



# LUND UNIVERSITY

## Högpresterande betong : ballast

Fagerlund, Göran

1998

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Fagerlund, G. (1998). *Högpresterande betong : ballast*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7131). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

*Total number of authors:*

1

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

LUND UNIVERSITY  
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
Division of Building Materials

---



# HÖGPRESTERANDE BETONG

# BALLAST

**Göran Fagerlund**

Report TVBM-7131  
Lund, Sweden, 1998

---



## Förord

Det nationella projektet Högpresterande Betong bedrevs under åren 1991-1997. Finansiärer var BFR och NUTEK tillsammans med ett industrikonsortium bestående av 6 företag: Cementa, Elkem Materials, Euroc Beton, NCC, Skanska och Strängbetong. Ett av delprojekten avsåg den högpresterande betongens frostbeständighet. Resultat från detta delprojekt har redovisats i 8 interna rapporter, vilka kan erhållas från avdelning byggnadsmaterial, LTH. Rapportlista ges nedan.

Efter projektets avslutning har text till två handböcker sammanställts:

Handbok "Konstruktion"

Handbok "Material och Utförande"

Dessa kommer att ges ut hösten 1998.

Kapitel Ballast, som utgör kap 4 i Handbok "Material och Utförande", utarbetades av undertecknad. Texten återges i denna rapport.

Lund, 16 september 1998

Göran Fagerlund

### **Interna rapporter publicerade under delprojekt M2 "Fysikaliska angrepp"**

M2:01: Sture Lindmark: Inverkan på testresultatet av variationer i saltkoncentrationer, saltfördelningar och fryscykelutformning vid saltfrysprovning enligt SS 13 72 44. Lund 1993.

M2:02: Sture Lindmark: Högpresterande betongs frost- och saltfrostbeständighet - kortfattad litteraturstudie. Lund 1993.

M2:03: Sture Lindmark: Studier av högpresterande betongs saltfrostbeständighet  
A: Pessimala saltkoncentrationer och varierad förlagring  
B: Inverkan av vct/vbt.  
Lund 1994.

M2:04: Göran Fagerlund, Sture Lindmark: Studies of the effects on salt scaling of outer salt concentration, inner salt concentration and freeze/thaw cycle. Lund 1994

M2:05: Sture Lindmark: Influence of testing conditions on salt frost resistance of concrete. Lund 1995.

M2:06: Göran Fagerlund: Undersökningar av den inre frostbeständigheten hos högpresterande betong. Lund 1997.

M2:07: Katja Nordström, Göran Fagerlund: Mätningar av inre frostbeständighet hos betong som lagrats under ca 18 månader i vatten eller 3% NaCl-lösning. Lund 1998

M2:08: Göran Fagerlund och Yang Quanbing: Inner moisture conditions in high performance concrete stored in water or salt solution for almost 2 years. Lund 1998.



# HÖGPRESTERANDE BETONG

## BALLAST

Göran Fagerlund, LTH

<b>Innehåll</b>	<b>Sid</b>
GENERELLT	1
INVERKAN AV BALLAST PÅ FÄRSKA BETONGENS EGENSKAPER	1
INVERKAN AV BALLAST PÅ HÅLLFASTHET OCH BROTTGENSKAPER	3
INVERKAN AV BALLAST PÅ BESTÄNDIGHET	7
INVERKAN AV BALLAST PÅ E-MODUL	8
INVERKAN AV BALLAST PÅ LÅNGTIDSDEFORATIONER	8
LÄTTBALLAST	9
LITTERATUR	9



## 4 BALLAST

*Göran Fagerlund*

### 4.1 GENERELLT

I Betonghandbok Material Utgåva 2 ges allmän information om ballast till betong. Olika begrepp som beskriver ballastens struktur definieras, såsom graderingskurva, finhetsmodul, kornform, ytbeskaffenhet, densitet, porositet, vattenabsorption, fukthalt, föroreningar, etc, Johansson (1994). Mätmetoder för dessa egenskaper beskrivs. Viktiga materialegenskaper beskrivs också, såsom hållfasthet, vidhäftning, fuktrörelser, etc. Mätmetoder anges. Läsaren hänvisas till detta kapitel när det gäller dessa allmänna egenskaper, vilka naturligtvis är viktiga och giltiga även för högpresterande betong.

Inverkan av ballast på olika mekaniska egenskaper hos högpresterande betong återfinns i respektive kapitel i denna handbok. Således beskrivs inverkan av ballastens egenskaper på betongens hållfasthet i Kapitel 9 "Hållfasthet", inverkan på betongens deformationsegenskaper i kapitel 10 "Elastiska deformationer, krympning, krypning" och inverkan på färsk betongens egenskaper i kapitel 6 "Betongmassa" och i kapitel 18 "Proportionering". Läsaren hänvisas även till dessa kapitel.

I föreliggande kapitel ges enbart vissa principiella synpunkter på vad man skall tänka på vid val av ballast till högpresterande betong. Enbart sådana egenskaper där ballasten har avsevärd betydelse behandlas.

