

# INNEHÅLL

## **Skribenter och granskare 13**

## **Förord 15**

## **1. Betong, betongbyggande och betongbyggnad 17**

- 1.1 Vad är betong? 17
  - 1.1:1 Kort historik 18
  - 1.1:2 Betongens moderna utveckling 20
  - 1.1:3 Hållbarhet 22
  - 1.1:4 Tillämpningar 25
  - 1.1:5 Betongens framtid 27
- 1.2 Litteratur 29

## **2. Cement 31**

- 2.1 Inledning 31
- 2.2 Definitioner 31
- 2.3 Cementtyper 32
  - 2.3:1 Portlandcement, CEM I 32
  - 2.3:2 Sammansatta Portlandcement, CEM II 33
  - 2.3:3 Slaggcement, CEM III 35
  - 2.3:4 Övriga cementtyper 35
  - 2.3:5 Cement med särskilda egenskaper 35
  - 2.3:6 Cement för speciella ändamål 36
  - 2.3:7 Äldre cementsorter 39
- 2.4 Indelning, klassificering 39
  - 2.4:1 Svensk och europeisk standard SS-EN 197-1 39
  - 2.4:2 Svensk nationell cementstandard 41
  - 2.4:3 Exempel på beteckningar 41
  - 2.4:4 Övriga standarder 41
- 2.5 Kemisk sammansättning 42
  - 2.5:1 Allmänt 42
  - 2.5:2 Cementmineral 43
- 2.6 Fysikaliska egenskaper 45

- 2.7 Portlandcementets reaktion med vatten – hårdnandet 47
  - 2.7:1 Allmänt 47
  - 2.7:2 Kemiska reaktioner 47
  - 2.7:3 Vattenfasen 49
  - 2.7:4 Strukturutveckling 50
  - 2.7:5 Värmeutveckling 52
- 2.8 Cement i betong 53
  - 2.8:1 Allmänt 53
  - 2.8:2 Inverkan på färsk betong 54
  - 2.8:3 Inverkan på ung betong 56
  - 2.8:4 Inverkan på hårdnad betong 57
- 2.9 Provningsmetoder 60
- 2.10 Tillverkning och kontroll 61
  - 2.10:1 Råmaterial 61
  - 2.10:2 Process 62
  - 2.10:3 Utlastning och distribution 66
  - 2.10:4 Kvalitetskontroll 66
  - 2.10:5 Miljöpåverkan 67
- 2.11 Litteratur 67

### **3. Ballast 69**

- 3.1 Definitioner, indelning, allmänna egenskaper 69
  - 3.1:1 Inledning och grundläggande begrepp 69
  - 3.1:2 Ballasttyper 71
  - 3.1:3 Klassificering av bergartstyper 72
  - 3.1:4 Sekundära omvandlingar 73
- 3.2 Egenskaper av betydelse för betongens sammansättning 74
  - 3.2:1 Färsk betong 74
  - 3.2:2 Gradering 75
  - 3.2:3 Kornform, ytbeskaffenhet 80
  - 3.2:4 Egenskaper av betydelse för hårdnad betong 83
- 3.3 Andra viktiga egenskaper 84
  - 3.3:1 Vattenabsorption och fukthalt 84
  - 3.3:2 Organiska föroreningar 84
  - 3.3:3 Kloridhalt 85
  - 3.3:4 Ytbeläggningar av finmaterial 85
  - 3.3:5 Radioaktivitet 86
- 3.4 Egenskaper av betydelse i speciella fall 86
  - 3.4:1 Allmänt 86
  - 3.4:2 Mekaniska egenskaper 86
  - 3.4:3 Vidhäftning 87
  - 3.4:4 Termiska egenskaper 87
- 3.5 Olämpliga bergartsmaterial 88
  - 3.5:1 Allmänt 88
  - 3.5:2 Från fysikalisk synpunkt olämplig ballast 88
  - 3.5:3 Från kemisk synpunkt olämplig ballast 88
- 3.6 Litteratur 89

## **4. Blandningsvatten 91**

- 4.1 Inledning 91
- 4.2 Blandningsvatten 92
  - 4.2:1 Klassificering efter ursprung 92
  - 4.2:2 Skadliga ämnen samt färg och lukt 93
  - 4.2:3 Provning av blandningsvatten 94
  - 4.2:4 Processvatten 95
- 4.3 Litteratur 96

