

INNEHÅLL

Skribenter och granskare 21

Föroord 25

14. Hållfasthet 27

- 14.1 Inledning 27
- 14.2 Begreppet hållfasthet 28
 - 14.2:1 Olika hållfastheter 28
 - 14.2:2 Standardiserade hållfasthetsklasser 29
 - 14.2:3 Vad är hållfasthet? 31
- 14.3 Faktorer som generellt påverkar hållfastheten 32
 - 14.3:1 Inverkningar relaterade till inneboende betongegenskaper 32
 - 14.3:2 Yttre påverkningar 47
- 14.4 Tryckhållfasthet 57
 - 14.4:1 Allmänt 57
 - 14.4:2 Provningsmetod 57
 - 14.4:3 Speciellt inverkande faktorer 58
 - 14.4:4 Fleraxiellt spänningstillstånd 58
- 14.5 Centrisk draghållfasthet 73
 - 14.5:1 Provningsmetod 74
 - 14.5:2 Inverkande faktorer 75
- 14.6 Spräckhållfasthet 79
 - 14.6:1 Provningsmetod 79
 - 14.6:2 Inverkande faktorer 82
- 14.7 Böjdraghållfasthet 87
 - 14.7:1 Provningsmetod 87
 - 14.7:2 Inverkande faktorer 90
- 14.8 Brottmekanik 94
 - 14.8:1 Allmänt 94
 - 14.8:2 Spricktillväxt 95
 - 14.8:3 Brottmekaniska grunder 96
 - 14.8:4 Modell med brottområde – σ - ε och σ - w diagram 99
 - 14.8:5 Materialdata 100
 - 14.8:6 Tillämpningar 103

- 14.9 Skjuvhållfasthet 104
 - 14.9:1 Provningsmetoder 104
 - 14.9:2 Inverkande faktorer 106
- 14.10 Slaghållfasthet 108
 - 14.10:1 Provningsmetoder 108
 - 14.10:2 Speciellt inverkan­de faktorer 110
- 14.11 Hållfasthet vid stämpellast 115
 - 14.11:1 Hållfasthet och lokalt tryck och prägling 116
- 14.12 Hållfasthetssamband 117
 - 14.12:1 Olika hållfastheter 117
 - 14.12:2 Olika provkroppar och olika fukt­illstånd 126
- 14.13 Hållfasthet i färdig konstruktion 139
 - 14.13:1 Hållfasthetsutveckling i betongbyggnader 139
 - 14.13:2 Krav 143
- 14.14 Bedömning av hållfasthet i färdig konstruktion 144
 - 14.14:1 Allmänt 144
 - 14.14:2 Tillämpning 145
 - 14.14:3 Förstö­rande provning – utborrade cylindrar 145
 - 14.14:4 Begränsat förstörande metoder 154
 - 14.14:5 Oförstö­rande metoder 156
 - 14.14:6 Precision, bias och noggrannhet 161
- 14.15 Hållfasthetens spridning 163
 - 14.15:1 Tillfälliga och systematiska avvikelser 163
 - 14.15:2 Orsaker 164
 - 14.15:3 Spridningen och dess komponenter 166
 - 14.15:4 Analys av spridningar 168
 - 14.15:5 I praktiken förekommande spridningar 171
- 14.16 Litteratur 175

15. Vidhäftning 189

- 15.1 Inledning 189
- 15.2 Mekanismer 190
- 15.3 Applikationer 191
- 15.4 Gradering av vidhäftning 192
- 15.5 Faktorer som påverkar vidhäftningen 193
 - 15.5:1 Huvudfaktorer 193
 - 15.5:2 Sekundära faktorer 197
 - 15.5:3 Övriga faktorer 200
 - 15.5:4 Bilningsmetoder 203
- 15.6 Tillåten påkänning i fogen mellan betong och betong 204
- 15.7 Provning 205
 - 15.7:1 Provningsmetoder 205
 - 15.7:2 Sambandet mellan fogens drag- och skjuvhållfasthet 206
 - 15.7:3 Utvärdering av provresultat 207
- 15.8 Litteratur 208

16. Deformation under last 211

- 16.1 Grundläggande begrepp 211
- 16.2 Spännings-deformationssamband 213
 - 16.2:1 Allmänt 213
 - 16.2:2 Spännings-deformationssamband före maximipunkten 214
 - 16.2:3 Elasticitetsmodul 217
 - 16.2:4 Spännings-deformationssambandets nedåtgående del 223
 - 16.2:5 Det kompletta spännings-deformationssambandet 224
 - 16.2:6 Hårdnande betong 230
 - 16.2:7 Provningssteknik 230
 - 16.2:8 Normer 234
- 16.3 Krypning 235
 - 16.3:1 Allmänt 235
 - 16.3:2 Inverkan av betongens egenskaper 236
 - 16.3:3 Inverkan av yttre faktorer 238
 - 16.3:4 Krypningens tidsförlopp och slutvärde 240
- 16.4 Litteratur 246

17. Fukt och betong 249

- 17.1 Inledning 249
- 17.2 Fukt i luft 251
- 17.3 Fuktfixering 253
 - 17.3:1 Allmänt 253
 - 17.3:2 Fuktfixering i betong 255
 - 17.3:3 Fuktfixering i betong vid olika ålder 258
 - 17.3:4 Fuktfixering i betong med olika bindemedel 258
 - 17.3:5 Temperaturberoendet hos fuktfixering i betong 260
 - 17.3:6 Skanningkurvor för betong 262
- 17.4 Byggfukt 262
- 17.5 Självuttorkning 265
- 17.6 Fukttransport 268
 - 17.6:1 Allmänt 268
 - 17.6:2 Fukttransportkoefficienter för betong 270
 - 17.6:3 Fukttransportkoefficienter för betong med tillsatsmaterial/puzzolaner 273
 - 17.6:4 Fukttransportkoefficienter för ung betong 276
- 17.7 Fuktfordelning i konstruktioner 277
 - 17.7:1 Allmänt 277
 - 17.7:2 Stationär fuktfordelning 278
 - 17.7:3 Icke-stationär fuktfordelning 281
- 17.8 Uttorkning av betong 283
 - 17.8:1 Allmänt 283
 - 17.8:2 Förenklad uttorkningsberäkning, metod 1 284
 - 17.8:3 Förenklad uttorkningsberäkning, metod 2 286
 - 17.8:4 Uttorkning av betong med lågt *vbt* 288

- 17.9 Kapillärsugning 290
 - 17.9:1 Allmänt. Grundläggande samband 290
 - 17.9:2 Betongs kapillaritet 293
- 17.10 Insugning av vatten i betong med lågt *vbt* 294
 - 17.10:1 Allmänt 294
 - 17.10:2 Insugning av limfukt/ytfukt 295
 - 17.10:3 Insugning under lång tid 296
 - 17.10:4 Tidig insugning av vatten 297
- 17.11 Vätskegenomströmning (permeabilitet) 298
- 17.12 Fuktmätning i betong 302
 - 17.12:1 Allmänt 302
 - 17.12:2 Mätning av fuktkvot 303
 - 17.12:3 Mätning av kapillär mätnadsgrad 303
 - 17.12:4 Mätning av relativ fuktighet 304
 - 17.12:5 Mätning av RH före mattläggning 305
 - 17.12:6 Fuktmätning i högpresterande betong med lågt *vbt* 306
- 17.13 Litteratur 307

