

6.0 Proportioneringsmetoder

Betonhåndbogen

Kapitel 6:
Proportionering

Udgivet af

Dansk Betonforening
18.02.2026
Version 1.1

Forfattere

Gitte Normann
Munch-Petersen



Indholdsfortegnelse

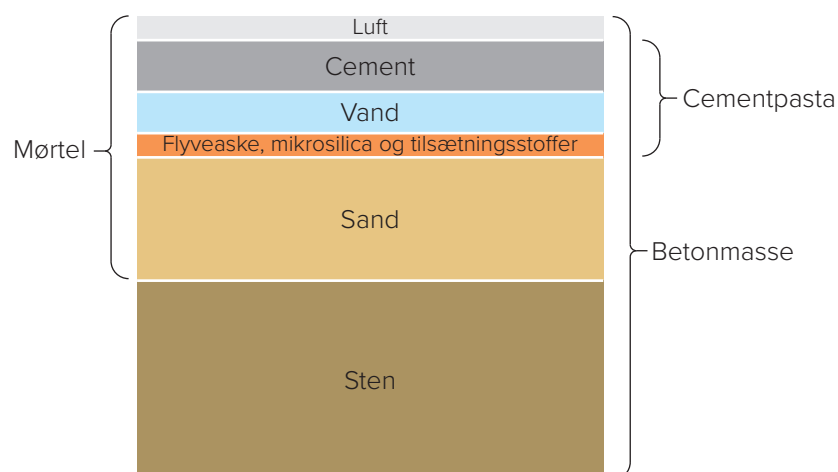
6.0.0	Indledning	3
6.0.1	Forudsætninger for proportionering	6
6.0.2	Sammensætning af tilslag	7
6.0.2.1	Kornkurve	7
6.0.2.2	Pakningsberegninger	7
6.0.2.3	Sandprocent	8
6.0.2.4	Idealkornkurver - Fullerkurven	9
6.0.3	Vandbehov	12
6.0.3.1	Parametre der har indflydelse på vandbehovet	12
6.0.3.2	Fastsættelse af vandbehov	12
6.0.4	Cementbehov	13
6.0.4.1	Krav til v/c-forhold	13
6.0.4.2	Styrkekrav	13
6.0.5	Beregningsgang ved proportionering	15
6.0.5.1	Krav til sammensætning og egenskaber:	15
6.0.5.2	Betonproportionering - den teoretiske sammensætning	16
6.0.5.3	Blanderecept	16
6.0.5.4	Eksempel på betonproportionering	16
6.0.6	Fugtindhold i tilslagsmaterialer	19
6.0.6.1	Eksempel på justering af vandmængden (fortsat fra 6.1.5.4)	21
6.0.7	Prøveblanding og korrektioner	22
6.0.7.1	Korrektion af sætmål	22
6.0.7.2	Korrektion af styrken	23
6.0.7.3	Eksempel: Prøveblanding og korrektioner	23
6.0.8	Proportionering af SCC	24
6.0.8.1	Sammensætning af SCC	24
6.0.8.2	Eksempel på proportionering af SCC beton	26
6.0.9	Litteratur	28

6.0.0 Indledning

Beton kan beskrives som bestående af tilslagsmaterialer - sand og sten - der er limet sammen med cementpasta – primært cement og vand. Ved proportionering af beton, kan denne simple materialemodel med fordel anvendes som grundlag.

I cementpasta indgår udover cement og vand ofte tilsætninger (flyveaske, mikrosilica, kalkfiller o.a.). Desuden indeholder beton luft.

Figur 1
Begreber knyttet til betonmassen. Cementpasta (eller blot pasta) er den lim, der limer tilslaget (sten plus sand) sammen.



Beton kan beskrives som bestående af tilslagsmaterialer - sand og sten - der er limet sammen med cementpasta – primært cement og vand. Ved proportionering af beton, kan denne simple materialemodel med fordel anvendes som grundlag.

I cementpasta indgår udover cement og vand ofte tilsætninger (flyveaske, mikrosilica, kalkfiller o.a.). Desuden indeholder beton luft.

Fordelen ved denne materialemodel er, at man kan begynde sin proportionering med at se på tilslagene og cementpastaen hver for sig, og først i den endelige proportionering sammensætte tilslag og cementpasta til beton.

Generelt gælder:

- **Cementpasta:** Cementpasta består primært af cement og vand. Da cement er den dyreste komponent i beton, ønsker man normalt at bruge så lidt cement som muligt. Den nødvendige cementmængde afhænger af kravene til styrke og v/c-forhold, og også af et evt. ønske om en god bearbejdelighed og pumpbarhed.
- **Tilslagsmaterialer:** Tilslagsmaterialerne skal kunne pakkes tæt, da den resterende del af volumen skal udfyldes med den dyrere cementpasta, men samtidig må pakningen ikke blive så tæt, at betonen ikke har den nødvendige bearbejdelighed.

Vand spiller en særlig rolle, fordi vand dels indgår som hærder for cementen, dels fungerer som middel til at gøre betonen mere flydende.

Hvis vandmængden i en betonproportionering øges – fx for at øge bearbejdeligheden – skal der samtidigt tilsættes yderligere cement for at sikre, at såvel krav til styrke som v/c forhold overholdes.

Der vil blive gennemgået to metoder for proportionering, der anvender materialemodellen:

- Metode 1: Optimering ud fra kornkurve og cementpasta
- Metode 2: Optimering ud fra pakning og pastaoverskud

Tabel 1

Metode 1 - Proportionering ud fra optimering af kornkurve og cementpasta.

Pastavolumen	Tilslagsvolumen
1. Vandmængden bestemmes ud fra: ■ Sætmål ■ Tilslagstype ■ Maksimal stenstørrelse ■ Luftindhold	3. Sammensætning af tilslag: ■ Idealkurve (Fuller) ■ Sandprocent
2. Cementmængden bestemmes ud fra: ■ Krav til v/c-forhold ■ Styrkekrav	4. Tilslagsvolumen: ■ Tilslagsvolumen beregnes ud fra pastavolumen + luft ■ Tilslagsvolumen fordeles på de enkelte graderinger

Tabel 2

Metode 2 - Proportionering ud fra optimering af pakning og pastaoverskud.

Tilslagsvolumen	Pastavolumen
1. Sammensætning af tilslag og bestemmelse af pakningsgrad: ■ Pakningsberegning	2. Pastaoverskud bestemmes ved: ■ Sætmålsbeton: v/c-forhold ■ SCC-beton: Materialetype og Luftindhold
3. Tilslagsvolumen: ■ Tilslagsvolumen bestemmes ud fra pakningsgrad og pastaoverskud ■ Tilslagsvolumen fordeles på de enkelte graderinger	4. Pastavolumen: ■ Pastavolumen bestemmes ud fra tilslagsvolumen og øvrige delmaterialer (herunder luft)

Metode 1 er den traditionelle metode, der er egnet til sætmålsbeton, der skal vibreres. Metoden kan anvendes til beton uden tilsætningsstoffer.

Metode 2 er egnet til bløde og mørtelrige sætmålsbetoner (fx pumpebeton) samt til SCC-beton. SCC-beton kan ikke sammensættes uden tilsætningsstoffer og metoden forudsætter i praksis brug af tilsætningsstoffer.

Der findes en mange muligheder for at sammensætte beton. Alle disse sammensætninger kan kaldes beton – kun få er god beton! I tabel 3 er der vist typiske eksempler på hvordan man kan sammensætte beton i forskellige miljøklasser.

Tabel 3

Tre eksempler på betonsammensætninger (blandingsforhold) anvendt i virkelige konstruktioner i tre miljøklasser.

Materiale	Passiv Kg/m ³	Moderat Kg/m ³	Aggressiv Kg/m ³	Ekstra aggressiv Kg/m ³
Cement	(Rapid) 205	(Rapid) 339	(Lavalkali) 300	(Lavalkali) 375
Mikrosilica			13,0	22,5
Flyveaske	57,4	61,0	39,0	50,6
Vand	166	152	145	153
Luftindblanding	0,3	0,8	1,5	2,7
Plastificering	1,6	2,4	-	1,8
Superplastificering	-	1,6	2,6	2,5
Sand	813	687	700	589
Sten 4/8	248	213	380	181
Sten 8/16	743	851	268	298
Sten 16/22			534	586
Tilslag ialt	1804	1751	1882	1654
Beton ialt	2234	2308	2383	2262

Metode 1 er den traditionelle metode, der er egnet til sætmålsbeton, der skal vibreres. Metoden kan anvendes til beton uden tilsætningsstoffer.

Metode 2 er egnet til bløde og mørtelrige sætmålsbetoner (fx pumpebeton) samt til SCC-beton. SCC-beton kan ikke sammensættes uden tilsætningsstoffer og metoden forudsætter i praksis brug af tilsætningsstoffer.

Der findes en mange muligheder for at sammensætte beton. Alle disse sammensætninger kan kaldes beton – kun få er god beton! I tabel 3 er der vist typiske eksempler på hvordan man kan sammensætte beton i forskellige miljøklasser.

Betonproportionering drejer sig om at sammensætte disse betonrecepter, ud fra krav til fx styrke og holdbarhed. Der vil i dette kapitel blive taget udgangspunkt i, hvordan en beton sammensættes ved håndberegninger.

Proportionering i dagligdagen

Ofte vil proportionering på et betonværk foregå på en meget simpel måde. Betonværket har et antal recepter, som man kender og har dokumentation for. Man kender disse recepters konsistens, luftindhold og styrke, og har erfaring for, hvorledes man kan ændre fx sætmålet op eller ned ved at lave mindre ændringer i blandingsforholdet.