Val av ballast måste föregås av omfattande förprovning. Detta gäller främst gjutbarhet och hållfasthet. Det är inte självklart att den ballast som används för den normala betongproduktionen kan användas även för högpresterande betong. Det är dessutom ofta nödvändigt att göra en särskild fraktionering av ballasten för att därmed kunna åstadkomma siktkurvor som ger tillräckligt bra gjutegenskaper.

### 4.2 INVERKAN AV BALLAST PÅ FÄRSKA BETONGENS EGENSKAPER

#### 4.2:1 Allmänt

Gjutbarheten är den egenskap hos den färsk högpresterande betongen där ballasten har den mest avgörande betydelsen. Högpresterande betong har nästan alltid låg eller exceptionellt låg blandningsvattenhalt. Följaktligen blir ballastkurvans utseende oerhört betydelsefull för gjutbarheten. Små förändringar i framförallt grusfraktionen får avgörande inverkan på vattenbehovet och därmed på cementhalten och cementpastahalten. I normalfallet kan man inte slentrianmässigt använda det grus man har för tillverkning av normalbetong. En fraktionering av detta grus och därefter sammansättning av en ny siktkurva blir ofta en nödvändig åtgärd. Andra ballastegenskaper som har avgörande betydelse för gjutbarheten är kornform och ytstruktur.

Det är förvånansvärt små variationer i ballasthalt och ballastgradering som ger stora utslag i gjutbarheten. Val av ballasttyp, graderingskurvor, etc bör därför baseras på omsorgsfull förundersökning med metoder som verkligen återspeglar betongens gjutbarhet, pumpbarhet och andra viktiga produktionsegenskaper hos färsk betong. För utprovning av gjutbarhet räcker inte det vanliga sättmättet. Det måste kompletteras med en metod som ger bättre information, t ex omformningsmättet. Ett annat alternativ är att använda en betongviskosimeter som mäter betongens båda viktigaste reologiska egenskaper, viskositet och kohesion. Exempel på en sådan mätare, BML-viskosimetern visas i figur 6.3:1. Såväl omformningsmätaren som betongviskosimetern är mycket väl lämpade för utveckling av gjutbara högpresterande betonger.

Även ballastens naturliga fukthalt har avgörande betydelse för gjutbarheten eftersom förhållandevis stor andel av blandningsvattnet härrör från ballasten. Variationer i naturlig fukthalt ger stora effekter på konsistensen och därmed på gjutbarheten. Även fukt i stenfraktionen får proportionellt sett



mycket större betydelse i högpresterande betong än i normalbetong.

#### 4.2:2 Gradering

Maximal kornstorlek bör vara mindre än för normalbetong; 16 mm eller mindre bör användas. Andra undersökningar, t ex Mehta & Aitcin (1990), rekommenderar 10-12 mm även om författarna menar att upp till 20-25 mm är användbart.

Förhållandet mellan stenfraktion och sandfraktion (gräns mellan fraktionerna är 4 mm) bör enligt vissa författare vara högre i högpresterande betong än i normalbetong. Mindess (1994) refererar undersökningar som anger ett lämpligt förhållande av 1,5 till 2,0 vilket skall jämföras med förhållandet 0,9 till 1,4 för normalbetong. Orsaken till denna rekommendation är troligen att hållfastheten därmed blir hög och inte primärt att gjutbarheten ökar.

Sandens graderingskurva har mycket stor betydelse. Detta har påvisats av Persson (1995). Han anger, baserat på mer än 400 provade betongblandningar, att siktkurvan skall uppfylla följande krav; "idealkurvan":

$$s = a \cdot d^b \quad \text{för } 0,125 < d < 0,7 \cdot d_{max} \quad (4.2:1)$$

Där  $s$  är passerande mängd på sikt  $d$  mm (%),  $a$  (%) är en konstant som varierar något från blandning till blandning. Ett normalvärde är  $a=38\%$ . Koefficienten  $b$  beror på betongens hållfasthetsnivå enligt tabell 4.2:1. Formeln förutsätter att allt bindemedel inräknas i partikelmängden. Bindemedlet hamnar alltid i fillerfraktionen ( $<0,125$  mm).

Denna siktkurva är alltså helt rätlinjig upp till 70% av maximala kornstorleken i ett traditionellt siktdiagram. Exempel på siktkurvor provade av Persson (1995) ges i figur 4.2:1. Enligt samme författare bör själva ballastens fillerandel vara ca 3%.

Sammansättning av befintlig ballast till "idealkurvan" kan genomföras med datorprogrammet "PROPH 2.0", Persson (1995). Normalt kräver detta en fraktionering av befintligt grus.

