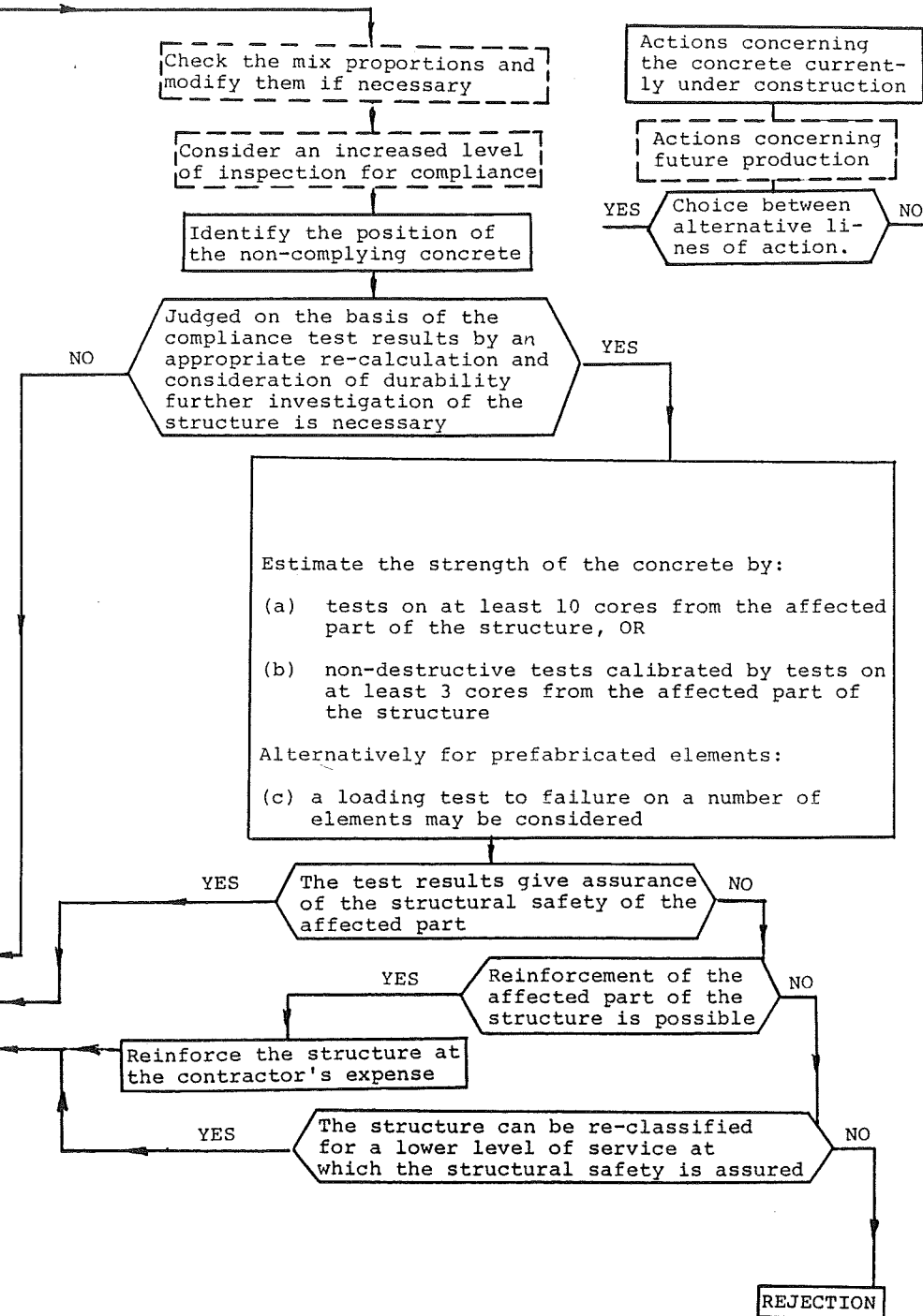
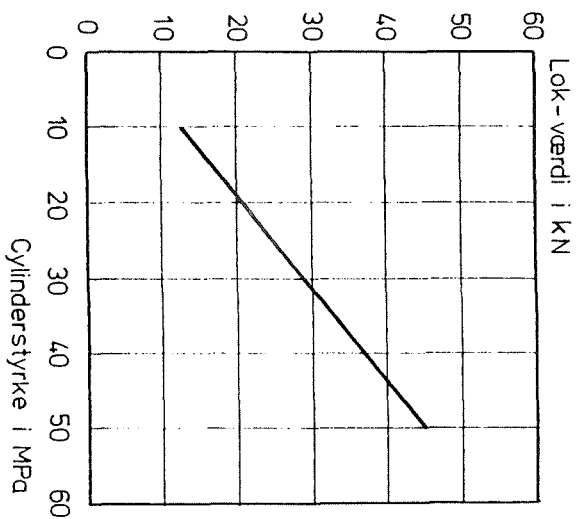