## **5. Tillsatsmedel 97**

- 5.1 Allmänt 97
- 5.2 Flyttillsatsmedel och vattenreducerande tillsatsmedel 99
  - 5.2:1 Allmänt 99
  - 5.2:2 Användning 101
  - 5.2:3 Verkningsätt 102
- 5.3 Luftporbildande tillsatsmedel 108
  - 5.3:1 Allmänt 108
  - 5.3:2 Användning 108
  - 5.3:3 Verkningsätt 110
- 5.4 Accelererande tillsatsmedel 112
  - 5.4:1 Allmänt 112
  - 5.4:2 Användning 113
  - 5.4:3 Verkningsätt 113
- 5.5 Retarderande tillsatsmedel 115
  - 5.5:1 Allmänt 115
  - 5.5:2 Användning 115
  - 5.5:3 Verkningsätt 116
- 5.6 Sprutbetongtillsatser 119
  - 5.6:1 Allmänt 119
  - 5.6:2 Användning 119
  - 5.6:3 Verkningsätt 120
- 5.7 Övriga tillsatsmedel 121
  - 5.7:1 Fryspunktsnedsättande medel 121
  - 5.7:2 Expanderande medel 122
  - 5.7:3 Krympreducerande medel 123
  - 5.7:4 Pumpförbättrande medel 123
  - 5.7:5 Stabiliserande medel 124
  - 5.7:6 Antiutvaskningsmedel 124
  - 5.7:7 Hydrofoba medel 125
  - 5.7:8 Vattentätande medel 125
  - 5.7:9 Skumbildande medel 126
  - 5.7:10 Skumdämpande medel 126
  - 5.7:11 Korrosionsinhiberande medel 126
  - 5.7:12 Medel till jordfuktig betong 127
  - 5.7:13 Superabsorberande polymer 127
  - 5.7:14 Medel som hämmar alkaliballastreaktioner 127
  - 5.7:15 Polymertillsatser 128

- 5.8 Miljö 128
  - 5.8:1 Allmänt 128
  - 5.8:2 Emissioner och lakning 129
  - 5.8:3 Arbetsmiljö 129
- 5.9 Tillverkning och hantering av tillsatsmedel 130
  - 5.9:1 Tillverkning av tillsatsmedel 130
  - 5.9:2 Tillsatsmedelshantering i betongproduktion 130
- 5:10 Certifiering och standarder 131
  - 5.10:1 Certifieringsregler 131
  - 5.10:2 Standarder 132
- 5.11 Litteratur 133

## **6. Tillsatsmaterial 139**

- 6.1 Allmänt 139
  - 6.1:1 Materialtyper 139
  - 6.1:2 Användning 141
  - 6.1:3 Reaktivitet 142
- 6.2 Silikastoft 150
  - 6.2:1 Allmänt 150
  - 6.2:2 Kemisk sammansättning 150
  - 6.2:3 Fysikaliska egenskaper 151
  - 6.2:4 Reaktioner med cement 152
  - 6.2:5 Kvalitetskrav 154
  - 6.2:6 Inverkan på betong 154
- 6.3 Flygaska 158
  - 6.3:1 Allmänt 158
  - 6.3:2 Kemisk sammansättning 159
  - 6.3:3 Fysikaliska egenskaper 160
  - 6.3:4 Reaktioner med cement 161
  - 6.3:5 Kvalitetskrav 164
  - 6.3:6 Inverkan på betong 165
- 6.4 Masugnsslagg 169
  - 6.4:1 Allmänt 169
  - 6.4:2 Kemisk sammansättning 169
  - 6.4:3 Fysikaliska egenskaper 171
  - 6.4:4 Reaktioner med cement 172
  - 6.4:5 Kvalitetskrav 176
  - 6.4:6 Inverkan på betong 176
- 6.5 Kalkstensfiller 181
  - 6.5:1 Allmänt 181
- 6.6 Övriga tillsatsmaterial 182
  - 6.6:1 Allmänt 182
- 6.7 Litteratur 182

## **7. Armering 193**

- 7.1 Inledning 193
- 7.2 Ospänd armering 193
  - 7.2:1 Allmänt 193
  - 7.2:2 Klassificering och beteckning av armering 194
  - 7.2:3 Geometri 196
  - 7.2:4 Mekaniska egenskaper 197
  - 7.2:5 Tekniska egenskaper 200
- 7.3 Spännarmering 203
  - 7.3:1 Allmänt 203
  - 7.3:2 Klassificering 204
  - 7.3:3 Geometri 204
  - 7.3:4 Mekaniska egenskaper 204
  - 7.3:5 Tekniska egenskaper 209
- 7.4 Korrosionsskyddad armering 211
  - 7.4:1 Allmänt 211
  - 7.4:2 Epoxibelagd armering 211
  - 7.4:3 Rostfri armering 213
  - 7.4:4 Försinkad armering 214
- 7.5 Icke metallisk armering 214
  - 7.5:1 Allmänt 214
  - 7.5:2 Materialdata 215
  - 7.5:3 Icke metalliska stänger 219
  - 7.5:4 Beständighet 220
  - 7.5:5 Bruksgränstillstånd 221
  - 7.5:6 Brottgränstillstånd 221
- 7.6 Textilarmering 222
  - 7.6:1 Allmänt 222
  - 7.6:2 Mekaniskt verkningssätt 223
  - 7.6:3 Beständighet 224
- 7.7 Litteratur 225