Hvis en kunde ønsker leveret en beton, som man ikke har i receptarkivet, tager man udgangspunkt i en kendt recept og ændrer på den i ønsket retning. Man anvender ved disse ændringer metoder som Bolemey's og Popovic's formler, men ofte uden at vide det, fordi disse formler er indbygget i procescomputerens styresystem.

I andre tilfælde giver recepten "næsten sig selv". Hvis fx der kræves en beton med et minimumscementindhold på 300 kg/m³ og $v/c \leq 0,45$ er det umiddelbare udgangspunkt et cementindhold på 310 kg/m³ – for at ligge ca. doseringsnøjagtigheden på 3 % over kravgrænsen – og derefter kan vandindholdet sættes til 0,42 gange 310 = 130 liter. Det er i praksis for lidt vand, fordi betonen bliver svær at arbejde med, så man øger vandindholdet til fx 145 liter, og tilsætter desuden 70 kg af flyveaske. Det giver et v/c-forhold på: $145/(310 + 0,5 \cdot 70) = 0,42$. Man udfører nu en prøveblanding med 310 kg cement, 70 kg flyveaske, 700 kg sand (det plejer at passe) og sten med en passende korkurve for resten. Tilbage er kun, at finde den rette mængde superplast, men 3 kg er et godt udgangspunkt. Når denne metode i praksis lader sig gøre, skyldes det, at fabrikkens indkøbte tilslagsmaterialer har en til betonproduktion egnet kornkurve.

6.0.1 Forudsætninger for proportionering

Ved proportionering af beton, må der tages udgangspunkt i de materialer, man har til rådighed og i de krav, der stilles til betonen. Det vil typisk være:

1. Styrke
2. Holdbarhed
3. Konsistens
4. Maksimal stenstørrelse
5. Pris

Fremover forventes også betonens miljøpåvirkning – fx formuleret som CO₂-fodaftrykket – at få betydning.

Den projekterende stiller krav til, hvor stor styrke betonen skal have, for at kunne bære belastningerne, og til holdbarheden for at sikre konstruktionens levetid.

Entreprenøren stiller desuden krav til betonens konsistens for at sikre, at det er muligt at lave en ordentlig udstøbning af betonen med en korrekt udfyldning af formen. Derudover vil entreprenøren i nogle tilfælde stille krav til fx afbindingstidspunkt, varmeudvikling og styrkeudvikling.

Sidst - men ikke mindst - er prisen for betonen vigtig. Cement er meget dyrere end tilslagsmaterialer (sand og sten). Man bør derfor tilstræbe at anvende så lidt cement og så meget tilslag som muligt. Udover den højere pris, medfører et højt cementindhold også en kraftigere varmeudvikling samt større svind og krybning.

Dette kapitel vil i sin beskrivelse af Metode 1 tage udgangspunkt i, hvordan man proportionerer beton uden brug af plastificerende tilsætningsstoffer. Når der ikke er tilsat plastificering, er det primært tilslaget, der styrer vandbehovet. Ud fra et skøn over tilslagets vandbehov, kan cementmængden bestemmes ud fra krav til styrke og v/c-forhold. Herved kan proportioneringens "kunst" bedre beskrives. Betoner proportioneret på denne måde kan efterfølgende forbedres (vand kan spares med plastificeringsmidler). Plastificering – og andre tilsætningsstoffer - kan også simplificere proportioneringen, fordi de i nogen grad kan gøre en dårlig proportionering bedre.

6.0.2 Sammensætning af tilslag

For at kunne gennemføre en proportionering skal de mulige tilslags kornstørrelsesfordeling (kornkurve) og densitet i vandmættet overfladetør tilstand kendes. Opgaven er nu, at bestemme det blandingsforhold af typisk to eller tre graderinger, der giver det optimale blandingsforhold med den bedst egnede samlede kornkurve.

6.0.2.1 Kornkurve

Den samlede kornkurve af tilslagsmaterialerne har primært indflydelse på bearbejdigheden af betonen:

1. Overfladearealet af tilslagsmaterialerne har betydning for hvor meget cementpasta, der skal bruges for at dække alle partikler. Jo større partikler, jo mindre overfladeareal, og jo mindre pasta er nødvendigt.
2. Pakningen af tilslagene har betydning, fordi godt pakkede tilslag minimerer hulrummene mellem tilslagene og reducerer den nødvendige pastamængde. For tæt pakning kan dog give en beton med en lav bearbejdighed.
3. Mængden af finstof i tilslaget har betydning, fordi tilslagets finstof sammen med cement, flyveaske, mikrosilica mv. bidrager til sammenhæng og smøring mellem de grovere tilslagskorn

Der er flere forskellige metoder til at bestemme sammensætningen af tilslagsmaterialerne. Vi vil her se på:

1. Pakningsberegninger
2. Sandprocent
3. Idealkornkurver

Pakningsberegninger er den teoretisk bedste metode. Brug af sandprocent er en nem og hurtig tilgang til proportionering, og anvendelse af idealkornkurver er også forholdsvis enkelt, fordi idealkornkurver er udviklet til at give en god pakning og bygger på praktiske erfaringer. Idealkornkurver tager dog ikke så meget hensyn til detaljer ved tilslagene som pakningsberegninger.

6.0.2.2 Pakningsberegninger

EDB-programmer til pakningsberegninger gør det muligt at finde den optimale sammensætning og type af tilslagsmaterialer.

Som inddata anvendes for hvert tilslagsmateriale en kornstørrelsesfordeling, en korndensitet og en eksperimentelt bestemt egenpakning. Der findes pakningsprogrammer, der beregner på konsekvensen af forskellige blandingsforhold – og kan finde det blandingsforhold, der giver den tætteste pakning.

Pakning er et mål for hvor stort et faststofvolumen et materiale optager i en beholder. Som eksempel kan vi se på pakningen i et rum, der er udfyldt med kugler. Den er bestemt ved brøken:

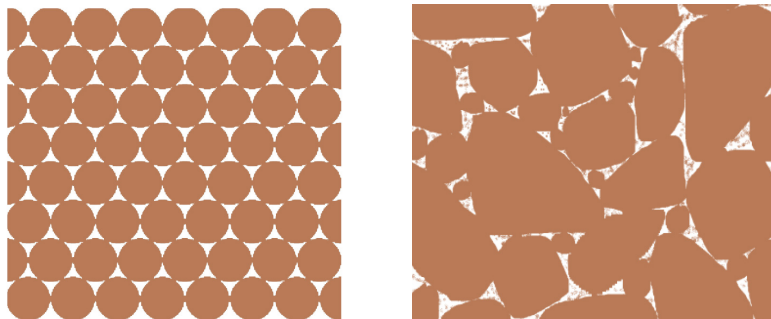
$$\text{Pakning} = \frac{\text{Samlet volumen af kuglerne}}{\text{Volumen af rummet}}$$

Pakningen (eller pakningstætheden) er altså et tal mellem 0 og 1. Den tætteste kuglepakning for lige store kugler er den fladecentrerede kubiske pakning med en pakning på 0,74, mens middelværdien for tilfældig kuglepakning, hvor kuglerne blot hældes ned i beholderen, er 0,54, hvis beholderen rystes øges pakningen til 0,64.

Disse værdier kan ikke anvendes for tilslag, da tilslagskorn hverken er kugler eller lige store. Et givet tilslagsmateriale vil have en største pakning – det kaldes materialets egenpakning. Naturlige sten vil typisk have en egenpakning på 0,58 – 0,69, afhængig af deres form og overfladestruktur. En hensigtsmæssig metode til bestemmelse af egenpakning af tilslagsmaterialer er beskrevet i afsnit 6.1.8 samt [1].

Figur 2

Til venstre: Kuglepakning med lige store kugler
Til højre: Pakning af tilslagsmaterialer med forskellige kornstørrelse og –form. I beton er tilslag sjældent pakket så tæt som på figuren.



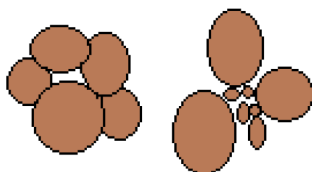
6.0.2.3

Sandprocent

Anvendelse af sandprocent er en forenklet model til at sammensætte tilslagsmaterialerne. Metoden kan anvendes på naturlige tilslagsmaterialer med almindelige kornkurver.

Figur 3

Pakning af sandkorn.



Hvis antallet af små korn bliver for stort, vil stenene blive skubbet fra hinanden. Hvis antallet af små korn er for lille, vil stenene gnide mod hinanden, hvilket giver en dårlig bearbejdelighed. Volumenforholdet mellem sand og sten udtrykkes ved sandprocenten.

$$SA\% = \frac{SA}{SA + ST} \cdot 100$$

Hvor: SA: Sand
ST: Sten

Den optimale sandprocent afhænger af andre faktorer, der også har indflydelse på betonens bearbejdelighed, primært cementindholdet og den største stenstørrelse. I tabel 4 ses en erfaringsmæssig oversigt over den nødvendige sandprocent for vibreret beton.

Tabel 4

Omtrentligt sandindhold i % af samlet tilslag [2].

Cementindhold [Kg/m ³]	Sandprocent				
	Største kornstørrelse [mm]				
	8	12	16	32	64
150	69	56	51	42	40
200	68	55	50	41	39
250	67	54	49	40	38
300	66	53	47	38	36
350	65	51	45	36	34
400	63	49	43	34	32
450	61	47	41	32	30

Da cementpastaen har indflydelse på friktionen mellem stenene og da også cementen fylder mellem sten-kornene, afhænger den optimale sandprocent som det ses af cementindholdet, og dermed mængden af mørtel. Øges cementindholdet, falder den nødvendige sandmængde.

