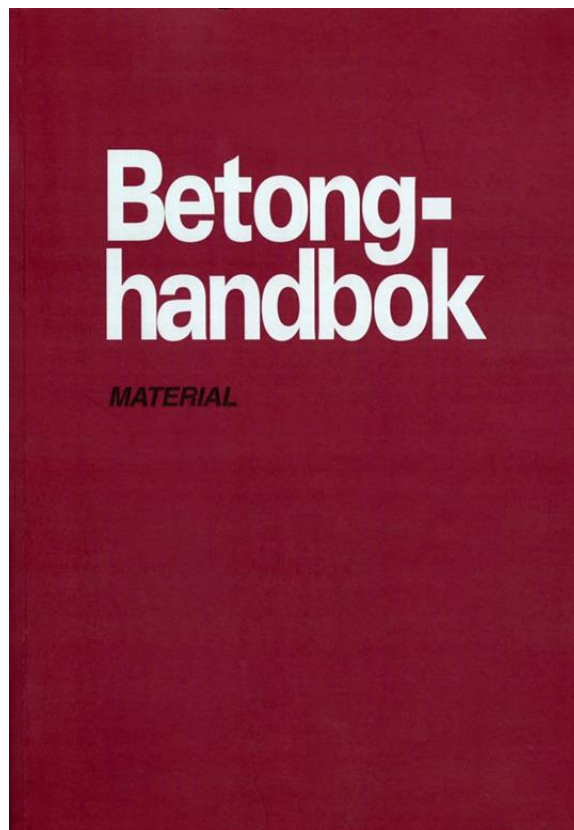


# Revidering av betonghandboken Material

*Slutrapport – del 2*

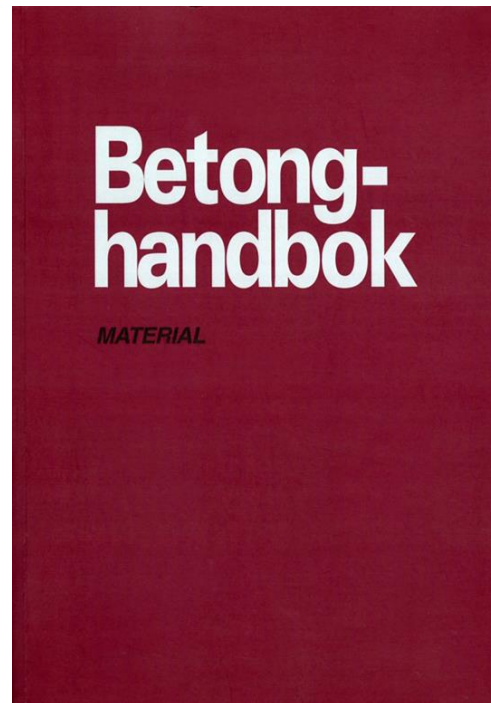


**Styrgruppen**

**2020-11-10**

**SBUF stödjer**  
forskning & utveckling

**som leder till**  
praktisk handling



# Revidering av Betonghandboken Material

---

Slutrapport – Del 2

Styrgruppen

2020-11-10

## Förord

Styrgruppen vill på detta sätt framföra ett stort tack till alla de finansiärer som genom sina bidrag möjliggjort det arbete vars andra och avslutande del redovisas i denna rapport. Huvudfinansiärer har varit Cementa, Svensk Betong och SBUF. Trafikverket har också medverkat som finansiär. Vidare har bidrag lämnats via Svenska Betongföreningen av några av föreningens korporativa medlemmar nämligen Abetong, BASF, Betongindustri, Byggnadstekniska Byrån, Schwenk (tidigare Cemex Norden), LTU, Lujabetong, Modern Betongteknologi, Pen-Tec, SSAB Merox, Strängbetong och Swerock. Efter projektets start gjordes också en överenskommelse med Byggråd Syd om bidrag till arbete utfört av personer med anknytning till LTH. Ett antal av de engagerade skribenterna och granskarna har utfört sitt arbete inom ramen för sina anställningar och dessa företag och personer vill vi också uttrycka vår tacksamhet till.