Fig.5.1 continued (From "Recommended Principles for the Control of Quality and the Judgement of Acceptability of Concrete". Bulletin d'Information, No.110, Comité Européen du Béton, Paris, May, 1975)

Figur 5.2 Sammenhæng mellem Lok-styrkemålinger og styrken af støbte betoncylindre



Tabel 3.35 Proportioneringsskema

Punkt	Anvisning	Værdier
1. Miljøklasse	Krav	Passiv/Moderat/Aggressiv/Særlig
2. Karakteristisk styrke	Krav eller tabel 2.2	$f_{ck} =$ MPa
3. Dokumentation af variationskoefficient		Foreligger/foreligger ej
4. Accelereret prøvning		Foretages/foretages ej
5. Variationskoefficient for godkendelse	Tabel 3.24 eller formel 3.12	$\delta_g =$
6. Variationskoefficient for proportionering	Tabel 3.30 eller som $\delta_g$	$\delta_p =$
7. Påtalerisiko	Tabel 3.29	% svarende til $\alpha =$
8. Stikprøvestørrelse		$n =$
9. $k_n$ -værdi	Formel 3.11	$k_n =$
10. Godkendelsesstyrke	Formel 3.10a	$f_{cg} =$ MPa
11. Proportioneringsstyrke	Formel 3.13	$f_{cp} =$ MPa
11a. Indblandet luft	Krav eller tabel 3.37 (husk at $a = L - 1$ )	$a =$ %
11b. Fiktiv proportioneringsstyrke	Punkt 11 divideret med $(1 - 0.055 \times a)$	$f'_{cp(\text{luft})} =$ MPa

Tabel 3.35 Proportioneringsskema (fortsat)

Punkt	Anvisning	Værdier
12. Cementtype og densitet	Krav og tabel 3.33	_____
13. Stentype	Krav	_____
14. Sandtype	Krav	_____
15. Vand-cement forhold af hensyn til styrke	Tabel 3.31 og figur 3.22	_____
16. Største tilladeligt vand-cementforhold af hensyn til miljøklasse	Tabel 3.15	_____
17. Vand-cement forhold ved proportionering	Brug laveste værdi af punkt 15 og 16	_____
18. Sætmål	Krav	mm
19. Største stenstørrelse	Krav	$d_{\max} =$ mm
20. Frit vandindhold	Tabel 3.32, ligning 3.14, samt ved luftindblanding afsnit 3.6.3	kg/m <sup>3</sup>
21. Cementindhold af hensyn til styrke	Punkt 20 divideret med punkt 17	kg/m <sup>3</sup>
22. Største tilladeligt cementindhold af hensyn til varmeudvikling	Evt. krav	kg/m <sup>3</sup>
23. Mindste tilladeligt cementindhold af hensyn til holdbarhed	Evt. krav	kg/m <sup>3</sup>

Tabel 3.35 Proportioneringsskema (fortsat)

Punkt	Anvisning	Værdi			
24. Cementindhold ved proportionering	Brug den mindste værdi af punkt 21 og 22 eller den største værdi af punkt 21 og 23	kg/m <sup>3</sup>			
25. Sandgradering	Figur 3.10 til 3.13	Zone			
26. Reel sandprocent	Figur 3.24, samt ved luftindblanding afsnit 3.6.3	%			
27. Tilsyneladende sandprocent	Formel 3.4	%			
28. Tilslagets densitet	Formel 3.28 og 3.29	kg/m <sup>3</sup>			
29. Samlet indhold af tilslag	Formel 3.18	kg/m <sup>3</sup>			
30. Indhold af sand	Formel 3.19	kg/m <sup>3</sup>			
31. Indhold af sten	Formel 3.20	kg/m <sup>3</sup>			
Mængder af tilslag i vandmættet overfladetør tilstand	Cement	Vand	Sand	Sten	Forventet densitet hos frisk beton kg/m <sup>3</sup>
32. kg/m <sup>3</sup>					
(Husk herudover at anføre mængder af evt. tilsætningsstoffer i blanderecepten)					
33. kg pr. 1 sats					