## **8. Färsk betong 227**

- 8.1 Inledning 227
- 8.2 Krav på färsk betong 228
  - 8.2:1 Inledning 228
  - 8.2:2 Krav enligt SS-EN 206 och SS 137003 228
  - 8.2:3 Provningsmetoder enligt SS-EN 206 229
  - 8.2:4 Krav enligt produktstandarder och utförandestandarder 230
  - 8.2:5 Krav kopplade till olika aktörer 231
  - 8.2:6 Anpassning av den färska betongen till kraven 232
- 8.3 Arbetbarhet och konsistens 234
  - 8.3:1 Allmänt 234
  - 8.3:2 Definitioner 235
  - 8.3:3 Inverkande faktorer 236
  - 8.3:4 Konsistensförlust 250

- 8.4 Reologi 254
  - 8.4:1 Definitioner 254
  - 8.4:2 Reologiska modeller 255
  - 8.4:3 Tixotropi 262
  - 8.4:4 Inverkande faktorer 264
- 8.5 Självkompakterande betong – SKB 268
  - 8.5:1 Historik 268
  - 8.5:2 Utmärkande för SKB 270
  - 8.5:3 Proportioneringsprinciper 283
- 8.6 Stabilitet 288
  - 8.6:1 Allmänt 288
  - 8.6:2 Mekanismer bakom separation 289
  - 8.6:3 Styrning av stabilitet 293
  - 8.6:4 Inverkan av separation på beständighet 293
- 8.7 Tillstyvnande 294
  - 8.7:1 Översikt 294
  - 8.7:2 Inverkande faktorer 295
  - 8.7:3 Provning och bedömning av glättningstid 297
- 8.8 Speciella egenskaper 298
  - 8.8:1 Vakuumbehandling 298
  - 8.8:2 Pumpning 298
  - 8.8:3 Undervattensgjutning 300
  - 8.8:4 Direktavformning 301
- 8.9 Mätmetoder för färsk betong 302
  - 8.9:1 Mätmetoder konventionell betong 302
  - 8.9:2 Mätmetoder – SKB 309
  - 8.9:3 Reologiska mätmetoder 315
- 8.10 Litteratur 320

## **9. Tidig egenskapstillväxt och hårdnande betong 327**

- 9.1 Inledning 327
- 9.2 Plastisk krympning 330
  - 9.2:1 Allmänt 330
  - 9.2:2 Mekanismen 331
  - 9.2:3 Inverkande faktorer 334
  - 9.2:4 Åtgärder 339
- 9.3 Tidig frysning 340
  - 9.3:1 Allmänt 340
  - 9.3:2 Skademekanismer 340
  - 9.3:3 Erforderlig förhärdning 342
  - 9.3:4 Skyddsåtgärder 346
- 9.4 Tidig autogen krympning 346
  - 9.4:1 Allmänt 346
  - 9.4:2 Definitioner 347
  - 9.4:3 Mekanismer 348
  - 9.4:4 Mätning av tidiga deformationer 354

- 9.5 Hållfasthet 355
  - 9.5:1 Tryckhållfasthet 355
  - 9.5:2 Draghållfasthet 364
  - 9.5:3 Inverkan av tidig belastning 368
- 9.6 Deformationsegenskaper i tidig ålder 369
  - 9.6:1 Allmänt 369
  - 9.6:2 Spännings-deformationskurva 369
  - 9.6:3 Gränsdeformation 370
  - 9.6:4 Elasticitet och krypning (viskoelastiska egenskaper) 373
  - 9.6:5 Tvärkontraktion 381
  - 9.6:6 Brottmekaniska egenskaper i tidig ålder 381
- 9.7 Inverkan av vibrationer 382
- 9.8 Litteratur 384

## **10. Struktur och strukturutveckling 391**

- 10.1 Betong som kompositmaterial 391
- 10.2 Ballastens struktur 393
- 10.3 Cementpastans struktur och strukturutveckling 395
  - 10.3:1 Strukturmodeller 395
  - 10.3:2 Strukturutveckling hos cementpasta under hårdnandet 397
  - 10.3:3 Cementgelens struktur 401
  - 10.3:4 Hydratationsgraden och dess tillväxt 405
  - 10.3:5 Cementpastans porositet, porstruktur och täthet 412
  - 10.3:6 Cementpastans densitet 417
  - 10.3:7 Självuttorkning och dess betydelse 418
  - 10.3:8 Struktur hos cementpasta med mineraliska tillsatsmaterial 420
- 10.4 Fasgränser mellan ballast och cementpasta 436
- 10.5 Betongens porositet och densitet 439
  - 10.5:1 Generella formler 439
  - 10.5:2 Porositet vid normala betongsammansättningar 441
- 10.6 Porositet, densitet, fukttinhåll. Definitioner och samband 442
- 10.7 Litteratur 444

## **11. Proportionering generellt 447**

- 11.1 Allmänt 447
- 11.2 Proportioneringsprinciper 448
- 11.3 Olika metoder 449
  - 11.3:1 Metoder baserade på graderingskurvor 449
  - 11.3:2 Metoder baserade på partikelpackning 454
  - 11.3:3 Proportionering där reologin utnyttjas 457
  - 11.3:4 Andra metoder 458
- 11.4 Steg vid bestämning av betongsammansättning 458
- 11.5 Förundersökning 459
  - 11.5:1 Syfte 459
  - 11.5:2 Genomförande 459
  - 11.5:3 Provningar 460
  - 11.5:4 Korrigering av sammansättning 461