Tabell 4.2:1. Koefficienten  $b$  i formel (4.2:1)  
Table 4.2:1. The coefficient  $b$  in equation (4.2:1)

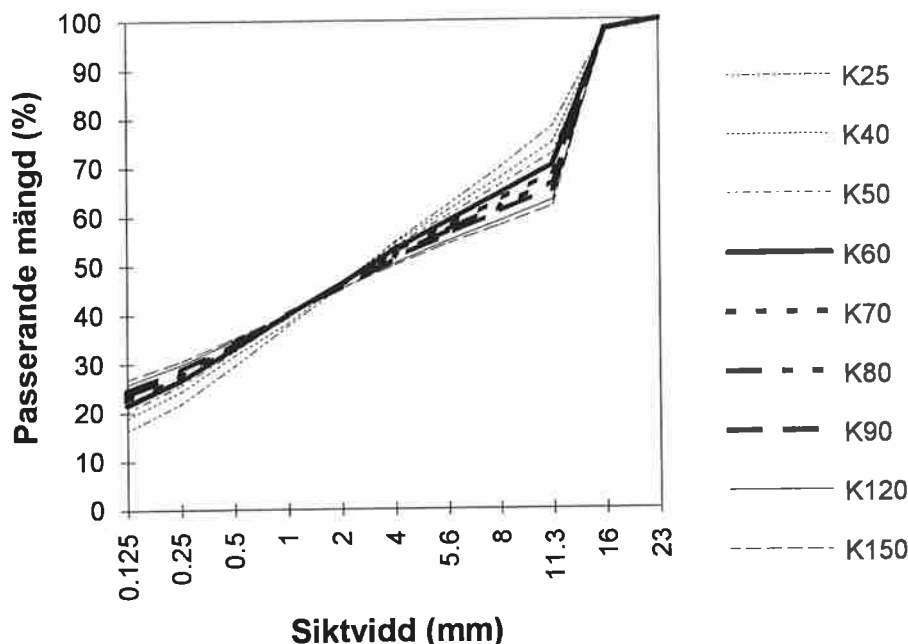
Betongkvalitet	K25	K60	K90	K120	K150
$b$	0,32	0,24	0,20	0,18	0,16

Idealkurvan kan användas som utgångspunkt för en proportionering. Erforderliga, eller möjliga, förändringar i förhållande till denna kan baseras på utprovning av gjutbarheten vid användning av olika alternativa siktkurvor, varvid t ex omformningsmätaren kan utnyttjas.

#### 4.2:3 Kornform och ytstruktur

Det finns få systematiska mätningar gjorda av inverkan av kornform och ytstruktur på den högpresterande betongens gjutbarhet. Många författare hävdar dock att sandfraktionen i möjligaste mån bör bestå av rundade korn av naturgrus. Detta minskar vattenbehovet i betongen, Mindess (1994). Det är osannolikt att krossad sand skulle kunna användas i högpresterande betong med lågt vbt.

Stenfraktionen kan bestå av krossat material. I så fall bör kornen vara så kubiska som möjligt och ha slät yta. En begränsad undersökning vid avd byggnadsmaterial, LTH, visade att krossad kubisk kvartsit gav bättre gjutbarhet än krossad kubisk granit. Orsaken torde kunna hänföras till att kvarsitkornens yta hade lägre råhet än granitkornens yta. Yträheten provades med en primitiv friktionsmätning; Persson (1993).



Figur 4.2:1 Exempel på lämpliga siktkurvor (inklusive bindemedel) för betong med hög gjutbarhet; Persson (1995). Allt bindemedel inräknas i fillerfraktionen (< 0,125 mm).

Figure 4.2:1 Example of suitable sieve curves (including the binder) for production of concrete with high workability, Persson (1995). All binder particles are included in the filler fraction (< 0,125 mm).

### 4.3 INVERKAN AV BALLAST PÅ HÅLLFASTHET OCH BROTT-EGENSKAPER

#### 4.3:1 Allmänt

I normalbetong är cementpastan den svagaste länken, medan ballasten nästan alltid är överstark; se figur 9.2:7 som visar exempel på tryckhållfasthet och spräckhållfasthet hos olika svenska bergarter. Ytterligare exempel på mekaniska egenskaper hos svensk ballast inkluderande vidhäftning till cementbruket ges i Hassanzadeh (1994) och (1998). Hos normalbetong bestäms följaktligen hållfastheten i huvudsak av pastans hållfasthet. Brottet går normalt genom vidhäftningszonen mellan grov ballast och pasta och genom pastan (cementbruket). De grova ballastkornen förblir normalt intakta efter brott, med undantag för lättballastbetong där ballasten normalt är den svaga länken och därför brister. Hållfastheten hos normalbetong kan höjas något genom att finkornigare ballast används vid konstant ballastmängd, eller genom att ballasthalten ökas. Båda dessa åtgärder minskar medelavståndet mellan ballastkornen, vilket försvårar sprickutbredningen vid brott; man får en s k "dispersionshårdningseffekt", Fagerlund (1975). I normalbetong sker brottet relativt "segt" genom att brottytan måste "zick-zacka" mellan de grova ballastkornen, vilket medför tämligen hög brottenergi.

I högpresterande betong med lågt  $v_{bt}$  kommer ballastens egenhållfasthet att få större inverkan på betonghållfastheten eftersom cementpastan är mycket stark i sådan betong samtidigt som vidhäftningszonen ofta är mycket starkare än i normalbetong, särskilt när betongen innehåller silikastoft, Bentur & Cohen (1987), Scrivener et al (1988), Aquino et al (1995). Brottet går därför ofta genom ballastpartiklarna. Detta ger ett sprött brottbeteende hos betongen med lägre förhållande mellan brottenergi och hållfasthet än hos normalbetong. Det är framförallt stenfraktionens hållfasthet som påverkar betonghållfastheten. Vissa svagare ballasttyper t ex grovkorniga gnejser, kalkstenar m fl torde vara olämpliga i högpresterande betong, medan andra ballasttyper, t ex finkorniga bergarter av eruptivt ursprung och även finkorniga kalkstenar, kan fungera väl, Aitcin & Neville (1993).