Tabel 3.36 Justering af satsvægte for fugtindhold i tilslag. Satsstørrelse \_\_\_\_\_ 1

Materialefraktion nr.	I	II	III	IV	V	VI	VII
Vandabsorptionsevne, i % (A)							
Virkeligt fugtindhold, i % (B)							
C = (A - B) i % (angiv tegn + eller -) Fugt absorberes af tilslaget, når C er positiv. Der er frit vand til stede i tilslaget, når C er negativ							
Betonens indhold af tilslag i vandmættet, overfladetør tilstand (G)							
Indhold af tilslag i kg, justeret for fugt i tilslaget $\left(\frac{100 + B}{100 + A}\right) \times G$							
Justering af blandevand for fugt i tilslaget, i l $\left(\frac{C}{100 + A}\right) \times G$ (angiv tegn + eller -)							
Samlet justering af blandevand, i l, lig med summen af ovenstående justeringer for de enkelte materialer $\sum \left(\frac{C}{100 + A}\right) \times G =$ _____ liter Hvis summen er positiv, øges mængden støbevand med det beregnede antal liter Hvis summen er negativ, reduceres mængden blandevand med det beregnede antal liter							

1	2	3	4	5	6	7
Sigte, fri maskevidde mm	Sand			Sten		
	tilbageholdt g	gennemfald		tilbageholdt g	gennemfald	
		g	%		g	%
64						
32						
16						
8						
4						
2						
1						
0.5						
0.25						
0.125						
bundkar						
Sum						

Tabel 3.0 Skema til brug ved sigteanalyse af tilslagsmaterialer

NØGLE TIL FORMLER

Der henvises til den side i kompendiet, på hvilken formelen optræder første gang.

Formel nr.	Side nr.	Formel nr.	Side nr.
3.0	57	3.27	155
3.0a	57	3.28	156
3.1	60	3.29	157
3.1a	72	3.30	166
3.2	78	3.31	173
3.3	79	3.32	173
3.4	79	4.1	213
3.5	117	4.2	213
3.6	118	4.3	213
3.7	118	5.1	225
3.8	118	5.2	226
3.9	120		
3.10	124		
3.10a	131		
3.11	125		
3.12	128		
3.12a	130		
3.13	132		
3.13a	132		
3.14	138		
3.15	139		
3.16	141		
3.17	141		
3.18	142		
3.19	142		
3.20	143		
3.21	146		
3.22	149		
3.23	150		
3.24	150		
3.25	150		
3.26	154		

NØGLE TIL TABELLER

Tabel nr.	Side nr.	Tabel nr.	Side nr.
2.1	21	3.26	129
2.2	22	3.27	130
2.3	25	3.28	131
2.4	28-29	3.29	132
2.5	30	3.30	134
2.6	33	3.30 (tomt skema)	309
2.7	35	3.31	136
2.8	37-39	3.32	138
2.9	39-40	3.33	142
3.0	48	3.34	151
3.1	51	3.35	160-162
3.2	52	3.35 (tomt skema)	305-307
3.3	52	3.36	163
3.4	53	3.36 (tomt skema)	308
3.5	54	3.35a	176-178
3.6	56	3.37	165
3.7	59	4.1	182
3.8	59	4.2	182
3.9	61	5.1	217
3.10	62	5.2	227
3.11	64	5.3	228
3.12	70	5.4	229
3.13	73	5.5	230
3.14	80	5.6	231
3.15	85	5.7	232
3.16	88	5.8	233
3.17	90	5.9	234
3.18	92	5.10	234
3.19	108	5.11	237-239
3.20	111		
3.21	113		
3.22	125		
3.23	126		
3.24	127		
3.25	128		



NØGLE TIL FIGURER

Figur nr.	Side nr.	Figur nr.	Side nr.
2.1	264	4.2	297
2.2	265	4.3	298
2.3	265	4.4	298
2.4	265	4.5	299
2.5	265	4.6	300
2.6	266	5.1	302-303
2.7	266	5.2	304
2.8	266		
3.0	267		
3.1	268		
3.2	269		
3.3	270		
3.4	271		
3.5	272		
3.6	273		
3.7	274		
3.8	275		
3.9	276		
3.10	277		
3.11	278		
3.12	279		
3.13	280		
3.14	281		
3.15	282		
3.16	283		
3.17	284		
3.18	285		
3.19	286		
3.20	287		
3.21	288		
3.22	289		
3.23	290		
3.24	291-295		
4.1	296		