18. Krympning hos hårdnande och hårdnad betong 311

- 18.1 Inledning 311
- 18.2 Mekanismer 311
 - 18.2:1 Allmänt 311
 - 18.2:2 Materialets fria krympning – mothåll från ballast 312
 - 18.2:3 Storlekseffekt 314
 - 18.2:4 Mekanismer 315
- 18.3 Modellering 319
 - 18.3:1 Allmänt 319
 - 18.3:2 Modelleringsfilosofi 321
- 18.4 Modellering baserat på fuktändringar 323
 - 18.4:1 Allmänt 323
 - 18.4:2 Modellformulering 323
 - 18.4:3 Försöksobservationer 325
 - 18.4:4 Kommentarer 326
- 18.5 Modell enligt Betonghandbok Material – Högpresterande betong, lågt *vct* 327
 - 18.5:1 Autogen krympning 327
 - 18.5:2 Uttorkningskrympning 332
- 18.6 Modell enligt Betonghandbok Material, högt *vct* 339
 - 18.6:1 Allmänt 339
 - 18.6:2 Referenskrympning 339
 - 18.6:3 Relativa fuktighetens inverkan, γ_{RH} 343
 - 18.6:4 Krympningens tidsförlopp γ_t 345
 - 18.6:5 Beräkningsexempel 350
- 18.7 Modell enligt Model Code 2010 353
 - 18.7:1 Allmänt 353
 - 18.7:2 Matematisk formulering 353

- 18.7:3 Kommentar 355
- 18.8 Modell B4 enligt RILEM TC-242-MDC 357
 - 18.8:1 Allmänt 357
 - 18.8:2 Formulering baserad på betongsammansättning 357
 - 18.8:3 Formulering baserad på hållfasthet 359
 - 18.8:4 Kommentar 360
 - 18.8:5 Modell för autogen krympning, version 2019 360
- 18.9 Bedömning ur korttidsförsök 362
 - 18.9:1 Allmänt 362
 - 18.9:2 Metod att bestämma ϵ_{s0} för högre vattencementtal 364
 - 18.9:3 Metod att bestämma $\epsilon_{s\infty}$ vid lägre vattencementtal 367
- 18.10 Litteratur 368

19. Egenspanningar och sprickor av temperaturrörelser och krympning. Värme- och mognadsutveckling 373

- 19.1 Inledning 373
 - 19.1:1 Egenspanning och sprickor 373
 - 19.1:2 Temperatur, mognadsutveckling, formrivning och vintergjutning 375
- 19.2 Betongens värmeutveckling 375
 - 19.2:1 Modell för hydratationsvärme 375
 - 19.2:2 Mätmetoder 377
 - 19.2:3 Uppmätt hydratationsvärme 380
- 19.3 Temperaturberoende hydratation – mognadsutveckling 383
 - 19.3:1 Hydratationshastighet – modell 383
 - 19.3:2 Ekvivalent mognadsålder 384
 - 19.3:3 Temperaturfaktorn β_T 385
- 19.4 Beräkning av temperaturförlopp 391
 - 19.4:1 Värmeledning 391
 - 19.4:2 Värmetekniska parametrar 392
 - 19.4:3 Start- och randvillkor 393
 - 19.4:4 Beräknade och uppmätta temperaturförlopp, fleraxiella temperaturflöden 395
- 19.5 Hållfasthetsutveckling 400
 - 19.5:1 Tryckhållfasthet 400
 - 19.5:2 Draghållfasthet och gränstörning 401
 - 19.5:3 Hållfasthetsförlust vid förhöjd temperatur 401
- 19.6 Några speciella egenskaper hos betong i tidig ålder 407
 - 19.6:1 Allmänt 407
 - 19.6:2 Längdutvidgningskoefficient 408
 - 19.6:3 Elasticitet och krypning 409
 - 19.6:4 Modellering vid laster varierande med tid 414
 - 19.6:5 Relaxation 414
 - 19.6:6 Spektrum av krypning och relaxation 415
 - 19.6:7 Icke linjära effekter av mikrosprickbildning 416
 - 19.6:8 Beroende av yttre påverkan 417

- 19.7 Temperatursprickor och krympsprickor 418
 - 19.7:1 Allmänt 418
 - 19.7:2 Uppkomst av temperatursprickor under avsvälningen 419
 - 19.7:3 Tidiga temperatursprickor i uppvärmningsskedet – ytsprickor och genomgående 421
 - 19.7:4 Temperatursprickor under avsvälningssfasen – genomgående sprickor och ytsprickor 422
 - 19.7:5 Krympsprickor under härdningen 423
 - 19.7:6 Alternativ klassificering av temperaturrelaterade sprickor 424
 - 19.7:7 Strukturer och typfall där temperatur- och krympsprickor kan uppkomma 424
 - 19.7:8 Strukturella konsekvenser av sprickor 426
- 19.8 Tvång 427
 - 19.8:1 Allmänt 427
 - 19.8:2 Bestämning av tvång 430
 - 19.8:3 Typsituationer av tvång 431
- 19.9 Modeller för beräkning av egenspanningar och sprickrisk 438
 - 19.9:1 Allmänt 438
 - 19.9:2 Beräkning av sprickrisk av temperaturrörelser och krympning 438
 - 19.9:3 Överslagsmässiga metoder 440
 - 19.9:4 Superpositionsprincipen 448
 - 19.9:5 Differentiella metoder 449
 - 19.9:6 Val av metod 450
 - 19.9:7 Analys av konstruktioner 451
- 19.10 Exempel på beräkningar av egenspanningar och sprickrisker 454
 - 19.10:1 Allmänt 454
 - 19.10:2 Enaxiellt fall – ändtvång 455
 - 19.10:3 Massivare vägg på platta – avkylningssprickor 456
 - 19.10:4 Massivare vägg på platta – ytsprickor 459
 - 19.10:5 Fundament på makadam eller liknande underlag 461
 - 19.10:6 Tunnelsektion och andra massiva strukturer 462
 - 19.10:7 Platta mot platta 464
 - 19.10:8 Tunn vägg på platta 466
 - 19.10:9 Pågjutning 469
- 19.11 Möjligheter till förenklingar 473
 - 19.11:1 Allmänt 473
 - 19.11:2 Metoder att förenkla 474
 - 19.11:3 Temperatur- och fuktberäkningar 474
 - 19.11:4 Spänningsberäkningar 476
- 19.12 Litteratur 478

20. Utmattning 485

- 20.1 Inledning 485
 - 20.1:1 Bakgrund 485
 - 20.1:2 Några grundbegrepp 486
- 20.2 Utmattningsbrottets karaktär 487
 - 20.2:1 Stål 487
 - 20.2:2 Betong 488
- 20.3 Betong 488
 - 20.3:1 Allmänt 488
 - 20.3:2 Utmattning vid tryck, drag och böjning 489
 - 20.3:3 Några inverkanse faktorer 494
 - 20.3:4 Deformationer 496
 - 20.3:5 Höghållfast betong, lättballastbetong 498
- 20.4 Armeringsstål 499
 - 20.4:1 Allmänt 499
 - 20.4:2 Armeringsstänger 499
 - 20.4:3 Spännarmering 500
- 20.5 Armerad betong 501
 - 20.5:1 Allmänt 501
 - 20.5:2 Tryck, böjning 502
 - 20.5:3 Skjuvning, vidhäftning 502
 - 20.5:4 Spännbetong 503
- 20.6 Analys och provningsmetoder 504
 - 20.6:1 Allmänt 504
 - 20.6:2 Analysmetoder 504
 - 20.6:3 Provningsmetoder 506
- 20.7 Litteratur 507

21. Speciella egenskaper 511

- 21.1 Allmänt 511
- 21.2 Täthet mot vätskor och gaser 511
 - 21.2:1 Inledning 511
 - 21.2:2 Täthet mot vatten 512
 - 21.2:3 Täthet mot andra vätskor 512
 - 21.2:4 Täthet mot gaser 512
 - 21.2:5 Tätning av sprickor 517
 - 21.2:6 Sjävläkning av sprickor 518
- 21.3 Friktion och halksäkerhet 521
 - 21.3:1 Allmänt 521
 - 21.3:2 Friktion mellan fordon och betongfarbana 521
 - 21.3:3 Friktion mellan byggnadsdelar 528
 - 21.3:4 Halksäkerhet 529
- 21.4 Längdändring av temperatur 530
 - 21.4:1 Allmänt 530
 - 21.4:2 Längdutvidgningskoefficient för cementpasta 531
 - 21.4:3 Längdutvidgningskoefficient för ballast 532
 - 21.4:4 Längdutvidgningskoefficient för betong 532
- 21.5 Värmeledning och värmelagring 535