Finfraktionen - sanden - spelar också stor roll eftersom den i stor utsträckning avgör vattenbehovet i betongen och därmed indirekt den möjliga hållfastheten hos cementpastafasen och därmed hos betongen. Däremot torde sandens egenhållfasthet ha mindre betydelse än stenfraktionens egenhållfasthet.

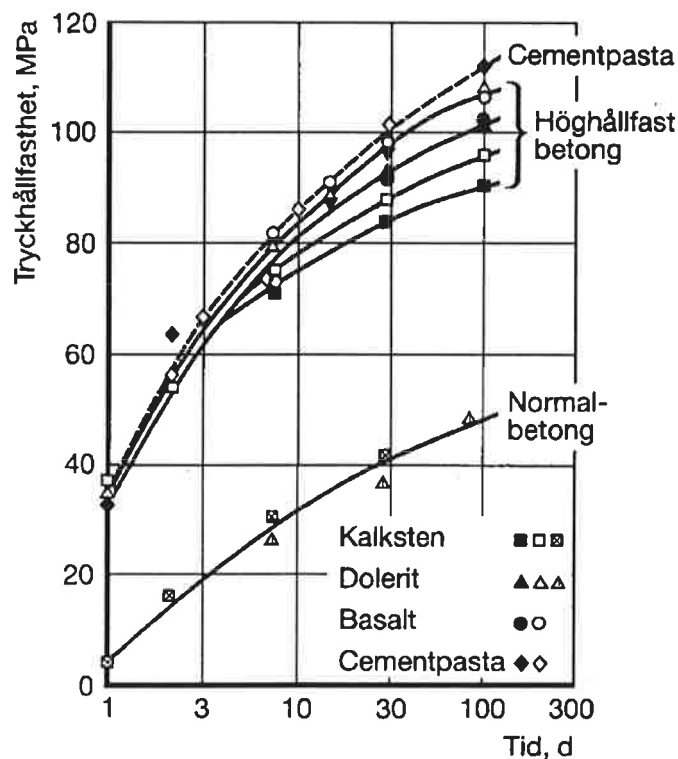
Största kornstorlek måste begränsas i högpresterande betong. Det finns två orsaker till detta: (1) större ballastkorn medför försämrade fasgränser på grund av den inre "mikroseparation" av blandningsvatten som ofta uppträder under grova ballastkorn, (2) minskad ballaststorlek medför sannolikt att ballastkornens egenhållfasthet ökar något. Liksom för normalbetong medför dessutom minskad ballaststorlek att sprickutbredningen i cemenbruksfasen försvåras. Enligt Mehta & Aitcin (1990) skall max kornstorlek helst inte överskrida 20 mm. Författarna menar att optimal max kornstorlek är 10-12 mm.

Valet av ballasttyp blir således mycket viktigare för högpresterande betong än för normalbetong. Val av ballast görs lämpligen på basis av förprovning av hållfastheten hos betongen.

För att åstadkomma hög och jämn hållfasthet hos betongen krävs att fukthalten framförallt i finfraktionerna hålls under mycket stark kontroll. Små förändringar i fukthalt, vilka inte uppmärksammas och kompenseras för, kommer att ge mycket större hållfasthetsvariationer i en högpresterande betong än i en normalbetong, Fagerlund (1994).