## Om projektet

Betonghandboken Materials senaste version, utgåva 2, kom 1994. Sedan dess har det hänt mycket inom betongteknikens utveckling, varför Betongföreningen m.fl. år 2012 tog beslut om att revidera hela handboken.

Projektet har delats in i två delar med en uppdelning som baseras på innehållet med rubriker enligt nedan.

Del 1: Delmaterial samt färsk och hårdnande betong.

Del 2: Hårdnad betong, fysikaliska egenskaper och beständighet.

Föreliggande rapport utgör slutrapportering av projektets andra del och där ingår totalt 22 kapitel numrerade 14-35, vilka ges ut samlat i denna andra del. Av dessa är det 4 enskilda kapitel som tidigare gavs ut som särtryck. Arbetet med Del 2 har pågått under perioden 2017-2020.

Del 2 kommer liksom Del 1 att ges ut i såväl tryckt som digital form.

Innehållet i Del 1 respektive Del 2 framgår av bilaga 1, sist i denna rapport.

## Organisation

Svenska Betongföreningens Servicebolag och Cementa har varit avtalsparter gentemot Byggtjänst. Den styrgrupp som drivit projektet har haft följande sammansättning:

Richard McCarthy, Svenska Betongföreningen Service (ordförande)

Ingvar Börtemark, inbocon (projektledare)

Christer Ljungkrantz, Cementa

Markus Peterson, Svensk Betong Service

Ulf Jönsson, Svenska Betongföreningen

Helen Strandgren, Svensk Byggtjänst

Hans Hedlund, Skanska

## Redovisning av resultat

De viktigaste förändringarna och nyheterna sedan utgåva 2 publicerades, där många kunde förutses redan i den ursprungliga projektplanen, kan sammanfattas i följande punkter:

- uppdatering i förhållande till vedertagen praxis baserad på vetenskap
- självkompakterande betong, SKB, en produkt som inte ens finns omnämnd i utgåva 2
- krossballast får ökad användning
- granulerad slagg och flygaska, viss ökning i användning
- hållbarhetsfrågor
- beständighetsfrågor påverkas av nya materialsammansättningar
- högpresterande betong, som nu är integrerat i flera kapitel
- ökad roll för standarder; från svenska regler till EN-standarder; ibland med svenska tillämpningsstandarder

För några utvalda kapitel kan nyheterna och resultaten efter revisionen kortfattat beskrivas genom att här återge deras inledande avsnitt. För vidare information om specifika avsnitt och figurer hänvisas till handboken.

### Kapital 14 Hållfasthet

Hållfastheten, och då främst tryckhållfastheten, är betongens mest åberopade och provade egenskap. Detta sammanhänger med att tryckhållfastheten ger en god bild av betongens allmänna kvalitet. Andra önskade egenskaper, såsom beständighet och täthet, vilka ibland har större betydelse än hållfastheten, är mer eller mindre väl korrelerade till denna.

Då tryckhållfastheten är lätt att bestämma förekommer att krav ställs på denna som ett ställföreträdande krav på någon annan betongegenskap. Med kännedom om tryckhållfastheten kan man uppskatta andra hållfastheter, avsnitt 14.12. Förutom tryckhållfasthet provas även t ex spräckhållfasthet och slaghållfasthet. Det kan ibland vara viktigt att även ställa krav på och prova andra egenskaper, såsom beständighet, nötningsmotstånd, täthet m.m.

Provningstekniska frågor och inverkan på olika hållfasthetsegenskaper behandlas i avsnitt 14.3. Faktorer som är av speciell betydelse för tryckhållfastheten behandlas i avsnitt 14.4. Draghållfasthet behandlas i avsnitten 14.5-14.7, skjuvhållfasthet i 14.9.