Også stenstørrelsen har indflydelse på sandprocenten, da store sten har mindre specifik overflade (forholdet mellem overflade og rumfang) - og er færre i antal - hvilket medfører færre berøringspunkter. Jo større $d_{\max}$, des lavere sandprocent.

Eksempel

Den "Aggressive" betonblanding i Tabel 3 indeholder 1882 kg tilslag. Med et cementindhold på 300+19+39 (her indregnes også tilsætninger) = 352 kg angives sandprocenten i tabellen til 45 % ved 16 mm tilslag, og 36 % ved 32 mm tilslag. I recepten er største stenstørrelse 22 mm, hvilket giver en sandprocent på ca. 41 % svarende til 41 % af 1882 = 770 kg. I recepten er sandindholdet kun 700 kg, men det skal erindres, at der er underkorn i stenfraktionerne, hvilket giver et tillæg til sandet (materiale mindre end 4 mm).

6.0.2.4 Idealkornkurver - Fullerkurven

I 1907 udarbejdede Fuller på baggrund af et stort antal praktiske forsøg en generel kornkurve, som giver et godt bud på, hvordan den optimale kornkurve for tilslaget skal være. En sådan kornkurve kaldes en idealkornkurve, og andre end Fuller har senere fremtaget tilsvarende idealkornkurver. Når Fullerkurven anvendes som idealkurve ved proportionering, får man en fornuftig pakning af tilslaget.

Fullerkurven er defineret ved udtrykket: $p = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{d_{\max}}}$

Tabel 5

Fullerkurven for $d_{\max} = 32$ mm.

Maskevidde d [mm]	Gennemfald [%]
32	100
16	71
8	50
4	35
2	25
1	18
0,5	13
0,25	9
0,125	6
0,063	4,4

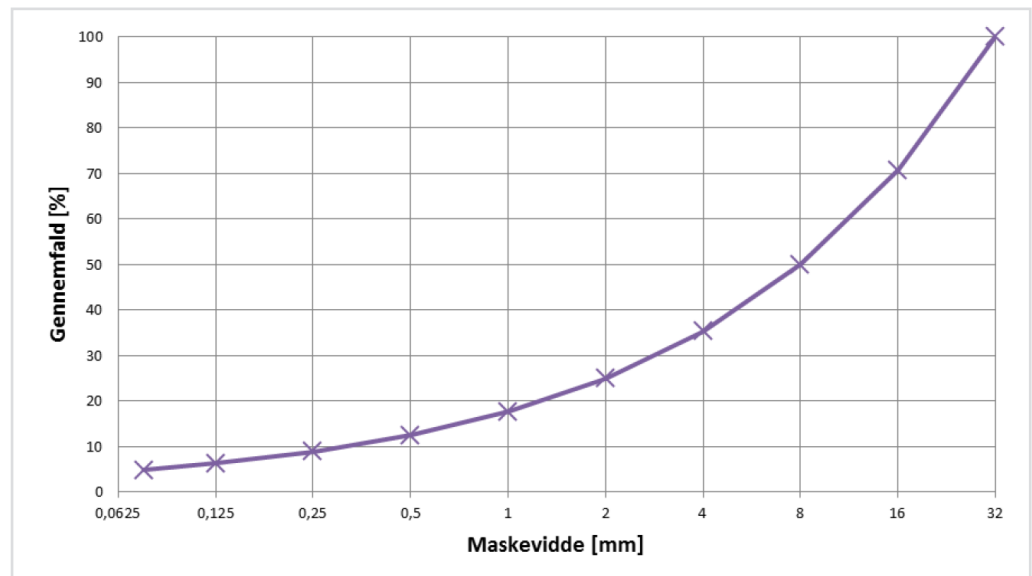
Antag at vi (som normalt) har et antal tilslagsmaterialer, der skal blandes i et bestemt forhold, for at kunne få en kornkurve der bedst muligt svarer til den ønskede idealkurve. I nedenstående eksempel er vist 3 materialer – et sand- og to stenmaterialer.

Tabel 6

Eksempel med 3 viste materialer – et sand- og to stenmaterialer.

Sigter [mm]	Gennemfalds %			
	Sand SA	Sten 4/8 ST ₁	Sten 8/16 ST ₂	Fuller
32	100	100	100	100
16	100	95	85	71
8	100	92	7	50
4	100	75	0	35
2	96	6	0	25
1	84	1	0	18
0,5	68	1	0	13
0,25	52	0	0	9
0,125	20	0	0	6
0,075	2	0	0	5

Figur 4
Eksempel på
sammensætning af tilslag
vha. fullerkurven.



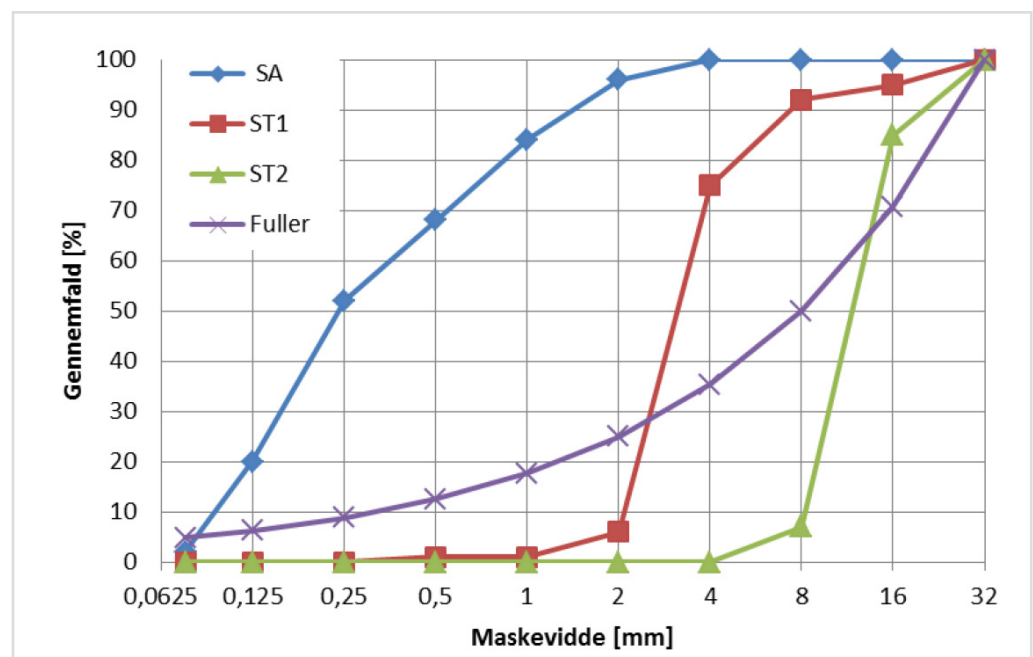
Blandingsforholdet for SA (sand-delen) og ST (sten-delen) bestemmes ved at opstille tre ligninger (svarende til antallet af tilslagsmaterialer).

1. $SA + ST_1 + ST_2 = 1$
2. $x_1 \cdot SA + x_2 \cdot ST_1 + x_3 \cdot ST_2 = z$
3. $y_1 \cdot SA + y_2 \cdot ST_1 + y_3 \cdot ST_2 = z$

Hvor: x_1 og y_1 er gennemfald på kornkurverne
 z er gennemfald på idealkurven (Fullerkurven)

Da ingen af andelen kan være negative, gælder desuden, at:
 $SA, ST_1, ST_2, \dots, ST_n \geq 0$

Figur 5
Eksempel på kornkurver.



Der vælges nu, hvilke sigter ligningerne opstilles ud fra. Hvis der er 2 materialer vælges fx 4 mm sigten, er der 3 materialer vælges fx 4 mm sigten og 0,25 mm sigten, således at både sandprocenten og fillerandelen (korn der er mindre end 0,25 mm) er tilgodeset.

Hvis 4 mm og 0,25 mm – sigterne vælges, fås:

1. $SA + ST_1 + ST_2 = 1$
2. $100 \cdot SA + 75 \cdot ST_1 + 0 \cdot ST_2 = 35$
3. $52 \cdot SA + 0 \cdot ST_1 + 0 \cdot ST_2 = 9$

De tre ligninger har løsningen: $SA = 0,25$, $ST_1 = 0,13$ og $ST_2 = 0,62$

Dvs. der skal bruges 25 % sand, 13 % sten(4/8) og 62 % sten(8/16).