### 4.3:2 Tryckhållfasthet

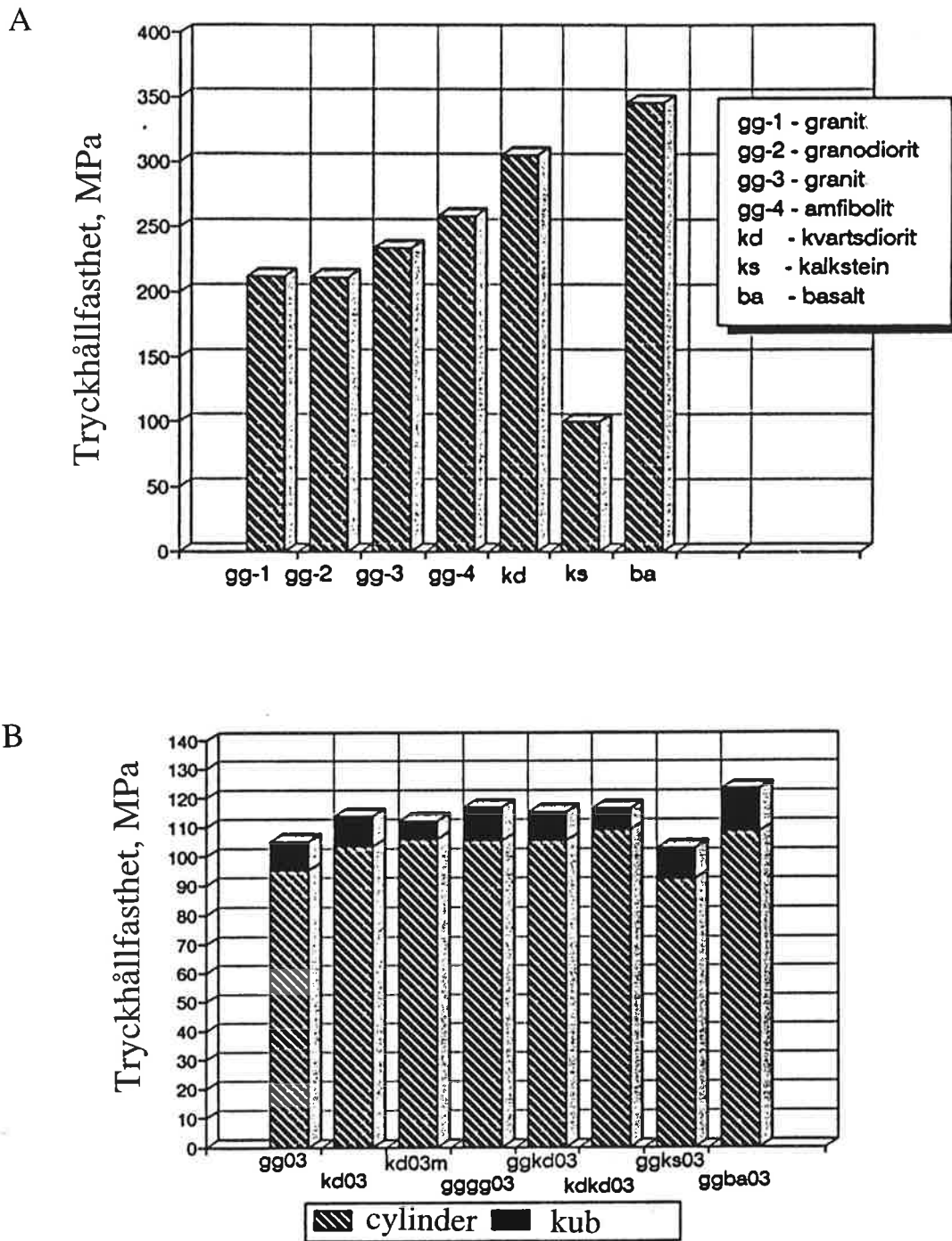
Exempel på att ballastens egna hållfasthet har betydelse för tryckhållfastheten hos högpresterande betong visas i figur 4.3:1. Trots att ballast med mycket hög hållfasthet använts blir betonghållfastheten lägre än pastans hållfasthet vilket kan förklaras av de spänningskoncentrationer som uppstår mellan den styva ballasten och den något vekare pastan. Ballasten "suger" därför åt sig spänningar vilket medför ballastbrott. Olika ballasttyper ger enligt figur 4.3:1 något olika hållfasthet trots att cementpastan är densamma i de olika betongerna. Skillnaden är dock bara av storleksordningen 15 % medan skillnaden i själva ballastens tryckhållfasthet är mångdubbelt större.



Figur 4.3:1 Hållfasthetstillväxt hos högpresterande betong tillverkad med 8 olika ballasttyper, Parrott (1969).

Figure 4.3:1 Strength growth in high-performance concrete made with 8 types of aggregate.

Ett annat exempel på att stora skillnader i ballasthållfasthet ger förhållandevis marginella skillnader i betonghållfasthet när ballasten är stark visas i figur 4.3:2. En ändring av ballasthållfastheten från ca 220 MPa för granit till ca 340 MPa för basalt ger enbart en hållfasthetshöjning med ca 20 MPa hos betongen.



Figur 4.3:2 Tryckhållfasthet hos olika ballasttyper (A), och hos betong tillverkad med ballasten (B), Smeplass (1992).

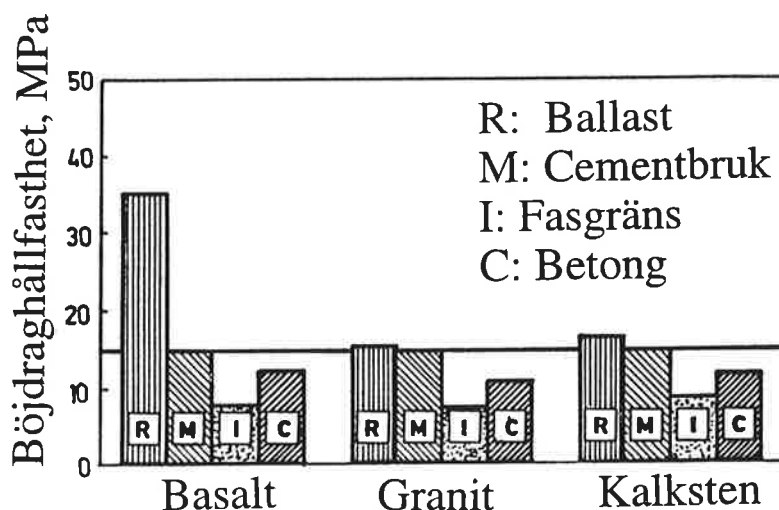
Figure 4.3:2 Compressive strength of different aggregates (A), and of concretes made with the aggregates (B).