Betongens hållfasthet är starkt kopplad till cementpastans struktur och beror i huvudsak på dennas porositet. Porositeten beror i sin tur av vattencementtalet och åldern. Det uppmätta hållfasthetsvärdet påverkas av fuktillståndet vid provningstillfället. Fukt påverkar även den reella hållfasthetsutvecklingen. Temperaturen inverkar på tidpunkten för hårdnandet och på hållfasthetsutvecklingen. Vid extrema temperaturer är även temperaturen vid provningstillfället

väsentlig. Provkroppens form och storlek samt belastningens hastighet och varaktighet inverkar på den uppmätta hållfastheten. Betongens hållfasthet varierar således med sammansättningen, komprimeringen (porositeten), fukthalten, åldern och temperaturen och är beroende av provnings sättet (provkroppens geometri, belastningshastigheten).

Av denna anledning har man standardiserat tillvägagångssätt och förhållanden vid hållfasthetsprovningar, se avsnitt 14.2:2. Provningsmetoder enligt olika standarder kan dock skilja sig mer eller mindre, varför provningsresultaten inte alltid är direkt jämförbara, utan omräkning kan erfordras, se avsnitt 14.12.

Hållfastheten, bestämd enligt ett standardiserat provnings sätt på särskilt gjutna provkroppar, ger ett mått på betongens inneboende hållfasthetsegenskaper, betongens *potentiella hållfasthet*. Hållfastheten i den färdiga konstruktionen blir dock en annan på grund av att förhållandena vid gjutning och härdning avviker från dem som gäller för standardiserad provning, se avsnitt 14.13.

## Kapitel 17 Fukt och betong

Fuktförhållandena i betong och andra cementbaserade material har avgörande inverkan på många processer i materialet och på materialets beteende i olika miljöer. De material som kombineras med betong påverkas ofta av betongens fukt. Det är följaktligen av stor vikt att kunna förutsäga vilka fukttillstånd som kommer att uppstå i ett praktiskt fall, att kunna mäta dem och att kunna avgöra vilken betydelse de har.

Fukttillståndet är en av de parametrar som styr betongens härdnande, och därigenom viktiga egenskaper som t ex täthet mot gaser, vätskor och joner. Fuktförändringar kan ge upphov till krympning och mikrosprickbildning.

Fukten spelar en stor roll vid kemiska reaktioner i betongen och vid fysikaliska delprocesser i olika nedbrytningsfenomen. Fuktsens roll vid frostsador är självklar.

Vid karbonatisering är fukten i porsystemet ett lösningsmedel för reaktanterna. Om karbonatiseringen sker i ett torrare klimat än 80 % RH (relativ fuktighet) blir inte reaktionen fullständig. Det finns då okarbonatiserad kalciumhydroxid, som kan lösas ut om det senare kommer vatten på ytan och då ge upphov till kalkutfällningar. Sker karbonatiseringen vid högre fuktigheter än 80 % RH blir den mera fullständig.

Finns det inte en kontinuerlig vätskefas i porsystemet kan lösta ämnen inte förflyttas och delta i en nedbrytningsprocess. Vid högre fukttillstånd blir transportvägarna flera och större, varför transporthastigheten ökar med ökande fuktinnehåll. Sådana lösta ämnen kan t ex vara alkalier från cementet, som kan ge förtvålning av golvlim och mjukgörare i PVC-mattor men också reagera med viss typ av ballast och ge t ex alkalikiselsyrareaktioner.

Armeringskorrosion påverkas också på ett avgörande sätt av fukttillståndet. Initiering på grund av karbonatisering av täcksiktet sker snabbare om porerna inte är blockerade av fukt utan koldioxidens inträngning kan ske i gasfas. All kalciumhydroxid blir dock inte karbonatiserad då, och en efterföljande fuktförhöjning kan mycket väl realkalisera täcksiktet. Det finns fortfarande en osäkerhet om hur fuktvariationer påverkar karbonatiseringsförloppet och därmed initieringstiden för korrosionen.