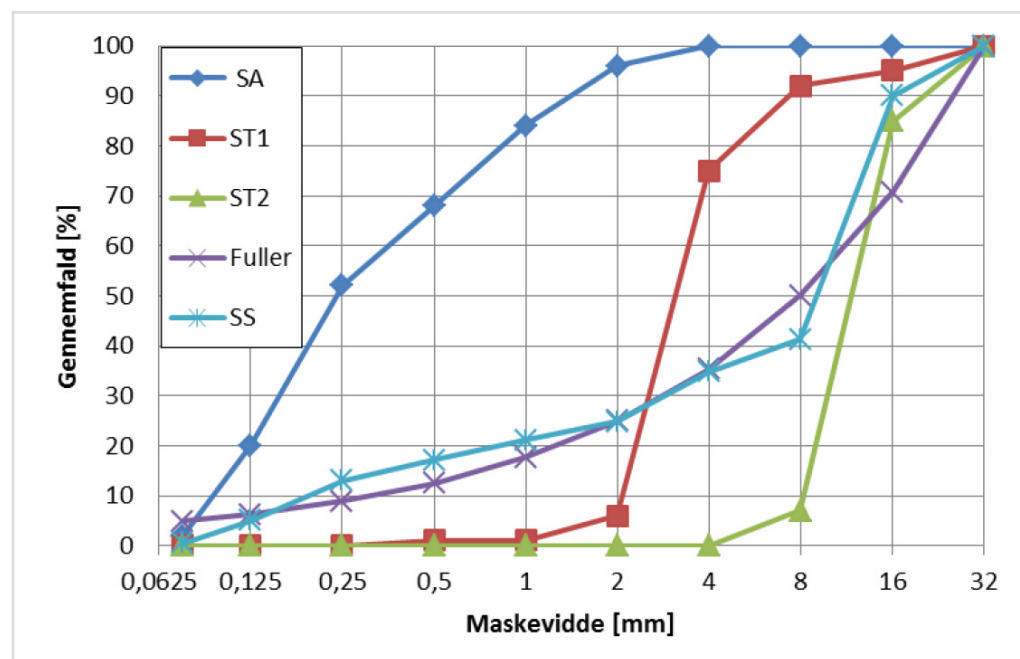
Tabel 7

Sammensat kornkurve for tilslaget. Tilslaget er blandet i forholdet 5 % sand, 13 % sten(4/8) og 62 % sten(8/16), for at opnå en kornkurve der næsten svarer til Fullerkurven. Kornkurven er vist i figur 6.

Maskevidde d [mm]	Gennemfald [%]
32	100
16	93
8	61
4	55
2	40
1	34
0,5	27
0,25	21
0,125	8

Figur 6

Eksempel på sammensatte kornkurver. Sandet (SA: blå kurve) blandes med de to stengraderinger (ST1: rød og ST2: grøn kurve) til en sammensat kornkurve (SS: lyseblå kurve). Den sammensatte kornkurve svarer nogenlunde til idealkornkurven (Fuller: violet kurve).



6.0.3 Vandbehov

Erfaringsmæssigt kræver forskellige tilslagsmaterialer en forskellig vandmængde i betonen for at få en tilstrækkelig bearbejdelighed. Det kaldes tilslagets vandbehov, og er en lidt udefineret, erfaringsbaseret værdi.

6.0.3.1 Parametre der har indflydelse på vandbehovet

Som nævnt ovenfor virker pastaen som smøremiddel mellem tilslagspartiklerne. Jo større tilslagspartikler, jo mindre specifikt overfladeareal, hvilket mindsker pastabehovet og dermed vandbehovet. Normalt bør vælges så stor en stenstørrelse som muligt, da store sten giver det mindste specifikke overfladeareal, dog skal $d_{\max}$ være:

- mindre end afstanden mellem armering minus 5 mm, iht. DS/EN 1992-1-1, Kap. 8.2
- erfaringsmæssigt mindre end 1/4 - 1/3 af konstruktionens mindste tykkelse
- mindre eller lig med 32 mm, fordi normalt produktionsudstyr – herunder især betonpumper – ikke kan håndtere større sten end 32 mm

Der kan lettere opnås en god bearbejdelighed med runde og glatte korn, end med korn, der er flade, lange, skarpkantede eller ru.

6.0.3.2 Fastsættelse af vandbehov

Det nødvendige vandindhold (uden anvendelse af plastificerende tilsætningsstoffer) kan bestemmes ud fra tabeller, se fx tabel 8. Tabellerne giver et bud på, hvor meget vand, der skal anvendes. Det faktiske vandbehov fastsættes ved at lave prøveblandinger. Vandbehovet vil som regel kunne reduceres med plastificerende tilsætningsstoffer.

Tabel 8

Erfaringstal for vandbehov i liter pr. m^3 beton – uden plastificeringsmidler. Tabelværdierne angiver det frie vand i den friskblandede beton. Tabellen er sammenskrivet af tabel 8.2-1 og 8.2-4 i Betonbogen [2].

Tilslag		Vandbehov [l/m^3]					
		Sætmål [mm]					
		0-30	30-60		60-100		100-150
$d_{\max}$	Type	Naturligt luftindhold	Naturligt luftindhold	Indblandet luft	Naturligt luftindhold	Indblandet luft	Naturligt luftindhold
16 mm (Indblandet luft ~ 6 %)	Sømaterialer	148	165	160	175	170	183
	Bakkematerialer	152	170	165	180	175	188
	Skærver	166	186	180	197	191	206
32 mm (Indblandet luft ~ 4 %)	Sømaterialer	137	153	151	162	160	169
	Bakkematerialer	141	158	156	167	164	175
	Skærver	154	173	170	183	180	192
64 mm (Indblandet luft ~ 3 %)	Sømaterialer	130	145	145	154	154	161
	Bakkematerialer	135	151	151	160	160	167
	Skærver	148	165	165	175	175	183

Vandbehovet er beregnet under forudsætning af, at tilslagene er i vandmættet, overfladetør tilstand. Hvis 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.

Eksempel

Den "Passive" betonblanding i Tabel 3 har et vandindhold på 166 liter og en maksimal stenstørrelse på 16 mm. Der er formentligt anvendt bakkematerialer. Det svarer til tabellens oplysninger for en beton med et sætmål på 30-60 mm. Formentlig leveres betonen dog i sætmål 100-150 mm, og det svarer ifølge tabellen til et vandbehov på 188 liter. De ca. 20 liters vandbesparelse er opnået ved at tilsætte et plastificeringsmiddel – se Tabel 3.

6.0.4 Cementbehov

6.0.4.1 Krav til v/c-forhold

Blandingsforholdet mellem vand og cement, har afgørende betydning for den færdige betons egenskaber. Med gode stærke tilslagsmaterialer - som almindelige danske naturmaterialer, vil det være således, at jo lavere v/c-forholdet er, jo højere bliver styrken (og jo bedre holdbarhed kan man desuden forvente). Typiske krav til v/c- forholdet findes i DS/EN 2426, Tabel F1.

Puzzolaners bidrag til v/c-forholdet tages i regning via en såkaldt aktivitetsfaktor k . Metoden kaldes k -værdimetoden, og er beskrevet i DS/EN 206-1 afsnit 5.2.5.2 k -værdimetoden.

Aktivitetsfaktoren k udtrykker, hvor mange kg cement ét kg puzzolan kan erstatte ved beregning af v/c-forholdet. Størrelsen af k er for flyveaske og mikrosilica fastsat i DS 2426 afsnit 5.2.5.2.2 og 5.2.5.2.3. Her fremgår det at 1 kg mikrosilica kan beregningsmæssigt erstatte 2 kg cement ($k_{ms} = 2,0$) og 1 kg flyveaske kan erstatte 0,5 kg cement ($k_{fa} = 0,5$). Disse k -værdier er bestemt således, at holdbarheden af betoner med og uden mikrosilica og flyveaske er stort set uændrede.

Ovenstående betyder at det ækvivalente v/c-forhold beregnes som:

$$\left(\frac{v}{c}\right)_{\text{ækv}} = \frac{v}{m_c + k_{fa} \cdot m_{fa} + k_{ms} \cdot m_{ms}}$$

6.0.4.2 Styrkekrav

En betons trykstyrke afhænger af mange faktorer. Hvis der er valgt gode, danske tilslagsmaterialer og vand-cement forholdet er større end ca. 0,45, vil styrken af tilslagene være højere end styrken af cementpastaen. Bruddet vil derfor normalt i vid udstrækning ske i cementpastaen, og betonens styrke vil derfor primært afhænge af cementpastaens styrke.

I betoner med høj styrke (over ca. 40-50 MPa) kan tilslagsmaterialernes styrke få betydning – og stigende betydning med stigende styrke. Styrken afhænger også af hærdningsgraden, dvs. betones alder. Det er især inden for de første uger, at der sker en stor styrkeudvikling, hvorefter processen efterhånden næsten går i stå. Betonens styrke fastsættes i DS/EN 1992-1-1 til at være den styrke, der er opnået ved hærdning ved 20 °C i 28 døgn. Krav til betones 28-døgnstyrke findes i DS/EN 2426, Tabel F1.

Udover alderen afhænger styrken primært af den valgte cementtype og v/c-forholdet. Ved stigende v/c-forhold stiger betones porøsitet, hvilket giver en lavere styrke. Der er udviklet forskellige empiriske love, bl.a. Bolomeys formel, der udtrykker sammenhængen mellem trykstyrken og v/c-forholdet.

Bolomeys formel, naturlig luftindhold:

$$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{v/c} - \alpha \right), \text{ gældende for } 0,45 < v/c < 1,25$$

Hvor: f_c er betonstyrken i [MPa]
 K [MPa] er en konstant, der afhænger af cementtypen og terminen
 v/c er masse-forholdet mellem vand og cement
 α er en konstant, som afhænger af cementtypen og terminen.

Tabel 9

Vejledende konstanter til Bolomeys formler [3]. Bemærk at Basis cement og Basis Aalborg cement er to forskellige betontyper.

Danske cementtyper	Termin [døgn]	K	α
Basis cement	1	17	0,9
	7	28	0,6
	28	30	0,5
Rapid cement	1	13	0,9
	7	24	0,6
	28	30	0,5
Lavalkali sulfatbestandig cement	1	5	0,8
	7	19	0,8
	28	29	0,7
Aalborg White	1	14	1,0
	7	25	0,8
	28	35	0,7
Basis Aalborg cement	1	13	1,0
	7	24	0,7
	28	29	0,6

Værdierne er gældende for søsten i klasse A og M. God kvalitet af granitsten giver op til 10 % højere 28-døgns styrker. For klasse P materialer skal 28-døgns styrken reduceres med 5-10 %. Værdierne er kun gældende for rene cementbetoner. Hvis der anvendes flyveaske eller mikrosilica skal værdierne bestemmes for de aktuelle sammensætninger.