### 4.3:3 Böjdrag- och draghållfasthet

Giaccio et al (1992) har mätt *böjdraghållfastheten* hos betong med olika typer av grov ballast, figur 4.3:3. Mätningarna visar att ballasthållfastheten har mycket liten inverkan. Basalt med en böjdraghållfasthet av 35 MPa ger ungefär samma böjdraghållfasthet hos betongen som kalksten med böjdraghållfastheten 16 MPa.

Enligt figur 9.3:1 är det ett tämligen linjärt samband mellan ballastens späckhållfasthet och betongens *spräckhållfasthet*. En ändring av ballasthållfastheten med 80 % ger dock i genomsnitt bara en ändring av betonghållfastheten med ca 15 %. Effekten av ballasthållfastheten på betongens draghållfasthet är således tämligen liten. Med tanke på att draghållfastheten inte tillväxer i samma takt som tryckhållfastheten är dock även en liten ökning i draghållfastheten viktig.

Hög draghållfasthet förutsätter hög hållfasthet hos fasgränsen mellan grov ballast och cementpasta. Därför är det viktigt att ballastyterna är fria från finpartiklar t ex från krossning.



Figur 4.3:3 Böjdraghållfastheten hos ballast (R), cementbruk (M), betong (C) och fasgräns (I). Tre olika ballasttyper, Giaccio et al (1992).

Figure 4.3:3 Flexural strength of aggregate (R), cement mortar (M), concrete (C), and interface (I). Three different aggregates.

### 4.3:4 Brott beteende och seghet

Betongens sprödhet uttrycks lämpligen genom den sk "karakteristiska längden"  $l_{ch}$ , som är en materialegenskap vilken beror på förhållandet mellan brottenergin hos betongen och den i betongen inlagrade elastiska energin. Ett sprödare material karakteriseras därför av ett mindre värde på  $l_{ch}$ . Sprödhetsbegreppet och betongens brottprocesser behandlas utförligare t ex i Hillerborg (1977) och i Betonghandbok Material, Kapitel 11.15.

Generellt ökar betongens sprödhet med ökad hållfasthetsnivå. Man kan förvänta sig ca en halvering av  $l_{ch}$  när tryckhållfastheten ökar från 40 MPa till 140 MPa, Hagpassand (1992) och Hassanzadeh (1998). Den grova ballastens typ har ett visst inflytande på betongens seghet. Exempel på detta visas i figur 9.4:2. Diabas ger betydligt högre värde på  $l_{ch}$  än tex granit. Där kraven på hög brottseghet hos betongen är stora bör därför diabas eller någon annan ballast med hög brottseghet användas.

Inverkan av ballasttypen på betongens brottbeteende kan bestämmas experimentellt. Metoder anges t ex i Hassanzadeh (1994).

## 4.4 INVERKAN AV BALLAST PÅ BESTÄNDIGHET

### 4.4:1 Allmänt

Ballasten påverkar främst betongens frostbeständighet, dess beständighet mot alkali-ballastreaktioner, dess nötningsmotstånd och dess brandbeständighet, medan ballastens inverkan på andra beständighetsegenskaper är betydligt mindre. För en fyllig genomgång av ballastens betydelse för betongens beständighet hänvisas till Betonghandbok Material, Kapitel 21 Frostbeständighet, Kapitel 22 Kemisk beständighet, Kapitel 25 Brandbeständighet och Kapitel 26 Nötningsmotstånd.

I princip gäller samma regler för val av ballast till högpresterande betong som när det gäller val av ballast till normalbetong. Några ytterligare kommentarer ges nedan.

### 4.4:2 Frostbeständighet

Även om cementbruksfasen i betongen är skyddad genom en god luftporstruktur riskerar man att betongen fryser sönder om den ingjutna grova ballasten kan vattenmättas över en viss kritisk nivå. Teoretiskt räcker det med ca 1 à 2 vol-% porositet hos vattenmättad ballast för att den skall kunna spränga sönder betongen vid frysning. Högpresterande betong är ännu mer känslig än normalbetong eftersom vatten som pressas ur ballasten vid frysning inte så lätt kan tas om hand i den mycket täta cementpastan.

För att ballast skall kunna vattenfyllas när den är ingjuten måste den vara mycket finporös. Exempel på farliga bergarter är skiffer, kalksten, marmor och dolomitkalksten när dessa har en totalporositet överstigande ca 1 vol-%. Sådan ballast bör aldrig användas som stenfraktion i högpresterande betong som skall vara frostbeständig. Inte heller bör krossad betong eller annat återvunnet mineraliskt byggnadsmaterial användas.

Lättballast kan normalt användas i högpresterande frostbeständig betong trots att dess porositet är hög. Orsaken är att porerna i sådan ballast normalt är så grova att den ingjutna ballasten inte kan vattenfyllas till en kritisk nivå, Fagerlund (1978). Viss lättballast, t ex expanderad flygaska, kan dock vara så finporös att den vattenfylls. Sådan ballast bör inte användas.