När korrosionen väl kommit igång, påverkas korrosionshastigheten starkt av fuktillståndet, se kapitel 25. Vid låga fuktillstånd, under 85 % RH, är det för torrt i porsystemet för att en elektrolyt skall bildas intill armeringen. Frånvaron av elektrisk kontakt mellan anod och katod ger låg korrosionshastighet. Ju fuktigare det sedan blir, desto större blir korrosionshastigheten, men vid 95 % RH börjar den att sjunka på grund av syrebrist. Syrgasdiffusionen genom täcksiktet är begränsande vid så höga fuktillstånd.

## Kap 23 Betongkonstruktioners beständighet och livslängd

### Miljöpåverkan på konstruktionen

Varje betongkonstruktion påverkas av den omgivande miljön. Denna påverkan är oftast negativ men kan i vissa avseenden vara positiv.

Negativ påverkan av yttre miljö orsakas av direkt angrepp på konstruktionen av aggressiva komponenter hos den yttre miljön, t.ex. kemiska ämnen eller frost, som bryter ned betongen, koldioxid i luften som får den att karbonatisera och därmed orsaka armeringskorrosion, eller omgivande salthaltigt vatten som kan medföra både armeringskorrosion och betongnedbrytning. Andra negativa effekter stimulerade av yttre miljöfaktorer är strukturförändringar inne i betongen. Sådana förändringar är expansiva ballastreaktioner och nedbrytande sekundära cementreaktioner. Alla dessa reaktioner stimuleras av tillgång till fukt.

Positiv påverkan av yttre miljö utgörs främst av den fortgående hydratationen av cementkorn vilken sker under mycket lång tid. Hydratationen ger successivt ökad hållfasthet, samtidigt som den medför självläkning av sprickor och andra defekter som uppstår under årens lopp. Betong är ett unikt konstruktionsmaterial genom att den har denna förmåga att kunna förbättras med tiden.

I måttligt aggressiva miljöer kommer de positiva effekterna att överväga, dvs. betongkonstruktionens allmänna kvalitet tillväxer i stort sett under hela brukstiden. Att så är fallet framgår av studier av hållfasthetstillväxten under lång tid hos betongprover som vid tre olika tidpunkter placerats inomhus och utomhus i staten Wisconsin i norra USA. Utomhusproverna har utsatts för såväl nederbörd som upprepade frysning och upptining. Oavsett initialkvalitet har hållfastheten ökat i stort sett kontinuerligt under mer än 50 år. Figuren visar att vissa temporära hållfasthetsnedgångar skett under årens lopp, men betongen har återhämtat sig. Detta beror troligen på att skador läkts. De först utsatta proverna år 1910 och 1923 var tillverkade med grovmalda portlandcement, vilket kan förklara den lägre begynnelsehållfastheten och den stora hållfasthetstillväxten. Hydratationen är nämligen långsam i grovmalda cement. Prover som sattes ut 1937 hade mera finmalt portlandcement. Även för dessa prover tillväxer dock hållfastheten. Dagens portlandcement är ännu mer finmalt och torde därför ha lägre möjlighet till långtidstillväxt av hållfastheten. Resultat av en 7-årig studie av svenska portlandcement (CEM I) visas i figur 23.1:2. Anläggningscementet som var mera grovmalt än de två andra och som hade mera gynnsam mineralogisk sammansättning (högre halt långsamreagerande C<sub>2</sub>S) gav störst hållfasthetstillväxt. Ytterligare exempel på framförallt oarmerade betongkonstruktioners höga inneboende beständighet i måttligt aggressiva miljöer ges i långtidsuppföljningar i Tyskland, Walz (1976), och i Danmark, Christensen (1986).