Bolomeys korrigerede formel: Hvis luftmængden øges i betonen, øges porøsiteten og styrken falder. Man må regne med et styrkefald på 4-5 % pr. % tilsat luft, der tilsættes udover det naturlige. Dette er der taget hensyn til i Bolomeys korrigerede formel:

$$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{v/c} - \alpha \right) \cdot (1 - 0,04(a - a_0))$$

Hvor: a_0 er det naturlige luftindhold (typisk ca. 2 %) i volumenprocent af betonmassen
 a er det aktuelle luftindhold i volumenprocent af betonmassen

Bolomeys udvidede formel: Der kan også tages hensyn til betonens luftindhold ved anvendelse af formlen:

$$f_c = K_1 \cdot \left(\frac{c}{v+1} - \beta \right), \text{ for } 0,4 \leq \frac{v+1}{c} \leq 2,0$$

Hvor: $\beta \approx \frac{1}{2}\alpha$
 $K_1 \approx 0,9K$
 v er luftindholdet

Bolomeys formel – med flyveaske og mikrosilica: Puzzolaner bidrager også til betonens styrke, og dette bidrag kan medregnes ved at beregne det ækvivalente cementindhold, som derefter anvendes i Bolomeys formler:

$$c_{\text{ækv}} = m_c + x_{fa} \cdot m_{fa} + x_{ms} \cdot m_{ms}$$

Hvor: x_{fa} er flyveaskens aktivitetsfaktor mht. styrke
 x_{ms} er mikrosilica aktivitetsfaktor mht. styrke

Styrkemæssigt er flyveaskens effektivitet i forhold til cement kun ca. 0,3 mens mikrosilicas styrkeeffektivitet er oppe på 3 - 4. Aktivitetsfaktorerne størrelse fastsættes ved forsøg.

6.0.5 Beregningsgang ved proportionering

6.0.5.1 Krav til sammensætning og egenskaber:

Iht. Bygningsreglementets afsnit 4.2, stk. 2 skal EN 206-1 Beton og DS 2426 Beton følges. Kravene i disse 2 sammenhørende standarder skal derfor altid overholdes.

Derudover kan bygherren eller den projekterende opstille supplerende krav.

1. Miljøklasse: Kravene til betonen afhænger først og fremmest af miljøklassen. Der vælges mellem følgende miljøklasser:

- (P) Passiv miljøklasse
- (M) Moderat miljøklasse
- (A) Aggressiv miljøklasse
- (E) Ekstra aggressiv miljøklasse

Ved valg af miljøklasse, skal man naturligvis tage stilling til, hvilke påvirkninger den færdige konstruktion bliver udsat for. Man bør også overveje, hvilke påvirkninger konstruktionen bliver udsat for under opførelsen – fx frost - og evt. i givet fald stille supplerende krav således at disse påvirkninger ikke skader betonen.

2. Grænseværdier for betonsammensætningen: Når miljøklassen er fastlagt, kan de krævede grænseværdier for betonsammensætning og betonegenskaber fastlægges ud fra DS 2426, tabel 2426-F1. I forhold til proportioneringen er de vigtigste krav:

- a. v/c – forhold
- b. Styrke (f_{ck}).
- c. Luftindhold
- d. Sætmål
- e. Største stenstørrelse
- f. Tilslagstype – svarende til krav til miljøklasse
- g. Evt. øvrige krav – densiteter, cementtype, retarder/accelerator mv.

Man kan ikke proportionere sin beton til kravgrænserne. For at være sikker på, at kravene overholdes, skal man proportionere ud fra værdier, der ligger på den sikre side af kravene. Det gælder særligt styrken, v/c-forholdet og luftindholdet. Ved proportioneringen anvendes normalt v/c-forholdet reduceret med 0,02-0,03, luftindholdet øget med 1-3 %, og styrken omregnes fra karakteristisk styrke til middelstyrke – typisk en øgning på mindst 4 MPa.

3. Estimering af vandbehov: Vandbehovet fastsættes ud fra tabel 8. Anvendes der plastificerende stoffer, kan vandbehovet reduceres med 5-10 %. Anvendes der superplastificerende stoffer, kan vandbehovet reduceres med op til ca. 20 %. Anvendelse af plastificerende stoffer gør det derfor muligt at lave betoner med lavt v/c-forhold - uden at øge pastamængden.

4. Bestemmelse af cementbehov ud fra styrkekrav og v/c-forhold: Når vandbehovet er fastsat, kan cementmængden bestemmes. Cementmængden påvirker v/c-forholdet og dermed styrken som stiger, når v/c-forholdet falder. Krav til det maksimale v/c-forhold og krav til minimum trykstyrke afhænger af miljøklassen, og fremgår af DS 2426. Da der ikke er noget krav til v/c-forhold i passiv miljøklasse, vil det her være styrken der er afgørende. I de andre miljøklasser vil det i de fleste tilfælde være v/c-forholdet, der bliver afgørende for cementindholdet.

5. Bestem blandingsforholdet af tilslag: Blandingsforholdet af tilslag bestemmes ud fra en idealkurve, eller sandprocenten.

6.0.5.2 Betonproportionering - den teoretiske sammensætning

Når mængden af cement og vand er fastlagt, og andelen af luft og tilslagets blandingsforhold kendes, kan skemaet i tabel 10 anvendes til at beregne den teoretiske sammensætning af betonen:

Tabel 10
Teoretisk sammensætning af beton.

Betonproportionering – teoretisk sammensætning				
Komponent	Densitet	Masse pr. m ³	Diverse udregninger	Volumen pr. m ³
Cement (C)	ρ_c	m_c	$V = m_c / \rho_c$	(a)
Vand (V)	ρ_w	m_v	$V = m_v / \rho_w$	(b)
Luft (L)	ρ_l	0	$l \cdot 0,001$	(c)
Cementpasta plus luft				(d): Sum (a:c)
Sand I (SA)	$\rho_{SA I}^{*)}$	(f) ←	$m_{SA I} = \rho_{SA I} \cdot V_{tilslag}^{*)} (SA)^{**})$	
Sten I (ST I)	$\rho_{ST I}^{*)}$	(g) ←	$m_{ST I} = \rho_{ST I} \cdot V_{tilslag}^{*)} (SA)^{**})$	
Sten II (ST II)	$\rho_{ST II}^{*)}$	(h) ←	$m_{ST II} = \rho_{ST II} \cdot V_{tilslag}^{*)} (SA)^{**})$	
Tilslag				(e): 1,000 - (d)
Beton		(l)		1,000
*) Der anvendes ρ_{vot}				
**) Andelene af sand og sten indsættes i hele tal				

1. Densiteter og kendte masser indføres i skemaet, og volumen pr. m³ beregnes for cement vand og luft (a), (b) og (c).
2. Cementpasta plus lufts andel beregnes som summen af (a), (b) og (c).
3. Beton består af cementpasta plus luft og tilslag, og andelen af tilslag kan derfor beregnes som én minus "cementpasta plus luft".
4. Massen af de forskellige tilslag beregnes ud fra densiteten, samlet volumen af tilslag og blandingsforholdet af tilslagene (f), (g) og (h).
5. Kontroller at betonens densitet og fillermængde indholdet overholder kravene.

6.0.5.3 Blanderecept

Ud fra den teoretiske sammensætning ovenfor, kan der laves en blanderecept. Der skal foretages følgende justeringer:

1. Justering af fugt: I proportioneringen af den teoretiske sammensætning var densiteten af tilslagsmaterialerne i vandmættet overfladetør tilstand. Mængden af sand, sten og vand skal derfor justeres for det frie vand der er til stede i tilslagsmaterialerne, eller for vandabsorptionen, hvis tilslagene er tørre.
2. Sats: Hvis den ønskede mængde beton ikke netop er 1 m³, omregnes mængderne af materialerne forholdsvist
3. Luftindblandingsmiddel: Hvis der indblandes luft er luftmængden angivet i % eller liter. På blanderecepten skal der desuden angives hvor meget luftindblandingsmiddel der skal anvendes for at opnå det krævede luftindhold.
4. Vandmængden i tilsætningsstoffer indregnes i vandindholdet.

6.0.5.4 Eksempel på betonproportionering

Der skal fremstilles en beton i aggressiv miljøklasse med følgende minimums krav til egenskaberne:

- Karakteristisk styrke: 35 MPa
- v/c-forhold: 0,45
- Sætmål: 80 mm
- Maksimal stenstørrelse: 16 mm
- Luftindhold: 4,5 %

For at opnå den karakteristiske styrke på 35 MPa, regnes der med et tillæg på 15 %, således at middel trykstyrken i proportioneringen sættes til 41 MPa.

Som tilstræbte værdier ved blanding anvender producenten følgende:

- For v/c-forhold ligger den øvre grænse for den tilstræbte værdi 0,02 under krav til øvre grænseværdi og v/c-forholdet sættes derfor til $0,45 - 0,02 = 0,43$ i proportioneringen.
- For luftindholdet ligger den nedre grænse for det tilstræbte luftindhold 0,5 % absolut over krav til nedre grænseværdi og luftindholdet sættes derfor til 5,0 % i proportioneringen.

Cement: Ved fremstillingen af betonen anvendes rapidcement med en absolut densitet på 3160 kg/m^3 , $K = 30$ og $\alpha = 0,5$.

Tilslagsmaterialer: Betonen fremstilles med sømaterialer. Tilslagsets densitet i vandmættet, overfladetør tilstand (vot-tilstand), vandabsorption og vandindhold fremgår af tabel 11.

Tabel 11
Tilslagsets densitet i vot-tilstand, vandabsorption og aktuelt vandindhold.