- 11.6 Sammansättning enligt standardiserad föreskriven betong 461
  - 11.6:1 Allmänt 461
  - 11.6:2 Krav på delmaterial för att tabellen ska gälla 462
  - 11.6:3 Tabell med föreslagna recept 462
  - 11.6:4 Korrektion av sammansättningen 462
- 11.7 Satsstorlek och blandningsrecept 463
  - 11.7:1 Beräkning av satsstorlek 463
  - 11.7:2 Blandningsrecept 463
- 11.8 Litteratur 464

## **12. Proportionering av betong 467**

- 12.1 Bakgrund 467
- 12.2 Princip 467
- 12.3 Index, beteckningar och förklaringar av begrepp 468
  - 12.3:1 Index 468
  - 12.3:2 Beteckningar 468
  - 12.3:3 Förklaringar 470
- 12.4 Indata till proportioneringsmetoden 470
  - 12.4:1 Betongens konsistens 470
  - 12.4:2 Vattencementtal, *vct* 471
  - 12.4:3 Andel ballast i betong 473
  - 12.4:4 Andel cement och vatten i betong 479
  - 12.4:5 Korrigering av ballast- och vattenhalter på grund av fukt i ballasten 479
  - 12.4:6 Korrigering av vatten-, cement- och ballasthalter i lufttillsatt betong 480
  - 12.4:7 Betong med flyttillsatsmedel eller vattenreducerande tillsatsmedel 481
- 12.5 Metodgenomgång 482
  - 12.5:1 Betong utan tillsatsmedel 482
  - 12.5:2 Betong med luftporbildande tillsatsmedel 489
  - 12.5:3 Betong med flyttillsatsmedel när lösare konsistens önskas 495
  - 12.5:4 Betong med vattenreducerande tillsatsmedel när lägre vattenhalt önskas 499
- 12.6 Litteratur 502

## **13. Proportioner av betong med speciella egenskaper och för speciella ändamål 503**

- 13.1 Inledning 503
- 13.2 Betongmassa med speciella egenskaper 503
  - 13.2:1 Betong för vakuumbehandling 503
  - 13.2:2 Betong för undervattensgjutning 504
  - 13.2:3 Betong för pumpning 504
- 13.3 Betong med särskilt god beständighet 505
  - 13.3:1 Bakgrund 505
  - 13.3:2 God frostbeständighet 506
  - 13.3:3 Gott korrosionsskydd för armering 506



- 13.3:4 Kemisk beständighet 506
- 13.3:5 Betongsammansättning för olika konstruktionstyper och exponeringsklasser 507
- 13.4 Betong för golv och beläggning 510
  - 13.4:1 Allmänt 510
  - 13.4:2 Golvbetong 510
  - 13.4:3 Betong till betongplaner utomhus 510
  - 13.4:4 Vältbetong 510
  - 13.4:5 Betong till betongvägar och flygfält 511
- 13.5 Betong för betongvaror 513
  - 13.5:1 Allmänt 513
  - 13.5:2 Betongrör 513
  - 13.5:3 Markbetongprodukter 514
  - 13.5:4 Mursten och murblock 515
  - 13.5:5 Takpannor 516
- 13.6 Speciella hållfasthetsegenskaper 516
  - 13.6:1 Böjdraghållfasthet 516
  - 13.6:2 Centrisk draghållfasthet 517
  - 13.6:3 Hög hållfasthet 518
  - 13.6:4 Ultrahögpresterande betong (UHPC) 518
  - 13.6:5 Slaghållfasthet 519
- 13.7 Betong med silikastoft 520
  - 13.7:1 Inledning 520
  - 13.7:2 Egenskaper 520
  - 13.7:3 Förundersökning 521
- 13.8 Speciella betonger 521
  - 13.8:1 Hålrumsbetong 521
  - 13.8:2 Prepaktbetong eller injekteringsbetong 521
  - 13.8:3 Färgad betong 522
  - 13.8:4 Tung betong 523
  - 13.8:5 Lättbetong 524
- 13.9 Referensbetong för provning av tillsatsmedel 529
  - 13.9:1 Allmänt 529
  - 13.9:2 Delmaterial 529
  - 13.9:3 Referensbetong 530
  - 13.9:4 Referensbruk 530
- 13.10 Litteratur 531

## **Sakordsregister 533**

# FÖRORD

*Betonghandbok Material* beskriver materialegenskaperna hos betong och dess delmaterial. Även beräkningsmodeller ges för utveckling och förändring av ett flertal egenskaper.

Handboken utgavs för första gången 1980. Den reviderades 1994 och publicerades då som utgåva 2. Den omarbetas nu till en ny, utökad utgåva 3, uppdelad i två delar. Den första delen (*Del 1: Delmaterial samt färsk och hårdnande betong*) föreligger nu och den ges ut i både tryckt och digital form. Andra delen kommer att heta *Del 2: Hårdnad betong, fysikaliska egenskaper och beständighet* och är under utarbetande. Några av kapitlen från del 2 ges också ut som särtryck i samband med publiceringen av del 1. Andra tidigare utgivna handböcker inom området är *Betonghandbok Arbetsutförande*, *Betonghandbok Högpresterande betong* och *Betonghandbok Konstruktion*.