- 21.5:1 Allmänt 535
- 21.5:2 Värmekonduktivitet 535
- 21.5:3 Specifik värmekapacitet 538
- 21.5:4 Värmediffusivitet 539
- 21.6 Ljudtekniska egenskaper 539
 - 21.6:1 Betonghus ger en bra ljudmiljö för både boende och verksamheter 539
 - 21.6:2 Krav och termer 540
 - 21.6:3 Materialegenskaper 542
 - 21.6:4 Exempel på betongs ljudisolerande och akustiska egenskaper 543
 - 21.6:5 Projektering och kontroll av ljudisolering 544
- 21.7 Elektriska egenskaper 546
 - 21.7:1 Allmänt 546
 - 21.7:2 Resistivitet 546
 - 21.7:3 Dielektrisk fältstyrka för genomslag 549
 - 21.7:4 Kapacitans 550
- 21.8 Skydd mot joniserande strålning (radioaktiv strålning) 550
 - 21.8:1 Betong som strålningskydd 550
 - 21.8:2 Inverkan av joniserande/radioaktiv strålning på betongens egenskaper 551
- 21.9 Radon och gammastrålning i byggnadsmaterial och miljö 554
 - 21.9:1 Allmänt 554
 - 21.9:2 Krav på begränsning – referensnivåer 554
 - 21.9:3 Beräkningsunderlag och gällande direktiv 555
 - 21.9:4 Ballast och strålningshalter 556
 - 21.9:5 Betong, strålningshalter och radon 557
 - 21.9:6 Cement, tillsatsmaterial och tillsatsmedel i betong 558
 - 21.9:7 Motåtgärder 559
- 21.10 Ljushet 560
 - 21.10:1 Allmänt 560
 - 21.10:2 Betongbelägningars reflexionsegenskaper 561
 - 21.10:3 Synbarhet och kontraster 563
 - 21.10:4 Betong med särskild ljushet 563
 - 21.10:5 Andra effekter av betongens ljushet 563
- 21.11 Litteratur 564

22. Sprickor 571

- 22.1 Inledning 571
- 22.2 Översikt 572
 - 22.2:1 Definitioner 572
 - 22.2:2 Spricktyper 573
 - 22.2:3 Frekvens för förekomst 577
 - 22.2:4 Kravställning 577
- 22.3 Några vanliga spricktyper och mekanismer för sprickuppkomst 578

- 22.3:1 Översikt 578
- 22.3:2 Mekanismer vid sprickuppkomst 580
- 22.4 Sprickor – typ, utseende, uppkomst, motåtgärd 587
 - 22.4:1 Sprickor i nygjuten betong 587
 - 22.4:2 Temperatursprickor 590
 - 22.4:3 Krympsprickor 592
 - 22.4:4 Krackelering 595
 - 22.4:5 Sprickor orsakade av yttre last eller påtvingad deformation 596
 - 22.4:6 Inverkan av konstruktiv utformning på sprickbildning 601
 - 22.4:7 Miljöinverkan 605
 - 22.4:8 Olämpliga ballastmaterial 606
 - 22.4:9 Sprickor orsakade av brand 606
- 22.5 Sprickbreddens variation 606
 - 22.5:1 Genom täcksikt 606
 - 22.5:2 Längs sprickan 608
 - 22.5:3 Med tiden 608
- 22.6 Kartläggning av sprickor 608
 - 22.6:1 Sprickbild 608
 - 22.6:2 Sprickdjup 610
 - 22.6:3 Sprickbredd 611
 - 22.6:4 Övervakning av sprickor 612
 - 22.6:5 Digital teknik för sprickartering och övervakning 613
- 22.7 Sjävläkning och självtätning 614
 - 22.7:1 Sjävläkning av sprickor 614
 - 22.7:2 Självätning vid genomströmmande vatten 618
- 22.8 Inverkan och betydelse av sprickor 620
 - 22.8:1 Allmänt 620
 - 22.8:2 Bärighet, deformation och nötning 620
 - 22.8:3 Armeringskorrosion 621
 - 22.8:4 Vattengenomströmning och kalkurlakning 625
 - 22.8:5 Gasgenomströmning 628
 - 22.8:6 Ljudisolering 628
 - 22.8:7 Frosteffekter, frysning i spricka 629
 - 22.8:8 Effekt av ballastreaktioner 630
 - 22.8:9 Hygien 631
 - 22.8:10 Utseende 631
- 22.9 Begränsning av sprickbredd 632
 - 22.9:1 Acceptabel sprickbredd 632
 - 22.9:2 Begränsning av sprickbredd i några standarder och anvisningar 634
- 22.10 Litteratur 635

23. Betongkonstruktioners beständighet och livslängd 641

- 23.1 Miljöpåverkan på konstruktionen 641
 - 23.1:1 Negativ och positiv påverkan 641

- 23.1.2 Exempel på självläkning 644
- 23.2 Beständighetsproblem 646
- 23.3 Begreppet livslängd 648
- 23.4 Livslängdsbedömning baserad på erfarenhet, normtext eller beräkning 649
- 23.5 Principer för livslängdsberäkningar 650
- 23.6 Potentiell livslängd baserad på representativ miljö 653
 - 23.6:1 Allmänt 653
 - 23.6:2 Frostbeständighet 654
 - 23.6:3 Armeringskorrosion initierad av karbonatisering 656
 - 23.6:4 Kloridinitierad armeringskorrosion 660
 - 23.6:5 Urlakning 663
 - 23.6:6 Syraangrepp 665
 - 23.6:7 Sulfatangrepp 666
 - 23.6:8 Övriga angreppstyper 668
- 23.7 Potentiell livslängd baserad på funktionsprovning 668
 - 23.7:1 Allmänt 668
 - 23.7:2 Syraangrepp 668
 - 23.7:3 Saltfrostangrepp 669
- 23.8 Beständighetsprovning som bas för livslängdsberäkning 670
- 23.9 Probabilistisk livslängdsberäkning 671
 - 23.9:1 Allmänt 671
 - 23.9:2 Inre frostangrepp 673
 - 23.9:3 Armeringskorrosion 674
 - 23.9:4 Övriga angrepp 675
- 23.10 Resterande livslängd hos en skadad konstruktion 676
 - 23.10:1 Allmänt 676
 - 23.10:2 Inre frostnedbrytning 677
 - 23.10:3 Armeringskorrosion 678
 - 23.10:4 Urlakning av ytpartiet och syraangrepp 679
 - 23.10:5 Urlakning av betongens inre 679
 - 23.10:6 Saltfrostangrepp 681
- 23.11 Livslängd hos reparerad konstruktion 681
- 23.12 Exempel på livslängdsmodeller 683
- 23.13 Litteratur 684

24. Frostbeständighet 687

- 24.1 Problemställning 687
 - 24.1:1 Olika typer av frostsador-skadebild 687
 - 24.1:2 Konsekvenser av frostsador 689
- 24.2 Frysbart vatten 689
- 24.3 Teori 691
 - 24.3:1 Skademekanismer vid frysning i saltfri miljö 691
 - 24.3:2 Skademekanism vid frysning i salt miljö 700
 - 24.3:3 Kritiskt luftporavstånd – kritisk avståndsfaktor 702
 - 24.3:4 Kritisk lufthalt 708
 - 24.3:5 Livslängd hos frostutsatta konstruktioner 710