Tilslagsmaterialer	Densitet i vot-tilstand (ρ_{vot}) kg/m^3	Vandabsorption %	Aktuelt vandindhold %	Filler indhold %	Andel %
Sand $\leq 4 \text{ mm}$	2540	4,1	5,2	5	48
Sten 4 - 8 mm	2560	0,8	3,8	0	15
Sten 8-16 mm	2600	1,5	2,0	0	37

Estimering af vandbehov: Vandbehovet estimeres ud fra tabel 8:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sætmål} = 80 \text{ mm} \\ d_{\text{max}} = 16 \text{ mm} \\ \text{Sømaterialer} \end{array} \right\} \text{Vandbehov} = 170 \text{ l/m}^3$$

Bestemmelse af cementbehov ud fra styrkekrav og v/c-forhold: Cementbehovet bestemmes i første omgang ud fra v/c-forholdet:

$$\frac{v}{c} = 0,43$$

$$c = \frac{v}{\frac{v}{c}} = \frac{170 \text{ liter}}{0,43} = 395 \text{ kg/m}^3$$

Derefter kontrolleres om der er cement nok til at opnå en styrke på 42 MPa, som krævet, ved anvendelse af Bolomeys udvidede formel:

$$f_c = K_1 \cdot \left(\frac{c}{v+1} - \beta \right), \text{ for } 0,4 \leq \frac{v+1}{c} \leq 2,0$$

$$\beta = \frac{1}{2} \alpha = \frac{1}{2} \cdot 0,5 = 0,25$$

$$K_1 \approx 0,9 \cdot K = 0,9 \cdot 30 = 27$$

$$f_c = 27 \cdot \left(\frac{395}{170 + 50} - 0,25 \right) = 41,7 \text{ MPa} > 41,0 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK}$$

Kontrol af gyldigheden af Bolomeys formel:

$$0,4 \leq \frac{v+1}{c} \leq 2,0$$

$$\frac{v+1}{c} = \frac{170 + 50}{395} = 0,56 \rightarrow \text{OK}$$

Tabel 12
 Eksempel på
 sammensætning af beton
 uden tilsætningsstoffer.
 Fugtindhold i
 tilslagsmaterialer.

Betonproportionering – teoretisk sammensætning				
Komponent	Densitet kg/m ³	Masse pr. m ³ kg	Diverse udregninger	Volumen m ³
Cement	3160	395	$V = 395 / 3160$	0,1250
Vand	1000	170	$V = 170 / 1000$	0,1700
Luft	0	0	$V = 50 \cdot 0,001$	0,0500
Cementpasta plus luft				0,3450
Sand	2540	799	$m = 2540 \cdot 0,6550 \cdot 0,48$	0,3146
Sten (4-8 mm)	2560	252	$m = 2560 \cdot 0,6550 \cdot 0,15$	0,0984
Sten (8-16 mm)	2600	630	$m = 2600 \cdot 0,6550 \cdot 0,37$	0,2423
Tilslag				0,6553
Beton		2246		1,000

Eksemplet viser at pastaindholdet bliver meget stort, hvis der ikke anvendes plastificerende tilsætningsstoffer. Plastificerende tilsætningsstoffer kan give den ønskede bearbejdelighed, ved et lavere vandindhold og dermed også et lavere cementindhold.

6.0.6 Fugtindhold i tilslagsmaterialer

Det vandindhold, der indgår i proportioneringen, er det "effektive vandindhold", dvs. at volumen af flydende tilsætningsstoffer indgår i vandindholdet og man går ud fra at tilslagene er i vot-tilstand. Den tilsatte vandmængde skal derfor korrigeres volumen af tilsætningsstoffer og vandindholdet i tilslagsmaterialerne.

Kendskab til tilslagsmaterialernes fugtindhold har derfor stor betydning for at kunne styre vandindholdet og dermed v/c-forholdet.

Vandet kan trænge ind i tilslagets åbne porer, men ikke i de lukkede. De lukkede porer har derfor ikke indflydelse på tilslagsmaterialets fugtindhold.

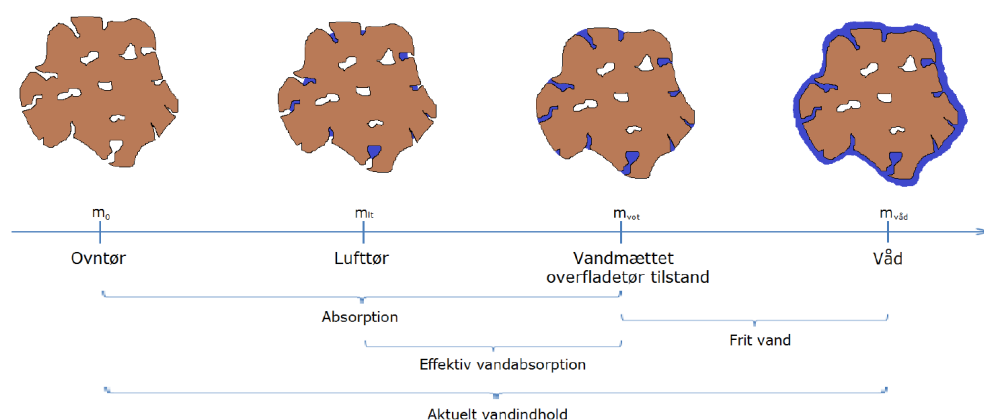
De åbne porer kan derimod indeholde vand. Tilsættes der tørre sten til betonen, vil en del af det vand, som skulle bruges til at give den ønskede bearbejdelighed, i stedet blive absorberet af stenene.

Omvendt kan der ligge en del frit vand på overfladen og mellem kornene. Det frie vand vil give et bidrag til vandindholdet i betonen, og hvis der ikke korrigeres for dette, vil man opnå højere v/c indhold og lavere styrker.

Generelt kan tilslagene have 4 forskellige fugttilstande, se figur 7:

1. Ovn tør – al fugt er fortrængt fra de åbne porer, ved ovntørring ved 105°C, indtil vægten er konstant (typisk efter et døgn). Tilslaget vil absorbere vand fra cementpastaen.
2. Lufttør, u_{lt} – al fugt er fordampet væk fra overfladen, men de åbne porer er delvist vandfyldte. Tilslaget vil absorbere lidt vand fra cementpastaen.
3. Vandmættet overfladetør tilstand, u_{vot} – alle de åbne porer er fyldt med vand, men overfladen er tør. Vandmættede overfladetørre tilslag er i fugtmæssig ligevægt, og vil regningsmæssigt ift. v/c-forholdet ikke optage eller afgive vand til cementpastaen. Vandet kan i tilslagene kan dog senere reagere med uhydratiseret cement.
4. Våd, $u_{våd}$ – alle åbne porer er fyldt med vand, og der er overskydende vand på overfladen. Vandet på overfladen, skal medregnes til vandindholdet i cementpastaen.

Figur 7
Fugtindhold i
tilslagsmaterialer.



Absorption, w_a , er massen af det vand, der kan rummes i de åbne porer, divideret med massen af de tørre korn:

$$w_a = \frac{V_a \cdot \rho_w}{m_0} \cdot 100\% = \frac{m_{vot} - m_0}{m_0} \cdot 100\% = \frac{\rho_{vot} - \rho_d}{\rho_d} \cdot 100\%$$

Effektiv absorption, $w_{a,eff}$, er massen af det vand, der kan rummes i de åbne, lufttørre porer, divideret med massen af de lufttørre korn:

$$w_{a,eff} = \frac{m_{vot} - m_{lt}}{m_{lt}} \cdot 100\%$$

Det fri vand, u_f , er massen af det vand der findes på overfladen, eller er imellem de enkelte korn, divideret med massen af de vandmættede overfladetørre korn.

$$u_f = \frac{m_{våd} - m_{vot}}{m_{vot}} \cdot 100\%$$

Det aktuelle vandindhold, u_{tot} , er den samlede masse af vand, udenpå kornene og i de åbne porer, divideret med massen af de lufttørre sten.

$$u_{tot} = \frac{m_{våd} - m_0}{m_0} \cdot 100\%$$

6.0.6.1 Eksempel på justering af vandmængden (fortsat fra 6.1.5.4)

Tabel 13
Eksempel på justering af fugt.

Udgangssats	Cement	Vand	Sand	Sten 4-8 mm	Sten 8-16 mm
kg pr. m ³	395	170	799	252	630

	Materialefraktion		
	Sand	Sten 4-8 mm	Sten 8-16 mm
Vandabsorptionsevne, % (w_a)	4,1	0,8	1,5
Aktuelt vandindhold, % (u_{tot})	5,2	3,8	2,0
u_f = Frit vand: $u_f = (w_a - u_{tot})$ % (angiv tegn + eller -). Fugt absorberes af tilslaget, når u_f er positiv. Der er frit vand tilstede i tilslaget, når u_f er negativ	-1,1	-3,0	-0,5
Betonens indhold af tilslag i vandmættet, overfladetør tilstand (m_{vot})	799	252	630
Indhold af tilslag i kg, justeret for fugt i tilslaget: $m_{våd} = m_{vot} \left(\frac{u_{tot} + 100}{w_a + 100} \right)$	807	260	633
Justering af blandevand for fugt i tilslaget, i liter: $m_w = m_{vot} \left(\frac{w_a - u_{tot}}{w_a + 100} \right) \text{ (angiv tegn + eller -)}$	-8	-8	-3
Samlet justering af blandevand i liter, er lig med summen af ovenstående justeringer for de enkelte materialer $\sum m_w = \sum m_{vot} \left(\frac{w_a - u_{tot}}{w_a + 100} \right) = (-8) + (-8) + (-3) = -19 \text{ liter}$ Hvis summen er positiv, øges mængden af støbevand med det beregnede antal liter. Hvis summen er negativ, reduceres mængden af blandevand med det beregnede antal liter.			