Ballastens potentiella inverkan på betongens inre frostbeständighet kan undersökas, t ex med metod ASTM C682. Man bör dock vara försiktig med att tolka resultatet av provningsmetoder av inre frostbeständighet hos högpresterande betong eftersom sådan betong ofta har en inre självtorkning som ger resultat på osäkra sidan. I verkligheten, under realistiska mycket fuktiga förhållanden, torde självtorkningen på sikt upphävas genom att vatten gradvis går in i betongen. Därvid minskar den inre frostbeständigheten. Detta problem beskrivs i Kapitel 13 och i rapporterna Fagerlund (1997), Nordström & Fagerlund (1998) och Fagerlund & Yang (1998).

### 4.4:3 Alkali-ballastreaktioner

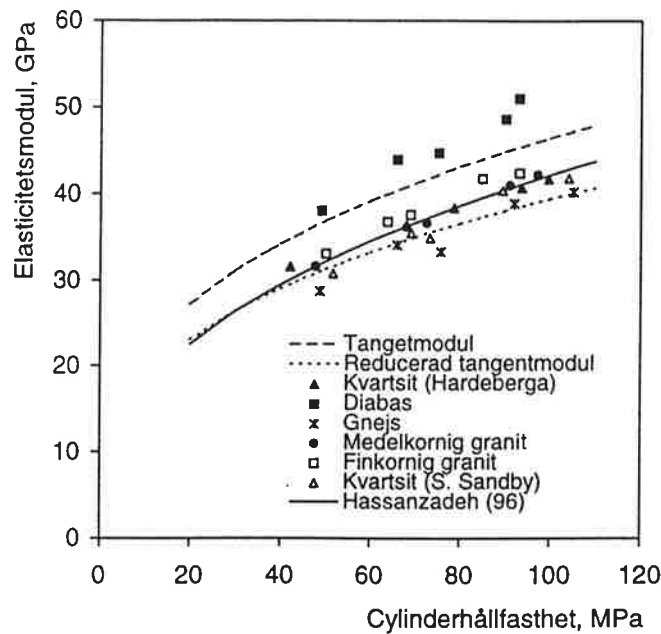
Aktuella reaktioner är alkali-kiselsyrareaktion och alkali-dolomitreaktion vilka båda är expansiva och därför kan spränga sönder betongen. Den mycket tätare cementpastan i högpresterande betong jämfört med normalbetong kan inte förhindra dessa reaktioner, Lagerblad (1996). Däremot kommer reaktionshastigheten normalt att bli lägre på grund av att inflödet av det vatten som erfordras för reaktionerna är långsammare. På sikt kan man däremot förvänta att expansionen blir lika stor som för normalbetong vid i övrigt samma förhållanden vad avser ballastmängd, ballastgradering och alkali-halt.

Samma regler gäller därför för att undvika alkali-ballastreaktioner i högpresterande betong som de som gäller för normalbetong. Den viktigaste åtgärden - bortsett från att byta till icke-reaktiv ballast - är att sänka den totala alkalihalten i betongen. Ett allmänt accepterat gränsvärde för ekvivalenta Na<sub>2</sub>O-halten är 3 kg/m<sup>3</sup>. Högpresterande betong har oftast betydligt högre cementhalt än normalbetong varför gränsen kan vara svår att nå. Därför rekommenderas att man alltid använder icke-reaktiv ballast.

#### 4.5 BALLASTENS INVERKAN PÅ E-MODUL

Betongens  $E$ -modul bestäms av cementpastans och ballastens  $E$ -moduler, varvid ballasten har störst betydelse genom att den utgör den volymmässigt största komponenten. Högpresterande betong har betydligt styvare cementpasta än normalbetong. Samtidigt är volymandelen cementpasta något högre i högpresterande betong. Dessa båda faktorer tar delvis ut varandra. I genomsnitt ökar dock  $E$ -modulen något med ökande betonghållfasthet, figur 4.5:1, baserad på data i Hassanzadeh (1998). Som synes är inverkan av ballasttypen relativt marginell bortsett från när diabas, som har en egen hög  $E$ -modul, används.

För att avsevärt öka betongens styvhet måste man använda ballast med mycket hög  $E$ -modul, t ex kalcinerad bauxit.



Figur 4.5:1 Samband mellan betongens tryckhållfasthet och dess  $E$ -modul vid olika typer av grov ballast, Hassanzadeh (1998).

Figure 4.5:1 Relation between the compressive strength of concrete and its  $E$ -modulus for different types of aggregate.

#### 4.6 BALLASTENS INVERKAN PÅ LÅNGTIDSDEFORMATIONER

Betongens krypning och krympning bestäms huvudsakligen av cementpastans egenskaper, främst dess  $v_{bt}$ . Genom lämpligt val av ballast kan deformationerna minska. Det är främst ballastens styvhet som har betydelse. Effekten av ballastens  $E$ -modul på betongens långtidsdeformationer kan överslagsmässigt beskrivas med följande formel (Pickett's formel):

$$\varepsilon_B = \varepsilon_p \cdot v_p^K \quad (4.6:1)$$

där

- |                 |   |
|-----------------|---|
| $\varepsilon_B$ | betongens deformation                   |
| $\varepsilon_p$ | pastans deformation                     |
| $v_p$           | volymandelen cementpasta                |
| $K$             | konstant som beräknas ur formel (4.6:2) |

$$K \approx 2 / (1 + E_p / E_b) \quad (4.6:2)$$

där  $E_p$  är cementpastans  $E$ -modul och  $E_b$  är ballastens  $E$ -modul.