- 24.4 Inverkan av yttre miljöfaktorer på frostbeständighet 711
 - 24.4:1 Inverkan av fuktförhållanden 711
 - 24.4:2 Inverkan av fryshastighet 714
 - 24.4:3 Inverkan av lägsta frystemperatur 714
 - 24.4:4 Inverkan av yttre och inre salthalt 715
- 24.5 Inverkan av betongsammansättning på frostbeständighet 718
 - 24.5:1 Inverkan av lufthalt 718
 - 24.5:2 Inverkan av vattenbindemedelstal 722
 - 24.5:3 Inverkan av luftporbildare och tillsatsmedelskombinationer 725
 - 24.5:4 Inverkan av cementsort 727
 - 24.5:5 Inverkan av mineraliska tillsatsmaterial 729
 - 24.5:6 Inverkan av ballast 735
- 24.6 Inverkan av produktionsteknik på frostbeständighet 736
 - 24.6:1 Inverkan av betongkonsistens 736
 - 24.6:2 Inverkan av blandningstid 737
 - 24.6:3 Inverkan av lufthaltsförluster under transport, gjutning och komprimering 738
 - 24.6:4 Inverkan av pumpning och vakuumbehandling 740
 - 24.6:5 Inverkan av hög temperatur 741
 - 24.6:6 Inverkan av härdningstid och uttorkning före frysning 741
 - 24.6:7 Inverkan av sprickor 743
- 24.7 Specialbetong 744
 - 24.7:1 Lättballastbetong 744
 - 24.7:2 Stålfiberbetong 744
 - 24.7:3 Sprutbetong 745
 - 24.7:4 Högpresterande betong 746
 - 24.7:5 Självkompakterande betong 747
- 24.8 Kvalitetskontroll av frostbeständighet 747
 - 24.8:1 Allmänt 747
 - 24.8:2 Direkta frysprovningar 748
 - 24.8:3 Indirekta provningar 753
- 24.9 Litteratur 756

25. Armeringskorrosion 761

- 25.1 Inledning 761
- 25.2 Korrosionsmekanism 762
- 25.3 Korrosionsmodell 763
- 25.4 Initiering genom karbonatisering 764
 - 25.4:1 Karbonatisering 764
 - 25.4:2 Beräkningsmodell 764
 - 25.4:3 Inverkande faktorer 766
- 25.5 Initiering genom kloridinträngning 767
 - 25.5:1 Kloridinträngning 768
 - 25.5:2 Beräkningsmodeller för kloridinträngning genom diffusion 770
 - 25.5:3 Inverkande faktorer 772

- 25.5:4 Kloridinträngning genom kapillärsugning. Urlakning av klorider 775
- 25.5:5 Tröskelvärden 776
- 25.6 Korrosionshastighet 777
 - 25.6:1 Allmänt 777
 - 25.6:2 Storleksförhållandet mellan anod och katod 777
 - 25.6:3 Fukt 778
- 25.7 Armeringskorrosion i olika miljöer 779
 - 25.7:1 Torr miljö (inomhus), exponeringsklass X0 779
 - 25.7:2 Fuktig miljö utan salt (utomhus), exponeringsklasser XC1-4 779
 - 25.7:3 Fuktig miljö med salt, exponeringsklasser XD1-3, XS1-3 779
- 25.8 Effekt av sprickor i betong 781
 - 25.8:1 Allmänt 781
 - 25.8:2 Effekt av exponeringsmiljö 782
 - 25.8:3 Självläkning och annan tätning av sprickor 783
 - 25.8:4 Initieringstid för armeringskorrosion i sprucken betong med lågt *vct* 784
 - 25.8:5 Korrosionshastighet i sprucken betong med lågt *vct* 785
 - 25.8:6 Bedömning av sprickors effekt i betong med lågt *vct* 786
- 25.9 Slutkommentar 787
- 25.10 Litteratur 787

26. Kemiskt angrepp 791

- 26.1 Inledning 791
- 26.2 Allmänt 792
 - 26.2:1 Cementpasta 792
 - 26.2:2 Transport i betong 793
 - 26.2:3 Karbonatisering 794
 - 26.2:4 Vattens kemiska egenskaper 794
 - 26.2:5 Grundläggande begrepp 795
- 26.3 Lösande angrepp 796
 - 26.3:1 Lakning 796
 - 26.3:2 Hastighetsstyrande faktorer 800
 - 26.3:3 Surt angrepp 801
- 26.4 Sprängande angrepp 802
 - 26.4:1 Sulfatangrepp 802
- 26.5 Ballastreaktioner 806
 - 26.5:1 Alkalisilikareaktion 806
 - 26.5:2 Alkalikarbonatreaktionen 812
 - 26.5:3 Krympning 812
- 26.6 Andra angrepp 813
 - 26.6:1 Biologiskt angrepp 813
 - 26.6:2 Surt angrepp 813
 - 26.6:3 Havsvatten 814

- 26.6:4 Kristallisationsstryck 815
- 26.7 Olika ämnens inverkan på betong – en översikt 815
- 26.8 Bedömning av aggressivitet hos mark och vatten 820
- 26.9 Litteratur 822

27. Beständighet hos vissa material i kontakt med betong 827

- 27.1 Allmänt 827
- 27.2 Aluminium och aluminiumlegeringar 827
- 27.3 Bly 829
- 27.4 Koppar, kopparlegeringar 829
- 27.5 Zink 829
- 27.6 Rostfritt stål 830
- 27.7 Glas 831
- 27.8 Trä 831
- 27.9 Polymerer 832
- 27.10 Fuktkänsliga material 833
- 27.11 Litteratur 833

28. Brandbeständighet 835

- 28.1 Brandpåverkan 835
 - 28.1:1 Brandförlopp 835
 - 28.1:2 Krav på brandbeständighet 836
 - 28.1:3 Brandmotstånd 836
- 28.2 Betongkonstruktioners beteende vid brandpåverkan 837
- 28.3 Egenskaper hos betong vid höga temperaturer 839
 - 28.3:1 Förändringar i materialstrukturen 839
 - 28.3:2 Hållfasthetsegenskaper vid höga temperaturer 840
 - 28.3:3 Deformationsegenskaper 841
 - 28.3:4 Termisk expansion 844
 - 28.3:5 Vidhäftningsegenskaper vid höga temperaturer 845
 - 28.3:6 Värmetransportegenskaper 846
- 28.4 Egenskaper hos armering vid höga temperaturer 847
- 28.5 Temperaturökning i betongtvärsnitt vid brandpåverkan 850
 - 28.5:1 Instationär värmeledning 850
 - 28.5:2 Förenklad metod för uppskattning av temperatur i brandutsatt konstruktion 851
- 28.6 Betongkonstruktioners brandmotstånd 854
 - 28.6:1 Effekter i stomsystem 854
 - 28.6:2 Balkar och plattor 855
 - 28.6:3 Pelare och väggar 856
 - 28.6:4 Skjuvning, förankring och vidhäftning 857
- 28.7 Avspjälkningsfenomen 857
- 28.8 Bedömning av brandskadade konstruktioner 859
- 28.9 Litteratur 861

29. Nötningsmotstånd 863

- 29.1 Allmänt 863
- 29.2 Provningsmetoder 864

- 29.2:1 Allmänt 864
- 29.2:2 Standardiserade metoder 864
- 29.2:3 Övriga metoder 867
- 29.2:4 Val av metod 869
- 29.3 Krav på nötningsmotstånd 869
 - 29.3:1 Krav som kan ställas 869
 - 29.3:2 Krav enligt standarder och anvisningar 870
- 29.4 Inverkande faktorer, generellt 871
 - 29.4:1 Allmänt 871
 - 29.4:2 Hållfasthet, *vct* 871
 - 29.4:3 Ballastegenskaper 873
 - 29.4:4 Stenhalt, maximal kornstorlek 875
 - 29.4:5 Härdning 876
 - 29.4:6 Övrigt 877
- 29.5 Inverkande faktorer, speciella fall 877
 - 29.5:1 Allmänt 877
 - 29.5:2 Golv 878
 - 29.5:3 Vägbeläggningar 879
 - 29.5:4 Avnötning i och av vatten, erosion 880
 - 29.5:5 Avnötning vid istryck 881
 - 29.5:6 Rengöring med vatten under tryck 882
- 29.6 Litteratur 882