De viktigaste skälen till revideringen av *Betonghandbok Material* beaktar nya forskningsrön och standarder samt utvecklingen av såväl nya delmaterial som nya betongsammansättningar, t.ex. självkompakterande betong. Betongtillverkare använder alltmer krossballast eftersom naturgruset är en ändlig resurs. Vissa tillsatsmaterial används också mer idag, exempelvis granulerad slagg och flygaska. Nya materialsammansättningar påverkar beständigheten vilket också måste behandlas. Ett alltmer ökande fokus på ekologisk hållbarhet genomsyrar hela byggsektorns arbete.

*Betonghandbok Material* är en viktig referenslitteratur för yrkesverksamma ingenjörer och ett värdefullt redskap för utbildare. Denna revidering möjliggör för industrin att bättre utnyttja senaste kunskap från forskning och bedriva utveckling genom att kunskapen finns kondenserad och beskriven på armslängds avstånd i bokhyllan eller sökbar i datorn. Den är ur ett internationellt perspektiv unik genom sin omfattning och höga nivå. Texterna har försetts med omfattande källhänvisningar till forskningsartiklar och undersökningar.

Tidigare utgåvor har getts ut av Cementa (författare) och Svensk Byggtjänst (förläggare), som tillsammans har finansierat utgivningen. Vid denna utgåva är både Cementa och Svenska Betongföreningen författare. Svensk Byggtjänst är förläggare.

Följande styrgrupp har ansvarat och utövat ledningen för projektet: Richard McCarthy, VD Svenska Betongföreningen (ordförande); Ingvar Börtemark, Inbocon (projektledare fr.o.m. november 2014); Gunilla Teofilusson, CBI Betonginstitutet (projektledare t.o.m. oktober 2014); Christer Ljungkrantz, Cementa; Markus Peterson, Svensk Betong; Ulf Jönsson, Svenska Betongföreningen; Helen Strandgren, Svensk Byggtjänst (fr.o.m. december 2014); Jonas Sjögren, Svensk Byggtjänst (t.o.m. november 2014); Hans Hedlund, SBUF.

Styrgruppen har eftersträvat att innehållet i största möjliga utsträckning ska motsvara handbokens målsättning. Den har också starkt verkat för samordning mellan de olika kapitlen. Detta har i många fall inneburit kompletteringar och justeringar i samråd med skribenterna. Trots detta kan viss överlappning förekomma. Respektive skribent har ytterst ansvaret för innehållet i sitt kapitel.

Specialister från industri- och konsultföretag, tekniska högskolor och forskningsinstitut har varit engagerade som skribenter. Varje kapitel har sakgranskats av en eller flera tekniska granskare. Till dessa skribenter och granskare vill vi framföra ett stort och varmt tack.

Vi vill också framföra ett stort tack till alla de finansiärer som genom sina bidrag möjliggjort detta arbete. 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: Abetong, BASF, Betongindustri, Byggnadstekniska Byrån, Cemex, LTU, Lujabetong, Modern Betongteknologi, Pen-Tec, SSAB Merox, Strängbetong och Swerock. Efter projektets start gjordes också en överenskommelse med Byggrådet 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. Dessa företag vill vi också uttrycka vår tacksamhet till.

Stockholm i november 2016

Richard McCarthy  
Svenska Betongföreningen

Christer Ljungkrantz  
Cementa

# 1

## Betong, betongbyggande och betongbyggnad

---

*Johan Silfwerbrand*

### 1.1 Vad är betong?

Räknar man bort fyllnadsmaterial som sten, grus och sand är betong det i särklass mest använda byggmaterialet. Den globala årsproduktionen uppgår till ungefär 5 km<sup>3</sup>, vilket till exempel är detsamma som 2 200 Cheops-pyramider. Betong består alltid av cement, vatten, sand, grus och sten. Därutöver kan betong innehålla olika tillsatsmedel för att ge betongen specifika egenskaper i det färska eller hårdnade stadiet. I sin tur kan cementet förutom klinker innehålla andra beståndsdelar såsom flygaska, granulerad masugnsslagg, silikastoft eller kalkstensfiller. Delar av cementet kan också vid betongblandningen ersättas av dessa beståndsdelar som då kallas tillsatsmaterial.

Betong har många starka sidor; formbarhet, tryckhållfasthet, styvhet, beständighet, slitstyrka, brandtålighet, fukttålighet, värmetröghet, ljudisoleringsförmåga, ljushet och möjlighet till återvinning. Delmaterialen förekommer i riklig mängd och oftast lättillgängligt över stora delar av vårt jordklot och är därför billiga.