Moderna cement innehåller ofta avsevärda mängder mineraliska tillsatsmaterial. Flera av dessa, t.ex. mald granulerad masugnsslagg och flygaskor, reagerar mera långsamt än portlandcement vilket bör ge långvarig hållfasthetstillväxt, vilket är positivt. Exempel på långtidsuppföljningar av tryckhållfastheten hos betong med slaggcement visas i Tabell 23.1:1. Det är ingen stor skillnad mellan cementsorterna. En del av skillnaden beror på att olika vattencementtal använts. Högre vct visade sig ge större ökning av långtidshållfastheten.

Betong med silikastoft har visat sig inte ge någon hållfasthetsökning efter några månader, Persson (1998). Hur hållfasthetstillväxten under lång tid ser ut hos betong med olika typer av flygaska är obekant.

Eftersom såväl slagg som flygaska och silikastoft reagerar med den kalciumhydroxid som frisätts vid portlandklinkerns reaktion, kommer mängden kalciumhydroxid i betongen att bli lägre än för rent portlandcement. Detta innebär att förmågan till självläkning minskar. Silikastoft och granulerad masugnsslagg ger särskild stor minskning av mängden kalciumhydroxid. 10% inblandning av silikastoft räknat på mängden cement ger ca 50% minskning av mängden kalciumhydroxid medan 65% inblandning av slagg ger ca 80% minskning, Peterson&Warris (1981).

### Exempel på självläkning

Samband för självläkning med avseende på tryckhållfastheten exemplifieras. Handboken visar resultatet av hållfasthetsmätningar på betongkuber som vid 28 dygns ålder tryckbelastats till nästan totalt brott och som sedan lagrats i hög relativ fuktighet under viss tid, och därefter återigen tryckbelastats till brott. Hållfasthetsnedgången jämfört med det nollprov som direkt belastats till brott är i stort sett obefintlig. Vissa prover fick självläka en andra gång varefter de tryckprovades till brott en tredje gång. Även nu är resterande hållfasthet avsevärd. Det finns liknande försök som tyder på att inverkan av självläkning är lägre när det gäller draghållfasthet, Lauer&Slate (1956).

Även sprickor kan självläka, vilket medför att tätheten mot vattengenomströmning och kloridinträngning till stor del kan återställas. Det är t.ex. en gammal välkänd teknik att tätta genomgående vattenförande sprickor i vattenbyggnadskonstruktioner genom att värma och därmed torka nedströmsytan. Kalciumhydroxid som lösts i det genomströmmande vattnet faller då ut i sprickan och tätar denna. Betong som tillverkats med slaggcement med hög slagghalt har visat sig inte ha denna förmåga. Detta beror med stor sannolikhet på att mängden lösbar kalk är låg i sådan betong.

Även kloridinträngning i sprickor tycks kunna minska genom självläkning (Fagerlund&Hassanzadeh, 2011). Ett exempel visas i handboken. Armerade prover tillverkade med portlandcement (vct 0,45) har försetts med böjsprickor med vidden 0,2 mm respektive 0,4 mm mätt vid ytan. Proverna placerades i vatten som hämtats från havet i Kattegatt. Efter mer än 2 års kontinuerlig exponering studerades kloridinträngningen i sprickväggarna. Ur kloridprofilerna kan en transportkoefficient för klorid utvärderas. Denna är av samma storleksordning i sprickan som i den sprickfria delen av betongen. Orsaken till spricktätning har angetts vara utfällning av kalciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) som bildas genom reaktion mellan löst kalciumhydroxid i vattnet i sprickan och lösta karbonatjoner i vattnet.

## Kap 24 Frostbeständighet

### Problemställning och olika typer av frostsador-skadebild

I detta kapitel behandlas enbart den hårdnade betongens frostbeständighet. Frysning av den färska betongen behandlas i Kapitel 9.