30. Ytskydd för betong 885

- 30.1 Inledning 885
- 30.2 Syfte och användningsområden 886
- 30.3 Krav på ytskydd 887
 - 30.3:1 Exempel på kravutformning för ytskydd 890
- 30.4 Typer av ytskydd – material 892
 - 30.4:1 Hydrofobisk impregnering 893
 - 30.4:2 Impregnering 897
 - 30.4:3 Beläggningar/försegling 898
 - 30.4:4 Förtillverkade ytskiktmaterial 906
 - 30.4:5 Platsbyggda laminat 906
- 30.5 Några tillämpningar 906
 - 30.5:1 Vattenavvisande impregnering 906
 - 30.5:2 Karbonatiseringsbromsande ytskydd 907
 - 30.5:3 Fuktspär 907
 - 30.5:4 Skydd mot aggressiva vätskor 908
 - 30.5:5 Klotterskydd 909
 - 30.5:6 Brobanor 910
 - 30.5:7 Parkeringshus 913
 - 30.5:8 Golv 915
- 30.6 Utförande, säkerhet och hälsa 916
- 30.7 Litteratur 916

31. Fiberbetong 919

- 31.1 Inledning 919
 - 31.1:1 Allmänt 919
 - 31.1:2 Kort historik 920
 - 31.1:3 Fibertyper och fibermaterial 920
- 31.2 Några viktiga definitioner 922
 - 31.2:1 Fiberinnehåll 922
 - 31.2:2 Verkningsätt 923
- 31.3 Provningsmetoder 926
 - 31.3:1 Fiberinnehåll 926
 - 31.3:2 Balkprovning 926
 - 31.3:3 Plattprovning 927
- 31.4 Mekaniska egenskaper och dimensionering av fiberbetongkonstruktioner 929
 - 31.4:1 Tryckhållfasthet 929
 - 31.4:2 Böjdraghållfasthet 929
 - 31.4:3 Draghållfasthet 930
 - 31.4:4 Elasticitetsmodul och tvärkontraktionstal 931
 - 31.4:5 Böjande moment 931
 - 31.4:6 Tvärkraft 932
 - 31.4:7 Genomstansning 934
 - 31.4:8 Sprickstyrning och sprickfördelning 934
- 31.5 Produktion 935
- 31.6 Användningsområden 937
 - 31.6:1 Sprutbetong 937
 - 31.6:2 Industrigolv 938
 - 31.6:3 Pågjutningar 939
 - 31.6:4 Balkar och fribärande plattor 940
 - 31.6:5 Förtillverkade betongelement 940
 - 31.6:6 Övriga användningsområden 940
 - 31.6:7 Avancerade fiberbetonger 941
- 31.7 Litteratur 941

32. Polymerer och betong 945

- 32.1 Inledning 945
- 32.2 Polymermodifierad betong 946
 - 32.2:1 Material och tillverkning 946
 - 32.2:2 Egenskaper 946
 - 32.2:3 Användning 947
- 32.3 Polymerimpregnerad betong 948
 - 32.3:1 Material och tillverkning 948
 - 32.3:2 Egenskaper 948
 - 32.3:3 Användning 948
- 32.4 Polymerbetong 948
 - 32.4:1 Material och tillverkning 948
 - 32.4:2 Egenskaper 949
 - 32.4:3 Användning 949
- 32.5 Litteratur 949

33. Lättballastbetong 951

- 33.1 Allmänt 951
- 33.2 Lättballast 951
 - 33.2:1 Översikt 951
 - 33.2:2 Lättballastmaterial 953
 - 33.2:3 Ballastegenskaper 953
- 33.3 Lättballastbetong 954
 - 33.3:1 Allmänt 954
 - 33.3:2 Användning 955
 - 33.3:3 Normer och regelverk 956
- 33.4 Tillverkning av lättballastbetong med sluten struktur 957
 - 33.4:1 Allmänt 957
 - 33.4:2 Proportionering, blandning och hantering 957
 - 33.4:3 Förvattning av lättklinker (eller ej) 960
 - 33.4:4 Härdning 961
- 33.5 Proportionering av lättballastbetong för konstruktionsändamål 962
 - 33.5:1 Allmänt 962
 - 33.5:2 Blandning 965
 - 33.5:3 Hur blanda en lättballastbetong med torr ballast 967
 - 33.5:4 Hur blanda en lättballastbetong med förvattnad ballast 968
 - 33.5:5 Exempel på proportionering 968
- 33.6 Egenskaper 969
 - 33.6:1 Densitet 969
 - 33.6:2 Porositet 970
 - 33.6:3 Hållfasthet 970
 - 33.6:4 Specifik värmekapacitet 973
 - 33.6:5 Elasticitetsmodul 973
- 33.7 Fukt och vattenabsorption 976
 - 33.7:1 Allmänt 976
 - 33.7:2 Byggfukt 976
 - 33.7:3 Vattenabsorption 978
 - 33.7:4 Frostbeständighet hos lättballast 978
 - 33.7:5 Frostbeständighet hos lättballastbetong 978
 - 33.7:6 Permeabilitet 978
- 33.8 Brand 978
- 33.9 Krypning och krympning 979
 - 33.9:1 Krypning 979
 - 33.9:2 Krympning 980
- 33.10 Korrosion och karbonatisering 981
 - 33.10:1 Armeringskorrosion 981
 - 33.10:2 Karbonatisering 982
- 33.11 Litteratur 982

34. Skumbetong 985

- 34.1 Inledning 985

- 34.2 Vad är skumbetong 985
- 34.3 Användning 986
 - 34.3:1 Använd densitet 986
 - 34.3:2 Exempel på användning 987
- 34.4 Sammansättning och delmaterial 987
 - 34.4:1 Delmaterial 987
 - 34.4:2 Proportionering 988
- 34.5 Egenskaper hos hårdnad skumbetong 989
 - 34.5:1 Allmänt 989
 - 34.5:2 Fuktupptagning 989
 - 34.5:3 Densitet 990
 - 34.5:4 Hållfasthet 990
 - 34.5:5 Elasticitetsmodul 991
 - 34.5:6 Krympning 991
 - 34.5:7 Värmekonduktivitet 992
 - 34.5:8 Beständighet och frostresistens 992
- 34.6 Produktion 992
 - 34.6:1 Tillverkning 992
 - 34.6:2 Transport 993
 - 34.6:3 Gjutning 994
 - 34.6:4 Härdning 994
- 34.7 Litteratur 994

35. Hållbarhet 997

- 35.1 Ingress 997
- 35.2 Hållbart byggande 997
 - 35.2:1 Hållbarhet kräver en systemsyn 997
 - 35.2:2 Agenda 2030 999
 - 35.2:3 Miljömål 1000
 - 35.2:4 Byggandets styrande regler 1001
 - 35.2:5 Samhällets utökade krav på byggandet 1002
- 35.3 Hållbart betongbyggande 1003
 - 35.3:1 Livslängd och konstruktiv säkerhet 1004
 - 35.3:2 Brand 1005
 - 35.3:3 Hygien, hälsa och miljö 1006
 - 35.3:4 Buller 1006
 - 35.3:5 Energi och effekt 1007
 - 35.3:6 Resurshushållning 1008
 - 35.3:7 Klimat 1009
 - 35.3:8 Frisk luft, försurning och övergödning 1010
 - 35.3:9 Ett rikt växt- och djurliv 1010
 - 35.3:10 Giftfri miljö 1011
 - 35.3:11 God bebyggd miljö 1012
 - 35.3:12 Spårbarhet och ansvarsfulla inköp 1013
 - 35.3:13 Klimatanpassning 1013
- 35.4 System för social hållbarhet 1015
- 35.5 System för miljöcertifiering och övrig dokumentation 1017