Svagheterna är färre; de mest väsentliga är låg draghållfasthet och tämligen stor krympning och att tillverkningen av det essentiella bindemedlet cement ger förhållandevis stora CO<sub>2</sub>-utsläpp (se vidare i avsnittet om hållbarhet). Armering är den vanligaste lösningen på den låga draghållfastheten. Armering av stål, kolfibrer, glasfibrer eller aramidfibrer tar hand om dragkrafterna, medan betongen tar hand om tryckkrafterna. En annan faktor som kan ses som en nackdel för betongen är att det krävs tid (dagar, veckor, i enstaka fall månader) för betong att få erforderlig hållfasthet, men nackdelen kan vändas till en fördel – hållfastheten ökar med tiden och därmed betongbyggnadens bärförmåga – om byggprocessen anpassas på lämpligt sätt.

Betongens höga densitet är en egenskap som både kan vara en fördel och en nackdel. Hög densitet ger stor egenvikt i förhållande till trafiklast och andra variabla laster vilket innebär hög säkerhet mot brott och stora skador. Det är också egenvikten som innebär att betong lagrar energi väl vilket ger ett behagligt jämnt inomhusklimat, dvs. jämnar ut temper-



**Figur 1.1:1. Sten, sand, vatten och cement utgår delmaterialen i betong. Foto: CBI Betonginstitutet AB.**

raturvariationer. Energi- men framförallt effektbehov kan reduceras och besparingar på installerad luftkonditionering är tydliga. Nackdelarna med egenvikten är tyngre transporter och ibland ökade grundläggningskostnader. Betongs egenvikt kan reduceras genom användning av lättare ballastmaterial, till exempel lecakulor istället för stenmaterial.

## 1.1:1 Kort historik

Betongens historia är lång, kanske sträcker den sig ända bort till antikens Egypten. För 2 000 år sedan var Medelhavet ett romerskt innanhav och romarna byggde vägar, broar, akvedukter, termiska bad och byggnader ända från Främre Orienten till Hadrianus mur genom de brittiska öarna. Romarna byggde mycket av sten som fogades samman av bruk. Ordet konstruera betyder egentligen stapla sten. Bruket användes emellertid också som betong med vulkanaska som bindemedel. Pantheon i Rom med sin vackra och slanka kupol är kanske det bästa exemplet. Det var just kejsaren Hadrianus som lät uppföra den år 120 e. Kr. Romarna armerade inte sin betong. Därför var de hänvisade till tryckta konstruktionselement som pelare, bågar, valv och kupoler.

Under de många seklen från Romarrikets fall till 1800-talet har inte betongen eller betongbyggandet satt några spår även om man naturligtvis använde olika typer av kalkbruk för att sammanfoga hus, kyrkor, katedraler, broar, kanaler och andra byggnadsverk och det hydrauliska kalkbruket är ju en sorts betong om än utan grus och sten.

Modern betong har sitt ursprung i 1820-talets England. År 1824 tog Joseph Aspdin (1778–1855) patent på det vi idag kallar portlandcement vilket alltsedan dess varit det främsta bindemedlet i betong. Namnet fick cementet av att den betong som framställdes med det liknade den s.k. portlandstenen, en kalkstentyp som förekommer naturligt på Portland

Island utanför Dorset i södra England. På 1850-talet började man armera betongen i både England och Frankrike. Härigenom behövde betongbyggandet inte längre begränsas till tryckta konstruktioner. Armerad betong ger möjligheter till rationellt byggande med balkar och plattor. Till vårt land kom den armerade betongen i början av 1910-talet. Ferdinand Boberg (1860–1946) ritade NK på Hamngatan i Stockholm och i den byggnaden utnyttjades ett armeringssystem som hämtats från Nordamerika av väg- och vattenbyggaren och sedermera affärsmannen Ivar Kreuger (1880–1932).

Även den förspända betongen eller spännbetongen har sina rötter i 1800-talet. Amerikanen P H Jackson tog redan 1886 patent på förspänning med ändankare. Poängen med spännbetong är att man spänner armeringen vilket gör att tryckspänningar uppstår i betongen. När det spända betongelementet därefter belastas kommer betongen fortfarande att huvudsakligen vara tryckt under bruksskedet eftersom de dragspänningar som uppkommer av belastningen vanligen är mindre än tryckspänningarna. Det innebär mindre deformationer och sprickbildning. Utvecklingen och användningen av spännbetong tog fart under 1930- och 1950-talen; här kan nämnas banbrytande brobyggare som fransmannen Eugène Freyssinet (1879–1962) och belgaren Gustave Magnel (1889–1955). I vårt land började man på allvar bygga spännbetongbroar på 1960-talet. Det främsta exemplet är Essingeleden. Spännbetong används även inom förtillverkning av betongelement och här var svensk teknik tidigt framme. Världens första betongelementfabrik för framställning av spännbetong i industriell skala invigdes 1942 på Liljeholmen i Stockholm. Vid elementtillverkning spänns armeringen normalt före gjutning (förespänning) till skillnad från platsbyggda konstruktioner där den vanligen monteras lös i kabelrör och spänns efter betongens hårdnande (efterspänning).