Hårdnad betong med normal naturballast har en total porositet varierande mellan ca 12 % och ca 20 %. Den allra största andelen av dessa porer utgörs av fina gelporer och kapillärporer, se kap 10. Dessa vattenfylls lätt vid normal utomhusexponering av betongen. När betongen fryser övergår en viss andel av porvattnet till is, varvid så stora spänningar kan uppstå i betongen att den skadas allvarligt. Särskilt utsatt är betong som saknar luftinblandning, betong som är ung samt betong vars yta exponeras för svaga saltlösningar, t.ex. från tösalter eller havsvatten, samtidigt som den fryser. Skaderisken ökar med ökad fuktbelastning. En konstruktionsdel som enbart under korta tider utsätts för fritt vatten men därefter kan torka, t.ex. vertikala ytor på en fasad, är därför betydligt mindre påverkad än en konstruktionsdel som ständigt utsätts för fukt och frost, t.ex. betong i plaskzonen eller närmast över en fri vattenyta.

Frostsador visar sig ofta som mer eller mindre tjocka avskalningar av exponerade betongytor. Dessa får ett skrovligt utseende och i allvarliga fall är skadorna så djupa att grövre ballastkorn friläggs och lossnar. Avskalningar är speciellt vanliga och djupa när tösalter eller havsvatten (även bräckt vatten) är i kontakt med betongytan. De är oftast koncentrerade till partier som är särskilt fuktiga, t.ex. vid genomgående fogar i vägbanor och stödmurar, omedelbart över vattenlinjen hos vattenbyggnadskonstruktioner, hos ytor med dålig avrinning och hos kantbalkar på broar. Att i första hand exponerade ytor skadas beror på att fuktnivån där ofta är högre än i konstruktionens inre delar. Man skall emellertid inte utesluta att ytliga skador även åtföljs av inre förstörelse.

I andra fall har man enbart inre förstörelse. Denna kan observeras på betongytan, som får ett tätt mönster av sprickor ("krackelering"). Ytorna kan däremot vara helt fria från avskalningar. Inre frostsador förekommer t.ex. i frostutsatta konstruktioner som står i vatten eller är grundlagda under grundvattenytan. Vatten suges då ständigt upp kapillärt. Den kritiska fuktnivån med avseende på frostsador kan då överskridas i betongens inre, medan ytorna blir i genomsnitt torrare på grund av avdunstning. Inre förstörelse förekommer även vid viss porös naturballast, som absorberar vatten, varvid de frysande ballastkornen verkar sprängande.

Ett allvarligt specialfall av frostsador uppstår när vattenfyllda ingjutna rör fryser, t.ex. rör som använts för kylning av den färska betongen men som inte tömts efter användning. De spänningar som då uppkommer kan vara tillräckliga för att spränga sönder betongen.

Vid bedömning av risken för frostsador kan man särskilja två fall:

- Frysning sker i saltfri miljö.  
Angreppet sker oftast i betongens inre delar, medan ytorna ofta är intakta eller bara lätt skadade. Angreppet kan relativt lätt bemästras genom en något förhöjd lufthalt, användning av lågt vattenbindemedelstal och användning av frostbeständig ballast.



- Frysning sker i närvaro av salthaltigt vatten. Angreppet är nästan alltid ett ytangrepp. Det bemästras genom förhöjd lufthalt, användning av lågt vattenbindemedelstal och användning av frostbeständig ballast.

## Konsekvenser av frostsador

Frostsador medför väsentligen tre typer av konsekvenser:

1. Minskning av konstruktionens säkerhet genom förlust av hållfasthet och styvhet.
2. Minskning av konstruktionens livslängd genom negativ påverkan på andra nedbrytningsmekanismer, t.ex. minskad täthet mot aggressiva ämnen och minskat skydd mot armeringskorrosion.
3. Negativ estetisk påverkan. Även en avskalning som är så liten att den inte medför någon påverkan på betongens bärförmåga kan ge stark negativ påverkan på konstruktionens utseende.

## Minskning av konstruktionens bärförmåga och säkerhet

Mätningar av maximala förluster av hållfasthet och styvhet som kan uppstå till följd av frost redovisas i rapporten CONTECVET (2005a). Skadeomfattningen beror på betongens fuktillstånd i samband med frysningen. Exempel på inverkan av betongens fuktillstånd på dess E-modul visas i figur 24.4:2. Som synes kan E-modulförlusten bli mycket hög. Detsamma gäller även för draghållfasthet och vidhäftning mellan betong och armering.