- 35.5:1 Miljöbyggnad 1019
- 35.5:2 GreenBuilding 1019
- 35.5:3 LEED 1020
- 35.5:4 BREEAM 1020
- 35.5:5 CEEQUAL/BREEAM Infrastructure 1021
- 35.5:6 NollCO₂ 1021
- 35.5:7 Andra bedömningsystem 1022
- 35.5:8 Miljödeklarationer 1024
- 35.5:9 Vägledning för tillverkare 1024
- 35.6 System för livscykelanalyser och miljövarudeklarationer 1025
 - 35.6:1 EPD-systemet är LCA-baserat 1026
 - 35.6:2 Detaljkommentarer kring EPD-systemet 1028
 - 35.6:3 LCA-trappan – ett beslutsstöd på olika nivåer 1032
 - 35.6:4 Trafikverkets klimatkalkyl 1033
 - 35.6:5 Andra verktyg kopplade till LCA 1033
- 35.7 Betong och koldioxid 1034
 - 35.7:1 LCA-studier av bostadshusen Blå Jungfrun och Brf Viva 1036
 - 35.7:2 Andra exempel på klimatpåverkan från byggnadsverk av betong 1038
 - 35.7:3 LCA-trappan för betong och betongbyggande 1041
 - 35.7:4 Koldioxidreduktion – cement och armering 1046
 - 35.7:5 Rekommendationer för betong med lägre klimatpåverkan 1051
- 35.8 Återanvändning och återvinning 1053
 - 35.8:1 Definitioner och kvantiteter 1053
 - 35.8:2 EU:s avfallstrappa 1053
 - 35.8:3 Förebygga avfall 1054
 - 35.8:4 Återanvända produkter 1054
 - 35.8:5 Återvinna betong 1054
 - 35.8:6 Återvinning, restmaterial i cement och betong 1056
 - 35.8:7 Deponi 1057
 - 35.8:8 Cirkulär ekonomi 1057
- 35.9 Energi och effekt 1057
 - 35.9:1 Byggnaders energianvändning 1058
 - 35.9:2 Energislag 1060
 - 35.9:3 Värmelagring 1061
 - 35.9:4 Inomhusklimat 1061
 - 35.9:5 Befintliga betongbyggnader som energilager 1061
 - 35.9:6 Smarta nät – moderna betongbyggnader i lokala energisystem för att hantera effekttoppar med hög andel förnybar energi 1062
 - 35.9:7 Byggnaders energianvändning i förändrat klimat 1064
 - 35.9:8 Energianvändning i vägtransporter 1064
- 35.10 Litteratur 1065

Sakord 1073

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 har nu omarbetats till en ny, utökad utgåva 3, uppdelad i två delar. Den första delen (*Del 1: Delmaterial samt färsk och hårdnande betong*) publicerades 2017. Andra delen heter *Del 2: Hårdnad betong, fysikaliska egenskaper och beständighet* och föreligger nu liksom Del 1 i både tryckt och digital form. Några kapitel gavs ut som särtryck i samband med publiceringen av Del 1 och dessa ingår nu i föreliggande Del 2. Andra tidigare utgivna handböcker inom området är *Betonghandbok Arbetsutförande*, *Betonghandbok Konstruktion* och *Betonghandbok Högpresterande Betong*. Relevanta delar ur den sistnämnda har inarbetats i *Betonghandbok Material*.

De viktigaste skälen till revideringen av *Betonghandbok Material* är nya standarder och forskningsrön 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 och detta behandlas ingående speciellt i fyra kapitel i Del 2. Ett alltmer ökande fokus på hållbarhet genomsyrar hela byggsektorns arbete och har här fått ett eget helt nytt kapitel.

Betonghandbok Material är en viktig referenslitteratur för yrkesverkssamma 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); Christer Ljungkrantz, Cementa; Markus Peterson, Svensk Betong; Ulf Jönsson, Svenska Betongföreningen; Helen Strandgren, Svensk Byggtjänst; Hans Hedlund, Skanska Sverige AB.

Styrgruppen har eftersträvat att innehållet i största möjliga utsträckning skall 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 Svenska Byggbranschens utvecklingsfond (SBUF). Trafikverket har också medverkat som finansiär. Vidare har bidrag lämnats via Svenska Betongföreningen av några av föreningens korporativa medlemmar: Abetong, Master Builders Solutions Sverige, Betongindustri, Byggnadstekniska Byrån, Schwenk, LTU, Lujabetong, Modern Betong, Pen-Tec, SSAB, 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 september 2021

Richard McCarthy
(Svenska Betongföreningen)

Christer Ljungkrantz
(Cementa)

14

Hållfasthet

*Bo Westerberg 14.1–14.4, Anders Ansell 14.5–14.7
och 14.9, Håkan Sundquist 14.10–14.13,
Lennart Elfgren 14.8 och 14.14–14.15*

14.1 Inledning

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. Provningmetoder enligt olika standarder kan dock skilja sig mer eller mindre, varför prov-

ningsresultaten 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 hållfasthets egenskaper, 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.

14.2 Begreppet hållfasthet

14.2:1 Olika hållfastheter

Hållfastheterna benämns efter provningssättet och de spänningar som åstadkommer brott:

- *Tryckhållfasthet*, avsnitt 14.4
- *Centrisk draghållfasthet*, avsnitt 14.5
- *Spräckhållfasthet*, avsnitt 14.6
- *Böjdraghållfasthet*, avsnitt 14.7
- *Skjuvhållfasthet*, avsnitt 14.9.

Beroende på använd provkropp benämns tryckhållfastheten *kubhållfasthet*, *cylinderhållfasthet* eller *prismahållfasthet*.

Fordrat värde på tryckhållfasthet i olika hållfasthetsklasser avser tryckhållfastheten vid 28 dygns ålder, så kallad normaltidsålder. (I standarder med engelsk originaltext, t.ex. Eurokoder, betecknas snabbt härdnande, normalhärdnande och långsamt härdnande cement med bokstäverna R, N respektive S, vilket möjligen kan leda till missförstånd.)

Ibland har man behov av att veta hållfastheten även vid annan tidpunkt än normaltidsåldern. Det gäller främst hållfastheten i tidig ålder, den s.k. *korttidshållfastheten*, som är viktig bland annat för avformning. Även hållfastheten vid högre ålder än normaltidsåldern, den s.k. *långtidshållfastheten*, kan vara av intresse. Varken korttids- eller långtidshållfastheten är knuten till någon fast tidpunkt, utan denna bestäms i varje särskilt fall.

Hållfastheten benämns efter belastningssättet:

- *Hållfasthet vid statisk korttidslast*, avsnitt 14.3:2.7.
- *Hållfasthet vid statisk, långvarig belastning*, avsnitt 14.3:2.7. Vid långvarig belastning med 70–90 % av korttidshållfastheten utbildas sammanhängande sprickor genom bruket som förenar sig med sprickor i fasgränsen mellan bruk och ballastkorn, och brott kan då inträffa efter en viss tid. Långvarig belastning kan således ge lägre hållfasthet än statisk korttidslast enligt ovan.
- *Hållfasthet vid dynamisk last, dynamisk hållfasthet*, avsnitt 14.3:2.7. Med dynamisk last menas en mycket kortvarig last, vilket kan ge högre hållfasthet än statisk korttidslast enligt ovan.

- *Utmattningshållfastheten*, avsnitt 14.3:2.8 och kapitel 17, står i relation till ett stort antal upprepade belastningar, oavsett om de har kort eller lång varaktighet (dynamisk eller statisk belastning).
- *Slaghållfasthet*, avsnitt 14.10, är en typ av dynamisk hållfasthet.

Hållfastheten benämns efter spänningstillståndet av belastningen som *enaxiell*, *tvåaxiell* eller *treaxiell* tryck- eller draghållfasthet.

Betongens *potentiella hållfasthet* bestäms vid vissa valda förhållanden för tillverkning av provkropp, härdning, ålder vid provning och provnings-sätt. Ett praktiskt mått på den potentiella hållfastheten erhåller man med standardiserade prov, såsom när kuber framställs, lagras och tryckprovas enligt en väldefinierad och standardiserad procedur, exempelvis SS-EN 12390 eller ISO 1920.

Genom att bestämma den potentiella hållfastheten på standardiserade prov kan man verifiera att betongsammansättningen varit lämplig. Samtidigt har de standardiserade proven juridisk betydelse vid betongmassans överlämnande från betongtillverkaren till byggplatsen (köparen).