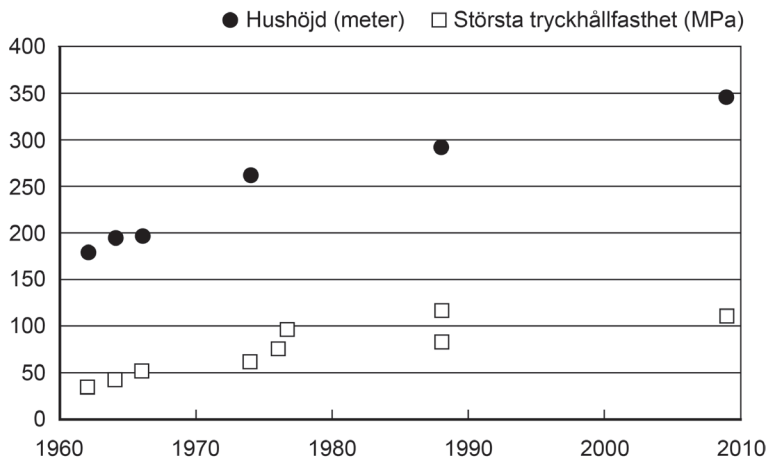
Figur 1.1:2. Liljeholmsdepån, 1950-tal. Foto: CEMENTA.

## 1.1:2 Betongens moderna utveckling

Redan på 1960-talet fanns det de som menade att betong var ett ”slutforskat” område, allt var redan uppfunnet. Få bedömare kan ha haft mer fel. På det senaste fem decennierna har utvecklingen av betongs prestanda och nya specialbetonger snarast exploderat. Vi har fått fiberbetong, sprutbetong, skumbetong, höghållfast betong, högpresterande betong, snabbtorkande betong, självtorkande betong, självkompakterande betong, ultrahöghållfast, självvregörande och grafisk betong. Listan gör inte anspråk på att vara fullständig. Ingenting säger att utvecklingen nu avstannat – troligen är det tvärtom. Kunskapen inom mikrostruktur, nanoteknologi, ytkemi, cementets hydrataion, kompositmaterial och informationsteknik ökar och skapar en god grund för utveckling, samtidigt som samhället ställer större krav på miljö (utfasning av naturgrus, begränsningar av koldioxidutsläpp, lägre energiförbrukning), uthållighet, arbetsmiljö och estetik.

Betong är starkt förknippad med sin tryckhållfasthet. Flera andra egenskaper såsom draghållfasthet, styvhet, slitstyrka, täthet och beständighet förbättras när tryckhållfastheten ökar även om inte alla ökar i samma takt. Också betongbyggandets produktivitet förbättras (tidigare formrivning, uppspanning och idrifttagande). Det är därför naturligt att betong klassificeras utefter tryckhållfasthet och att stora forskningsinsatser lagts på att utveckla betong med allt högre hållfasthet. Chicago var länge staden med de högsta byggnaderna och kan få illustrera hur man genom att utnyttja betong med allt högre hållfasthet har byggt allt högre byggnader (figur 1.1:3). Hög tryckhållfasthet är särskilt konkurrenskraftigt i pelare i de lägre våningarna i en hög byggnad eftersom de kan göras mycket slankare än pelare med lägre hållfasthet och därmed skapa en större uthyrningsbar yta.

I vårt land var 1960- och 1970-talen miljonprogrammets decennier. Vid sidan av en husproduktion på 100 000 bostäder per år byggdes även infrastrukturen i form av vägar och broar ut i takt med bilismens snabba expansion. För att möta behoven prioriterades effektivitet, produktivitet



Figur 1.1:3. Utvecklingen av höghållfast betong har lett till att Chicago kunnat bygga allt högre skyskrapar. Efter Russell (2010).



och låga priser. Betongrecepten optimerades för snabb produktion och utan den överhållfasthet som äldre betongbyggnader och betongbroar ofta fick med tiden. Man använde mer finkorniga cement som gör att betongen snabbare når sin sluthållfasthet.

Kunskaperna om betongs beständighet växte successivt fram men det var inte förrän 1965 och 1979 som vårt svenska regelverk började ställa krav på en minsta lufthalt i betongen (för att förhindra frostsador) respektive högsta tillåtna vattencementtal (för att skydda armeringen från korrosion) (Fagerlund, 2010). Beständighetsforskningen har varit stark i vårt land allt sedan 1960-talet.

Mot slutet av 1980-talet startades ett stort, flerårigt svenskt forskningsprogram om högpresterande betong i samverkan mellan forskningsfinansiärer, högskolan, forskningsinstitut och industrin (Elfgren, 1999). Fokus låg inte längre enbart på tryckhållfasthet utan också på täthet och beständighet samt produktion. Liknande program fanns i flera andra länder. En betongtyp som utvecklades under denna period var den snabbtorkande eller t.o.m. självtorkande betongen. Genom att förändra receptet – främst höja cementinnehållet – skapade man en betong som torkade snabbt (Svenska Betongföreningen, 1997). Härigenom kunde man snabbare lägga mattor på betonggolv och betongbjälklag utan att riskera fuktrelaterade problem och därmed korta ned produktionstiden och påskynda inflyttningen.