Genom att byta från en ballast med  $E$ -modul 50 GPa till en ballast med  $E$ -modul 80 GPa hos en betong med en pasta som har  $E$ -modulen 20 GPa och pastahalten 35% ökar koefficienten  $K$  från 1,43 till 1,60. Följaktligen blir långtidsdeformationerna vid given tid ca 16% lägre. Inverkan av ballast-typen är således tämligen marginell.

#### 4.7 LÄTTBALLAST

Enbart högkvalitativ lättballast särskilt avsedd för högvärdig konstruktionsbetong bör användas. Området höghållfast lättballastbetong behandlas i Langseth (1993).

#### 4.8 LITTERATUR

Aitcin P-C & Neville A. High-performance concrete demystified. Concrete International, Jan. 1993.

Aquino M J, Li Z & Shah S P. Mechanical properties of the aggregate and cement interface. Advanced in Cement Based Materials, 1995. No 2.

ASTM C682. Evaluation of frost resistance of coarse aggregates in concrete by critical dilation procedure.

Bentur A & Cohen M D. The effect of silica fume on the microstructure of the interfacial zone in portland cement mortars. J. of the American Ceramic Society, 1987(70):10.

Fagerlund G. Ballastens funktion i betong. Väg- och Vattenbyggaren, Febr. 1975.

Fagerlund G. Frost resistance of concrete with porous aggregate, CBI, Research Fo 2:78, Stockholm 1978.

Fagerlund G. Kapitel 28, Högpresterande betong. Ur "Betonghandbok Material. Utgåva 2", Svensk byggtjänst och Cements AB, Stockholm, 1994.

Fagerlund G. Undersökningar av den inre frostbeständigheten hos högpresterande betong. Avd byggnadsmaterial, LTH, Intern Rapport M2:06, 1997.

Fagerlund G & Yang Q. Moisture conditions in high performance concrete stored in water or salt solution for 20 months. Avd byggnadsmaterial, LTH, Intern Rapport M2:08, 1998.

Giaccio G, Rocco C, Violini D, Zappitelli J & Zerbino R. High-strength concrete incorporating different coarse aggregate. ACI Materials Journal, May-June, 1992.

Hagpassand A. Brottmekaniska parametrar hos normal och högpresterande betong. Avd Byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-5024, 1992.

Hassanzadeh M. Studier av ballast- och vidhäftningsegenskaper. Val av ballastmaterial för fortsatta arbeten. Avd byggnadsmaterial, LTH, Intern Rapport M4:05, Lund 1994.

Hassanzadeh M. Brottsighet hos högpresterande betong. Avd byggnadsmaterial, LTH, Intern Rapport M4:06, 1998.

Hillerborg A. Materialbrott. Avd byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-3004, Lund 1977.



Johansson L. Kapitel 3, Ballast. Ur "Betonghandbok Material, Utgåva 2", Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm 1994.

Lagerblad, B. Högpåresterande betong mot kemiska angrepp. CBI, Högpåresterande Betong, Slutrapport M3, 1996.

Langseth L. Materialteknik och produktionsteknik för högpåresterande lättballastbetong. Litteraturstudie. CBI, Högpåresterande Betong, Intern Rapport LG:1, 1993.

Mehta P K & Aitcin P C. Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for High-strength concrete. Ingår i Heston, W T (editor) "High Strength Concrete", ACI Special Publication SP121-14, 1990.

Mindess S. Materials selection, proportioning and quality control. Ingår i Shah S P & Ahmad S H (editors) "High Performance Concretes and Applications", Edward Arnold, London, 1994.

Nordström K & Fagerlund G. Mätningar av inre frostbeständigheten hos betong som lagrats under ca 18 månader i vatten eller 3% NaCl-lösning. Avd byggnadsmaterial, LTH, Intern Rapport M2:07, 1998.

Parrott L J. The production and properties of high-strength concrete. Concrete, 1969(3):11.

Persson B. PM angående gjuterfarenheter med riksreceptet enligt internrapport P5:1. Avd. Byggnadsmaterial, LTH, Rapport M6:09, 1993.

Persson B. Datorprogrammet "PROPH 2.0". Avd. byggnadsmaterial, LTH, Lund, 1995.

Persson B. Ideal partikelfördelning i färsk betong. Betong Nr 3, September 1995.

Scrivener K L, Bentur A & Pratt P L. Quantitative characterization of the transition zone in high strength concretes. Advances in Cement Research, 1988(1):4.

Smeplass S. Materialutvikling Höyfast Betong. Effekt av tilslagstypen på betongens trykkfasthet og E-modul., SINTEF Rapport STF70 A92051, Trondheim., 1992.