Standardproven ger dock inte besked om inverkan av betongens bearbetning, härdning m.m. *i konstruktionen* och tar således ingen hänsyn till inverkan av arbetsutförandet. De ger ingen säker information om hållfastheten i den färdiga konstruktionen. Den potentiella hållfastheten uppnås i praktiken normalt inte i konstruktionen, avsnitt 14.13, bl.a. eftersom gjutning, komprimering och härdning där är annorlunda än vid standardiserade prov. Vid dimensionering används en omräkningsfaktor, som brukar ligga kring 0,85.

Betongens *hållfasthet i färdig konstruktion* ger ett mått på konstruktionens kvalitet och funktionsduglighet. Rimliga krav, inverkan faktorer samt provningsmetoder avseende hållfasthet i färdiga konstruktioner behandlas i avsnitt 14.13 respektive 14.14.

14.2:2 Standardiserade hållfasthetsklasser

14.2:2.1 Klassindelning

Standardiserade hållfasthetsklasser avser betongens potentiella hållfasthet. Klassindelningen är till nytta när man ska specificera önskad betonghållfasthet vid dimensionering av konstruktioner och vid tillverkning av betong. Sådan indelning underlättar också jämförelse av resultat från undersökningar.

Betongstandarderna SS-EN 206:2013 anger standardiserade hållfasthetsklasser för tryckhållfasthet, som kan bestämmas på antingen 150x300 mm cylindrar, $f_{c,cyl}$, eller på 150 mm kuber, $f_{c,cube}$. Provkroppar tas ut enligt SS-EN 12350-1:2009 samt tillverkas och lagras enligt SS-EN 12390-1:2012 respektive SS-EN 12390-2:2009.

SS-EN 206:2013 anger följande tryckhållfasthetsklasser för betong med normal densitet eller högre, där det första talet betecknar cylinderhållfasthet och det andra kubhållfasthet: C8/10, C12/15, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55, C50/60, C55/67, C60/75,

C70/85, C80/95, C90/105 och C100/115. Kvoten mellan cylinder- och kubhållfasthet ligger alltid kring 0,8, med smärre variationer på grund av avrundning. I Sverige används även mellanliggande klasser C28/35, C54/65 och C58/70.

Dimensioneringsstandarden Eurokod 2, SS-EN 1992-1-1:2004, anger som rekommenderade värden samma klasser, förutom den lägsta och den högsta. I Sverige kan dock även den högsta klassen C100/115 användas, dessutom används här ofta en mellanliggande klass, C32/40.

EN 206 anger även följande tryckhållfasthetsklasser för lättballastbetong, med densitet mellan 800 och 2000 kg/m³: LC8/9, LC12/13, LC16/18, LC20/22, LC25/28, LC30/33, LC35/38, LC40/44, LC45/50, 50/55, LC55/60, LC60/66, LC70/77 och LC80/88. Här är skillnaden mellan cylinder- och kubhållfasthet mindre, med en kvot kring 0,9. I SS-EN 1992-1-1:2004 anges samma klasser förutom den lägsta.

Några klasser för draghållfasthet anges inte i vare sig betongstandard eller dimensioneringsstandard.

Det karakteristiska värdet på betongens tryckhållfasthet för dimensionering enligt SS-EN 1992-1-1:2004 avser 0,05-fraktilen för tryckhållfastheten hos våtlagrade cylindrar eller kuber. Enligt praxis och standard sker dock hållfasthetsprovning även på kuber som vid provning är torra, vilket fordrar en omräkning, se avsnitt 14.12:3.2.

14.2:2.2 Bedömning av kravuppfyllelse

Vid provning av ett stort antal provkroppar ur den betongvolym, för vilken det fordrade värdet gäller, ska provningsresultatens undre 0,05-fraktil vara minst lika med det fordrade värdet, vilket i princip innebär att högst 5 % av provningsvärdena får understiga det fordrade värdet.

Kriterier för överensstämmelse med krav på tryckhållfasthet ges i SS-EN 206:2013. Några avvikelser från reglerna i denna standard anges inte i den svenska tillämpningsstandarden SS 137003:2015. Reglerna är omfattande, och nedan återges endast några huvuddrag.

Inget individuellt provningsresultat f_{ci} får understiga fordrat värde f_{ck} med mer än 4 MPa:

$$f_{ci} \geq f_{ck} - 4 \text{ MPa}$$

I övrigt ges två metoder.

Metod A: Inledande tillverkning

Medelvärde f_{cm} av grupper om tre provningsresultat ska överstiga fordrat värde f_{ck} med minst 4 MPa:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 4 \text{ MPa}$$

Metod B: Fortlöpande tillverkning

Medelvärde av minst 15 på varandra följande resultat ska överstiga fordrat värde med minst 1,48 gånger standardavvikelsen:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 1,48 \sigma$$

Det finns även en metod C, ”Användning av styrdiagram”, som kan användas när fortlöpande tillverkning etablerats och när betongtillverkningen omfattas av tredjepartscertifiering.

För detaljer och mer information hänvisas till standarden.

14.2:3 Vad är hållfasthet?

14.2:3.1 Exempel på definitioner

Betongens tryckhållfasthet kan på ett enkelt och praktiskt sätt definieras som det högsta värde på den nominella tryckspänningen som kan uppnås vid belastning av en provkropp till brott med enaxiellt tryck.

Draghållfastheten kan associeras med den s_k punkten för diskontinuitet, Newman (1968). Vid 40–60 % av brottlasten sker en långsam tillväxt av mikrosprickor, varvid energi förbrukas när nya spricktytor bildas. Vid bibehållen lastnivå avstannar spricktillväxten när materialets spänningsenergistillstånd är i jämvikt med det yttre lastsystemet. När lasten ökas ytterligare nås så småningom ett stadium, punkten för diskontinuitet, vid vilket systemet blir instabilt. Frigjord töjningsenergi är då tillräcklig för fortsatt spricktillväxt, som fortsätter tills materialet kollapsar. Punkten för diskontinuitet för spröda material är i viss mening analog med flytgränsen för töjbara material.

14.2:3.2 Brotthypoteser och brottkriterier

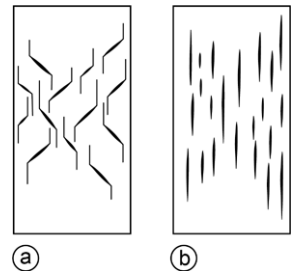
För behandling av hållfasthet eller bärförmåga är de gränsvillkor som framkallar brott av särskild betydelse.

Flera olika modeller för brottmekanismen har framlagts. I figur 14.2:1 visas exempel på två möjliga typer av tryckbrott. En vanlig uppfattning är att brottets utveckling sker stegvis, tills man når en kritisk spänningsnivå eller spänningsnivån för diskontinuitet.

Betongens struktur skadas redan vid spänningar som är lägre än den maximispänning som betongen kan bära. Vid spänningsnivån ca 80 % av maximispänningen börjar volymtöjningen att öka, eftersom inverkan av tvärutvidgning på grund av spricktillväxt då blir större än inverkan av elastisk sammantryckning i kraftriktningen. Denna spänningsnivå är därför särskilt betydelsefull för brottets utveckling. Av figur 14.3:27b framgår att hållfastheten vid långvarig belastning också ligger på denna nivå.

Ett flertal olika brotthypoteser finns uppställda och de använder olika gränsvillkor som kriterium för brott, Newman (1968), Kupfer (1973), Eibl & Iványi (1976), Hobbs (1983). Brotthypoteserna kan hänföras till någon av följande grupper:

1. Spänningshypoteser med gränsvärden för maximala huvudspänningar (normalspänningar och skjuvspänning).
2. Töjningshypoteser med gränsvärden för maximala töjningar.
3. Energihypoteser med gränsvärden för maximal total energiupptagning eller maximal förändringsenergi.
4. Brottmodellhypoteser.