I det tidiga 1900-talet stampade man betongen för att kompaktera den och fylla ut formen. På 1930-talet introducerades vibreringstekniken som både förenklade arbetet och förbättrade resultatet och snabbt blev den i stort sett enda produktionsmetoden såväl i betongelementfabriken som på byggsplatsen (sprutbetong är ett undantag). Det var först på 1990-talet som det kom fram en konkurrent; vibreringsfri eller – som den snabbt kom att kallas – självkompakterande betong (SKB), en betong som fyller ut formen och omsluter armeringen fullständigt utan att separera och utan vibrering (Svenska Betongföreningen, 2002). Nödvändig för den självkompakterande betongen var utvecklingen av nya tillsatsmedel. Tekniken utvecklades ursprungligen i Japan men kom snabbt till vårt land. År 1998 – endast tio år efter den japanska uppfinningen – göts den första svenska bron i SKB. Idag dominerar självkompakterande betong helt produktionen av förtillverkad betong (med undantag för håldäck och marksten) medan denna typ av betong har haft svårare att vinna terräng inom platsgjutet betongbyggande. Andelen platsgjuten SKB är lokalt hög – över 30 % enligt rapporter 2015 – men i snitt utgör SKB bara ca 10 % av svensk platsgjuten betong, McCarthy, 2015. Här har frågor kring formtryck samt den självkompakterande betongens större känslighet för förändringar i delmaterial och störningar (såsom t.ex. trafikrelaterade förseningar av betongbilen) varit hämmande faktorer. I de fall man väljer SKB finns vinster att hämta i både produktivitet och arbetsmiljö. Självkompakterande betong kan i vissa fall – såsom mycket hårt armerade konstruktionsdelar och gjutningar mot överform – vara enda realistiska alternativet för att åstadkomma hög slutkvalitet.

Vid sidan av vibrering är armeringsmontering ett av de tyngsta arbetsmomenten inom betongproduktionen. Ända sedan 1950-talet har det



funnits en vision om att armeringsstänger och armeringsnät skulle kunna ersättas av fibrer. Stålfibrer har länge med framgång använts i sprutbetong för bergförstärkningar, industrigolv, pågjutningar och en del betongvaror. Fibrerna har successivt förbättrats både vad gäller hållfasthet och förankring i betongen (som numera främst sker genom ändkrokar). Idag finns också fibrer av olika polymerer (syntetiska fibrer), glas, kol, hampa och basalt även om erfarenheten av hur sådana fiberbetonger fungerar på längre sikt fortfarande är begränsad. År 2014 kom en ny svensk standard som behandlar dimensionering av bärande konstruktioner i fiberbetong (SS 812310:2014). Detta är ett viktigt steg för att öppna marknaden för fiberbetong utanför sprutbetong och industrigolv. Fibrer kan med fördel kombineras med slakarmering för att ge ökad tvärkraftskapacitet och bättre sprickkontroll men inom överskådlig tid torde fiberbetongen ha svårt att helt ersätta konventionell armering i konstruktioner med stora böjande moment, dvs. konstruktioner med stora spännvidder.

### 1.1:3 Hållbarhet

Betong är ett tidlöst material. Tidsperspektivet är mycket långt. Det är cementet som gör betong till betong och här är tidsperspektivet 500 miljoner år. På den tiden låg Skandinavien på södra halvklotet. På havets botten bildades mycket långsamt den kalksten som nu bryts och processas till cement på till exempel Gotland och Öland. Av sten och betong byggde romarna vägar, akvedukter, broar och byggnader som fortfarande efter 2 000 år står kvar. Idag bygger vi betongbroar med en livslängd på minst 120 år (95 % ska nå minst 120 år, den avsedda medellivslängden är 150 år). Rätt utformad, noggrant producerad och väl underhållen är betong ett mycket beständigt material. Beständighet är grunden för hållbarhet. Ju längre tid en byggnad eller anläggning står, desto fler blir åren att fördela byggproduktionens natur- och andra resurser på. Detta gäller såväl ekonomiska som miljömässiga perspektiv.

Begreppet hållbarhet omfattar dock mer än enbart beständighet. Ofta citeras denna definition: ”En hållbar utveckling tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov.” (Brundtlandkommissionen, 1987). Hållbarheten har på senare år seglat upp som högprioriterad inom alla områden och i denna handbok ägnas ett nytt kapitel 35 (del 2) åt betongens hållbarhet.

Kalksten, grus, sten, sand eller berg och vatten, som är grunden för cement och betong, finns i så stora kvantiteter på vår jord att de i praktiken kan anses oändliga. Genom att gjuta betong varken förhindrar eller försvårar vi för kommande generationer att gjuta betong. Naturligtvis måste produktionen utföras på ett ansvarsfullt sätt så att inte omistliga naturvärden förstörs vid uttaget av kalksten och ballast eller miljön skadas genom långa transporter med fossilbränsle drivena fordon.

Problemet är däremot de koldioxidutsläpp som tillverkningen av betong och då huvudsakligen av cement leder till. Innan cementindustrin i början på 1990-talet började arbeta aktivt med frågan gav tillverkningen