Justeret sats	Cement	Vand	Sand	Sten 4-8 mm	Sten 8-16 mm
kg pr. m ³	395	151	807	260	633

6.0.7 Prøveblanding og korrektioner

Når man har proportioneret sin beton (lavet sin blanderecept), foretages en prøveblanding, hvor man kontrollerer de vigtigste egenskaber af betonen. Typisk kontrollerer man sætmål, luftindhold og styrken, men også andre egenskaber kan testes, afhængig af hvad betonen skal bruges til. Afviger egenskaberne fra det ønskede, korrigeres betonrecepten, og der udføres en ny prøveblanding. Proceduren fortsætter, indtil egenskaberne er som ønsket.

Bemærk, at denne proces kan være tidskrævende, fordi fx styrkebestemmelsen tager 28 døgn. Test af andre egenskaber som chloridmodstand, frostbestandighed og brandsikkerhed kan tage op til flere måneder.

Ændringer eller korrektioner i en betonrecept skal gennemtænkes nøje.

Ændrer man fx på mængden af et enkelt af delmaterialerne i en given blanding på 1 m³, vil det automatisk påvirke mængderne af alle de andre materialer, fordi blandingens samlede volumen nu ikke mere er 1 m³.

Ændres mængden af vand eller luft, vil pastamængden ændres, og dermed også mængden af tilslag. Ønsker man at opnå en bestemt styrke og/eller v/c-forhold, må man også ændre på mængden af cement. Man skal derfor rette hele betonrecepten til, hver gang noget ændres.

Alle ændringer påvirker betonens egenskaber. Fx vil tilsætning af ekstra vand øge sætmålet (se eksemplet nedenfor). Øges luftmængden med 1 % vil vandbehovet falde med ca. 3 liter pr. kubikmeter med uændret sætmål.

6.0.7.1 Korrektion af sætmål

Hvis sætmålet ikke stemmer overens med det krævede, må vandindholdet korrigeres. Korrektionen kan foretages med Popovics formel:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^q$$

Hvor: y_1 = det opnåede sætmål
 y_2 = det ønskede sætmål
 V_1 = vandindhold ved sætmål y_1
 V_2 = vandindhold ved sætmål y_2

Potensen q varierer ikke meget, og sættes normalt til 0,10. Hvor meget ekstra vand der skal tilsættes for at øge sætmålet, afhænger af om sætmålet er højt eller lavt.

Eksempel:

1. Der ønskes et sætmål på 60 mm, og der er i første prøveblanding anvendt 150 liter vand. Dette gav et sætmål på 30 mm. For at øge sætmålet til 60 mm skal vandmængden øges til:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^q = 150 \cdot \left(\frac{60}{30} \right)^{0,1} = 161 \text{ liter}$$

2. Der ønskes et sætmål på 180 mm, og der er i første prøveblanding anvendt 150 liter vand. Dette gav et sætmål på 150 mm. For at øge sætmålet til 180 mm skal vandmængden øges til:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^q = 150 \cdot \left(\frac{180}{150} \right)^{0,1} = 153 \text{ liter}$$

Som det fremgår, skal der i eksemplet korrigeres med 11 liter vand for at ændre sætmålet fra 30 til 60 mm, mens der kun skal korrigeres med 3 liter vand for at ændre sætmålet fra 150 til 180 mm. For høje sætmålsbetoner betyder det, at det i praksis kan være svært at styre sætmålet, når man ser på måleusikkerheden på tilsætning af vand og måling af fugtindholdet i tilslagene.

6.0.7.2 Korrektion af styrken

Hvis man ikke har opnået den forventede middelstyrke ift. Bolemeys formel, må man korrigere K_c i Bolomeys formel, da alle de andre værdier, cementindhold, vandindhold mv. er kendte. Da det er 28-døgnstyrken, der er proportioneret ud fra, er denne korrektion tidskrævende.

6.0.7.3 Eksempel: Prøveblanding og korrektioner

Der er proportioneret og fremstillet 1 m³ beton:

- $E(f_c) = 35$ MPa
- Vandindhold 175 liter
- $K = 30$ i Bolomeys formel
- Cement 348 kg
- Ønsket sætmål 80 mm
- Luftindhold: 5 %

Betonen blandes og prøvning viste:

- Opnået sætmål 40 mm
- Opnået middelstyrke efter 28 døgn: $E(f_c) = 34$ MPa

Der skal nu korrigeres følgende:

- Korriger vandindhold
- Korriger K i Bolomeys formel

Korrektion af vandbehov: Her anvendes f.eks. Popovics formel, med $q = 0,10$

- Opnået sætmål $y_1 = 40$ mm ved vandindholdet $V_1 = 175$ liter
- Ønsket sætmål $y_2 = 80$ mm

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^q$$

$$V_2 = \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^q \cdot V_1 = \left(\frac{80}{40} \right)^{0,10} \cdot 175 = 188 \text{ liter}$$

Korrektion af styrken: Da styrken ikke gav den ønskede middelstyrke, foretages der en korrektion af K i Bolomey's udvidede formel.

Ud fra Bolomey's udvidede formel blev der opnået følgende sammenhænge, hvorfra den korrigerede K_{ny} kan bestemmes:

$$34 = K_{ny} \cdot 0,9 \cdot \left(\frac{348}{175 + 50} - 0,25 \right)$$

$$K_{ny} = 29,1$$

6.0.8 Proportionering af SCC

6.0.8.1 Sammensætning af SCC

Der er mange faktorer, der kan påvirke flydeegenskaberne af SCC-beton. Generelt er det de samme faktorer, som også påvirker bearbejdéligheden af konventionel sætmålsbeton, men kompleksiteten er højere, og det er svært at lave forenklede modeller for, hvordan SCC opfører sig, når der ændres på én faktor.

Der findes materialemodeller, der beskriver sammenhængen mellem pastamængde og flydespænding, se fx [4]. Da flydespænding og flydemål hænger sammen (se konsistensafsnit) er der indirekte modeller for sammenhæng mellem pastamængde og flydemål.

1. *Pastamængden*: Bearbejdéligheden, og dermed flydemålet for SCC øges, når andelen af pastamængden øges, og volumenandelen af tilslag falder. Der er endnu ikke tilsvarende modeller, der kan bruges til at forudse hvor meget flydemålet vil ændre sig for SCC ved en tilsvarende ændring i pastamængden. Der foreligger dog erfaringstal.

Tabel 14

Erfaringstal for ændring af de rheologiske parametre som følge af et stigende pastaindhold [4].

Beton	Tilslag [l/m ³]	Pastaoverskud [l/m ³]	Flydemål [mm]	Flydespænding [Pa]	Plastisk viskositet [Pa·s]
A	712,1	140	495	94	44
B	699,7	155	580	44	39
C	691,4	165	620	32	29

2. *Kornform*: Afrundede tilslag kræver mindre pastamængde end kantede tilslag.
3. *Sandets kornkurve*: En forøgelse af sandets finhed vil forøge den plastiske viskositet og flydespændingen – og dermed reducere flydeevnen.
4. *v/c-forhold*: En sænkning af v/c-forholdet giver en lavere flydespænding og en højere viskositet. Hvis man ønsker at fastholde flydemålet, må mængden af superplastificerende tilsætningsstoffer øges.
5. *Flyveaske*: Da k-faktoren for flyveaske er 0,5, vil 2 kg flyveaske erstatte 1 kg cement. Desuden er densiteten af flyveaske lavere end cement. Dette betyder at faststofvolumenet i pastaen øges ved tilsætning af flyveaske, hvis pastamængden holdes konstant, og dette giver en højere viskositet – og reducerer flydeevnen.
6. *Mikrosilica*: Da k-faktoren for mikrosilica er 2, vil 1 kg mikrosilica erstatte 2 kg cement, desuden er densiteten af mikrosilica lavere end cement. Dette betyder at faststofvolumenet i pastaen bliver mindre ved tilsætning af mikrosilica, hvis pastamængden holdes konstant, og dette giver en lavere viskositet – og øger flydeevnen.
7. *Superplastificerende tilsætningsstof (SP)*: Det er nødvendigt at anvende SP, når der produceres SCC. Når doseringen af SP øges, falder flydespændingen, mens viskositeten forbliver stort set konstant. Øget dosering af SOP virker derfor ikke ved store pastaoverskud.
8. *Stabilisator (VMA)*: Anvendes stort set ikke i Danmark. VMA øger primært flydespændingen (reducerer flydeevnen, men kan skabe sammenhæng i en dårligt proportioneret beton).
9. *Luftindblanding*: For et konstant volumen af pasta plus luft, falder flydemålet, når luftindholdet øges.