Figur 14.2:1. Exempel på möjliga brottyper. Hobbs (1983).

- a) Brottet utvecklas genom att dragsprickor bildas vid änden av skjuvsprickor vid glidytan samtidigt som sprickbredden ökar
- b) Brottet utvecklas genom att spricklängden växer hos relativt långa men tunna sprickor i lastriktningen.

Energihypoteserna anses vara de mest korrekta för en sammanfattande beskrivning av hållfastheten.

Brottmekniken, en speciell gren av hållfasthetsläran, kan användas för beräkning av brottlast och för beskrivning av sprickbildning och brott hos betong och andra spröda material, se vidare avsnitt 14.8.

14.2:3.3 Statistisk hållfasthetsteori

Inom statistisk hållfasthetsteori värderas bland annat lämpligheten hos olika statistiska fördelningar för beskrivning av hållfasthetens spridning, Mirza et al (1979). Normalfördelningen är enkel att använda och är för praktiskt bruk tillräckligt noggrann. Den log-normala fördelningen är dock bättre lämpad för noggrannare beskrivning av hållfasthetens fördelning.

Statistisk hållfasthetsteori har ett flertal tillämpningar, t.ex. för beskrivning av hållfasthetens beroende av provkroppens eller konstruktionselementets volym, Rao & Swamy (1974), se också avsnitt 14.4:3.2.

14.3 Faktorer som generellt påverkar hållfastheten

14.3:1 Inverkningsrelaterade till inneboende betongegenskaper

14.3:1.1 Struktur och porositet

I kapitel 10 (del 1) beskrivs betongen som ett kompositmaterial med ballasten som partikelfas och cementpastan som kontinuerlig fas. Strukturen i dessa båda faser och i fasgränsområdet mellan dem bestämmer betongens hållfasthetsegenskaper. Normalt är cementpastan svagare än ballasten, men motsatsen förekommer också, t.ex. i lättballastbetong och i betong med hög hållfasthet.

Hållfastheten påverkas väsentligt av porositeten, så att hållfastheten växer med avtagande porositet. Porositeten är liten hos vanlig svensk naturballast, medan cementpastans porositet varierar inom vida gränser, beroende på vattenmängden vid proportioneringen. Huruvida kapillärporer bildas i cementpastan beror på vattencementtalet, vct , definierat som

$$vct = W/C \quad (14.3:1)$$

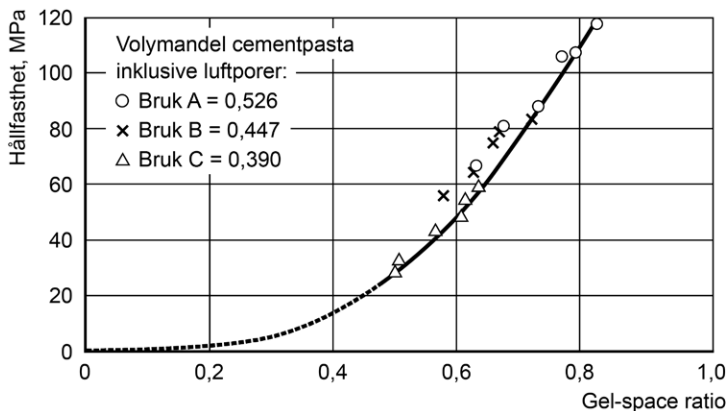
där

W = vattenhalt, kg/m^3

C = cementhalt, kg/m^3 .

Inverkan av vattencementtalets storlek på mängden gel- och kapillärporer behandlas i kapitel 10 (del 1).

Cementpastans porositet inverkar på brukets hållfasthet. Figur 14.3:1 visar ett exempel på hållfastheten som funktion av parametern *gel-space*



Figur 14.3:1. Tryckhållfastheten hos 50 mm kuber av cementbruk som funktion av *gel-space ratio*, Powers (1958).

ratio X, förhållandet mellan gelens volym, inklusive porer, och tillgängligt utrymme för gelen, dvs.

$$X = \frac{\text{gelvolym}}{\text{gelvolym} + \text{kapillärporer}}$$

Ingen hänsyn är tagen till volymen av det ohydratiserade cementet.

Gelvolymen inklusive porer är $0,71\alpha C$, varav $0,5\alpha C$ består av fast gelvolym och $0,2\alpha C$ av gelporer, medan volymen kapillärporer utgör ($W - 0,39\alpha C$); här är α hydratationsgraden.

Gel-space ratio kan då uttryckas som

$$X = \frac{0,71\alpha C}{0,71\alpha C + W - 0,39\alpha C} \quad (14.3:2)$$

Försöksresultat rörande tryckhållfasthetens beroende av *gel-space ratio* beskrivs enligt Powers (1958) väl av uttrycket (14.3:3).

$$f_c = k \cdot X^m \quad (14.3:3)$$

där

f_c = cementbrukets tryckhållfasthet

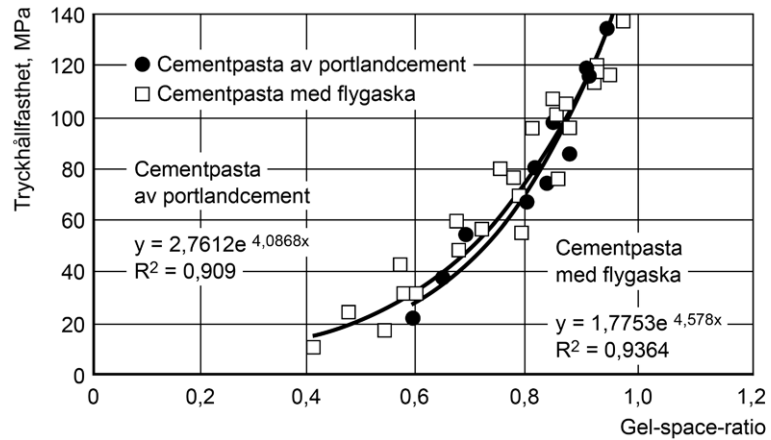
k och m = empiriska parametrar.

Figur 14.3:2 visar ett exempel på hållfastheten hos ren cementpasta som funktion av parametern X . Skillnaden mellan cementpasta med respektive utan flygaska är liten, även om parametrarna i uttrycket (14.3:3) skiljer sig något.

För cementpasta bestäms porositeten, och därmed även hållfastheten, framförallt av vattencementtalet, *vct*. Om *vct* och hydratationsgraden är kända kan porositeten beräknas enligt Betonghandbok Material, kapitel 10 (del 1). Ur porositeten kan i sin tur hållfastheten bestämmas, t.ex. med uttrycket (14.3:4):

$$f_c = f_0 \cdot e^{-k \cdot P} \quad (14.3:4)$$

Figur 14.3:2. Samband mellan tryckhållfasthet och gel-space-ratio X för cementpasta med (FC) respektive utan (PC) flygaska. Lam et al (2000).



där

f = hållfastheten hos ett poröst material

f_0 = hållfastheten hos motsvarande porfria material

P = porositeten

k = lutningen på kurvan (linjen) som visar $\ln f$ som funktion av P .

För många porösa material gäller att $k = 7$, oberoende av material och porstorlek, figur 14.3:3.

I litteraturen finns även andra samband mellan hållfasthet och porositet, t.ex. följande enligt Chen et al (2013):

$$f = f_0 \left[\left(\frac{P_c - P}{P_c} \right)^{1,85} \cdot (1 - P^{2/3}) \right]^{1/2} \quad (14.3:5)$$

där f_0 är hållfastheten hos motsvarande porfria material, P är porositeten, är en referensporositet. Följande värden anges, tabell 14.3:1:

Tabell 14.3:1. Värden på referensporositet och porositet.

	P_c	f_0
Tryckhållfasthet	0,562	69,4
Spräckhållfasthet	0,768	9,74
Böjdraghållfasthet	0,783	5,56

Figur 14.3:4 visar tryckhållfasthet för cementbruk enligt uttrycket (14.3:5) tillsammans med försöksresultat.