## Minskad livslängd

En analys av hur frostangreppet påverkar andra nedbrytningsfenomen genomförs i CONTECVET (2005b)

### *Minskad tid till start av armeringskorrosion*

Ytavskalning orsakad av frost i kombination med salt kommer att gradvis minska täcksiktets tjocklek. Detta resulterar i att tiden fram till dess armeringskorrosion startar blir kortare än om ingen avskalning skett.

### *Ökade inre angrepp*

Inre frostsador öppnar strukturen och ökar därmed betongens porositet. Angrepp som till stor del styrs av permeabilitet, t.ex. kalkurlakning, sulfatangrepp, alkali-kiselsyraangrepp, kan därför ske snabbare, vilket minskar konstruktionens livslängd.

## **Kap 35 Hållbarhet**

Detta kapitel i Betonghandboken ger aktuell information, kunskap och tolkningar inom det vida område som hållbarhet omfattar. Hållbarhet bygger på, och utgår ifrån, Betonghandbokens traditionella kunskapsområden men ämnet kräver en bredare ansats som även beaktar byggfysik,

kemikalier, samhällsbyggandets sociala och ekonomiska aspekter mm. Därför finns i detta nya kapitel en utökad bakgrundsbeskrivning liksom en för Betonghandboken annorlunda.

Omställningen till ett hållbart samhälle ställer nya krav på samhällsbyggandets aktörer.

Komplexiteten i frågorna kräver både samverkan och respekt för varandras kompetens och inte minst en ökad kunskap.

Hållbarhet kräver ett livscykelperspektiv, beaktande av många olika aspekter samt dokumenterad erfarenhet och fakta. Först när det byggda i sin omgivning, system och samhälle är omtyckt, eftertraktat, funktionellt, inte bara vid nybyggnad utan under hela sin livstid, och inte systematiskt utnyttjar jordens resurser och ämnen, kan man tala om ett hållbart byggande.

Som ledande byggmaterial måste betongbyggandet ständigt förbättra sin hållbarhet. Detta är en viktig drivkraft för fortsatt forskning och utveckling av betongbyggandet.

## BILAGA 1

<b>Kap</b>	<b>Del 1 Delmaterial samt färsk och hårdnande betong</b>	<b>Kap</b>	<b>Del 2 Hårdnad betong, fysikaliska egenskaper och beständighet</b>
1	Betongbyggnadsteknikens nuläge och framtid	14	Hållfasthet
2	Cement	15	Vidhäftning
3	Ballast	16	Deformationer under last
4	Vatten	17	Fukt och betong
5	Tillsatsmedel	18	Krympning hos hårdnad betong
6	Tillsatsmaterial	19	Egenspänningar och sprickor av temperaturrörelser och krympning, värme- och mognadsutveckling
7	Armering	20	Utmattning
8	Färsk betong	21	Speciella egenskaper
9	Hårdnande betong	22	Sprickor
10	Struktur och strukturutveckling	23	Betongkonstruktioners beständighet och livslängd
11	Proportionering generellt	24	Frostbeständighet
12	Proportionering av betong - tryckhållfasthet, vattentätthet och frostbeständighet	25	Armeringskorrosion
13	Proportionering av betong med speciella egenskaper och för speciella ändamål	26	Kemiskt angrepp
		27	Beständighet hos vissa material i förbindelse med betong
	Nedan uppräknade fyra kapitel gavs ut som särtryck 2016	28	Brandbeständighet
23	Betongkonstruktioners beständighet och livslängd	29	Nötningsmotstånd
24	Frostbeständighet	30	Ytskydd för betong
28	Brandbeständighet	31	Fiberbetong
35	Hållbarhet (Nytt kapitel)	32	Polymerer och betong
		33	Lättballastbetong
		34	Skumbetong
		35	Hållbarhet