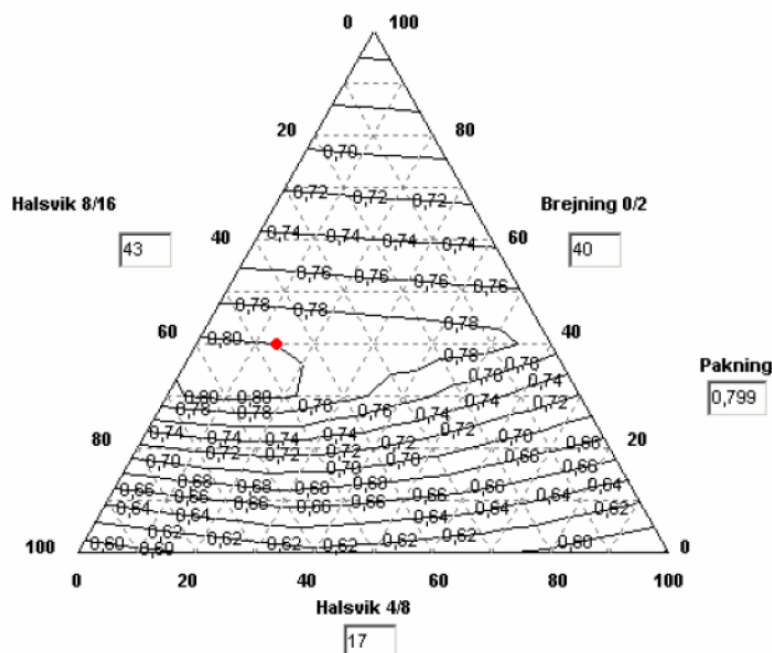
Sammensætning af tilslagsmaterialer: Der anvendes pakningsberegnsprogrammer til at kombinere tilslagene - fx de tre tilslagsfraktioner (0-4 mm, 4-8 mm og 8-16 mm).

I figur 8 er vist et eksempel på en pakningstrekant. Ud fra pakningstrekanten aflæses mængdefordelingen i %, for de tre tilslagsfraktioner. Der vælges en kombination som ligger lidt på den mørtelige side af pakningsoptimum, hvor niveaukurver ligger langt fra hinanden så variationer har mindre betydning.

Figur 8

Pakningstrekant for typiske danske klasse E materialer.

Aflæsningen på de tre akser (sider) foregår i mod urets retning. Den røde prik svarer til ca. 15 % 4/8, ca. 40 % 0/2 og ca. 45 % 8/16. Den røde prik repræsenterer en god kombination af tilslag med en pakningsgrad på 0,799 (ϕ^*) [1].



Pastaoverskud: For at opnå det ønskede flydemål, må der være et vist pastaoverskud (pastamængde større end den pastadel, der udfylder hulrummene mellem tilslaget) i betonen. For et tilstræbt flydemål på 550 mm, kan nedenstående værdier anvendes, hvis betonen ikke er luftindblandet:

Tabel 15

Pastaoverskud i SCC uden luftindhold. Værdierne er kun vejledende [4].

Materialer	Pastaoverskud
Afrundede (sømaterialer)	140 l/m ³
Knuste materialer (Granit)	180 l/m ³

Hvis betonen er luftindblandet, kan pastaoverskuddet reduceres med ca. 20 l/m³ svarende til ca. halvdelen af den indblandede luftmængde. Sammenhængen mellem pastaoverskud og tilslagsmængde kan udtrykkes som:

$$V_{\text{tilslag}} = (1 - V_{\text{pastaoverskud}}) \cdot \phi^*$$

Hvor ϕ^* er den valgte pakningsgrad, opnået i forbindelse med pakningsanalysen.

Massen af de enkelte tilslagsfraktioner kan nu beregnes ud fra mængdefordelingen og densitet af de enkelte tilslagsfraktioner samt tilslagsvolumen.

Sammensætning af cementpastaen: Cementpastaens volumen V kan nu beregnes som:

$$V_v + V_c + V_{fa} = 1 - V_{\text{tilslag}} - V_{\text{luft}} + V_{\text{add}}$$

og

$$V_v + V_c + V_{fa} = \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_{fa}}{\rho_{fa}}$$

v/c-forholdet beregnes som:

$$\left(\frac{v}{c}\right)_{\text{ekv}} = \frac{m_v}{m_c + k_{fa} \cdot m_{fa}} \quad \text{og} \quad x_{fa} = \frac{m_{fa}}{m_c}$$

Ved løsning af ovenstående 3 ligninger, kan massen m af cement c , vand v og flyveaske fa findes.

Styrke: Når mængderne af cement, vand og flyveaske er fundet, kan styrken beregnes vha. Bolomeys formler.

Prøveblandinger: Som for den konventionelle beton, må man også for SCC lave prøveblandinger for at justere betonrecepten, mht. flydemål og styrke. Flydemålet justeres med tilsætningsstoffer, og er styrken for lav, justeres den ved at øge mængden af cement.

6.0.8.2 Eksempel på proportionering af SCC beton

En SCC-beton skal sammensættes ud fra følgende forudsætninger:

- Styrkeklasse C25
- v/c-forhold = 0,59
- Rapidcement
 $\rho_c = 3160 \text{ kg/m}^3$
- Flyveaske
 $\rho_{fa} = 2300 \text{ kg/m}^3$
 $k_{fa} = 0,5$

$$x_{fa} = 0,667 \quad \left(x_{fa} = \frac{m_{fa}}{m_c} = \frac{2}{3} \right)$$

- Flydemål = 550 mm
- Luftindhold = 1,5 % (ingen luftindblanding)
- Tilslagsmaterialer (afrundede):
0-4 mm: $\rho_{\text{vot}} = 2643 \text{ kg/m}^3$
4-8 mm: $\rho_{\text{vot}} = 2682 \text{ kg/m}^3$
8-16 mm: $\rho_{\text{vot}} = 2648 \text{ kg/m}^3$

Sammensætning af tilslagsmaterialer: Tilslags sammensætningen er bestemt vha. et pakningsberegnsprogram. Ved en pakningsgrad, φ^* , på 0,828 bliver den valgte tilslagssammensætning:

0-4 mm:	40 %
4-8 mm:	20 %
8-16 mm:	40 %

Da tilslagsmaterialerne er afrundede og det tilstræbte flydemål er 550 mm, vælges der et pastaoverskud på $0,140 \text{ l/m}^3$, ud fra tabel 4.2.8-3.

$$V_{\text{tilslag}} = (1 - V_{\text{pastaoverskud}}) \cdot \varphi^*$$

$$V_{\text{tilslag}} = (1 - 0,140) \cdot 0,828 = 0,712 \text{ m}^3$$

Volumen af tilslag fordeles nu på de tre tilslagstyper i tabel 16.

Sammensætning af cementpastaen: Volumen af cementpasta plus luft beregnes som:

$$V_{c+v+fa+ms+luft} = 1 - V_{tilslag} = 1 - 0,712 = 0,288\text{m}^3$$

Luftindholdet er 15 l/m³, og tilsætningsstofferne skønnes at udgøre 0,5 l/m³.
Volumen af vand, cement og flyveaske udgør:

$$V_v + V_c + V_{fa} = 1 - V_{tilslag} - V_{luft} + V_{add} = 1 - 0,7120 - 0,0150 - 0,0005 = 0,2725\text{m}^3$$

$$V_v + V_c + V_{fa} = \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_{fa}}{\rho_{fa}} \quad \text{og} \quad m_{fa} = x_{fa} \cdot m_c$$

$$0,2725 = \frac{m_v}{1000} + \frac{m_c}{3160} + \frac{\frac{2}{3} \cdot m_c}{2300} \quad (\text{ligning I})$$

For v/c forholdet gælder:

$$\left(\frac{v}{c}\right)_{\text{ækv}} = \frac{m_v}{m_c + k_{fa} \cdot m_{fa}} \quad \text{og} \quad x_{fa} = \frac{m_{fa}}{m_c}$$

$$0,59 = \frac{m_v}{m_c + 0,5 \cdot \frac{2}{3} \cdot m_c} \quad , \quad (m_{fa} = x_{fa} \cdot m_c) \quad (\text{ligning II})$$

Ligning I og ligning II løses nu:

$$m_c = 195,6\text{kg}$$

$$m_v = 153,9\text{kg}$$

$$m_{fa} = \frac{2}{3} \times m_c = \frac{2}{3} \times 195,6 = 130,4\text{kg}$$

Tabel 16
Eksempel på
sammensætning af SCC-
beton.

Betonproportionering SCC – teoretisk sammensætning				
Komponent	Densitet kg/m ³	Masse pr. m ³ kg	Diverse udregninger	Volumen m ³
Cement	3160	195,6	Ligning I og ligning II	
Flyveaske	2300	130,4		
Vand	1000	153,9		
$V_v + V_c + V_{fa} = 1 - V_{tilslag} - V_{luft} + V_{add}$			1 - 0,7120 - 0,0150 - 0,0005	0,2725
Tilsætningsstoffer	1000	0,5	V = 0,5 / 1000	0,0005
1,5 % Luft	0		V = 15 · 0,001	0,0150
Cementpasta plus luft: $V_{c+v+fa+ms+luft} = 1 - V_{tilslag}$			$V_{c+v+fa+ms+luft} = 1 - 0,7120$	0,2880
40 % Sand	2643	753	m = 2643 · 0,7120 · 0,40	0,2849
20 % Sten (4-8 mm)	2682	382	m = 2682 · 0,7120 · 0,20	0,1424
40 % Sten (8-16 mm)	2648	754	m = 2648 · 0,7120 · 0,40	0,2847
Tilslag: $V_{tilslag} = (1 - V_{pastaoverskud}) \cdot \Phi$			Kontrol: $V_{tilslag} = (1 - 0,140) \cdot 0,828$	0,7120
Beton		2369		1,000

6.0.9 Litteratur

1. M. Glavind, I. Sørensen og E. Thygesen, »Pakningsberegninger som hjælpemiddel ved betonproportionering,« Beton-Teknik, 1999.
2. A. D. Herholdt, C. F. P. Justesen, P. Nepper-Christensen og A. Nielsen, Beton-Bogen, Aalborg Portland, 1985.
3. »Cement og Beton,« Aalborg Portland, 2012.
4. C. Pade, L. N. Thrane og C. V. Nielsen, Håndbog for sammensætning af SCC, Teknologisk Institut, 2007.