



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R39:1987**

## **Separation i betong**

**Sammansättning, kapillär uppsugning  
och frostbeständighet i olika djup av  
bordsvibrerade plattor**

**Juhan Aavik  
Tomas Kutti  
Mats Rodhe**

*R  
Aavik*

INSTITUTET FÖR  
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac

*Ser*

**Byggeforskningsrådet**

R39:1987

SEPARATION I BETONG

Sammansättning, kapillär uppsugning  
och frostbeständighet i olika djup  
av bordsvibrerade plattor

Juhan Aavik  
Tomas Kutti  
Mats Rodhe

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 830910-4  
från Statens råd för byggnadsforskning till CTH, Avdel-  
ningen för byggnadsmaterial, Göteborg.

## REFERAT

Fördelningen av samtliga delkomponenter genom tvärsnitt av hårdnande betongplattor har bestämts. Skivor från fyra olika djup av plattorna studerades. Samband mellan betongsammansättningen i dessa skivor och resultat från kapillaritets- och frystester analyserades. I arbetet visas att även måttlig separation i hög grad påverkar beständighetsegenskaperna.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R39:1987

ISBN 91-540-4720-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1987

## INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	3	
1	INTRODUKTION	3
2	FÖRSÖKSPROGRAM	4
3	FÖRSÖKSBETINGELSER	5
3.1	Delmaterial	5
3.2	Betongproportionering	6
3.3	Gjutning av betong	6
3.4	Uttagning och preparering av prov- kroppar	7
3.5	Provningsförfaranden	9
3.6	Analysmetodik	8
4	RESULTAT OCH ANALYS	10
4.1	Sammansättning och tryckhållfasthet	10
4.2	Separation i platta	11
4.3	Motståndstal - separation	14
4.4	Frostbeständighet - separation	15
5	SLUTSATSER OCH KOMMENTARER	17
LITTERATUR	18	
BILAGA 1	19	
BILAGA 2	30	



## SAMMANFATTNING

Fördelningen av samtliga delkomponenter genom tvärsnitt av hårdnade betongplattor har bestämts. Analysen baseras på känd betongsammansättning och resultat från cementhaltsbestämning och kapillär-sugningsförsök. I arbetet visas att även måttlig separation i hög grad påverkar beständighetsegenskaperna.

## 1 INTRODUKTION

Separation av delmaterial i betong uppstår till följd av gravitationskraftens inverkan på delkomponenterna i den färska betongmassan. Den uppkomna heterogeniteten innebär ökade egenskapsvariationer och därmed större svårigheter att bedöma material-egenskaperna i olika delar av konstruktionen.

Separationens storlek är beroende av betongens konsistens, sammansättning och använt kompakteringsförfarande. Ökad vattenhalt i syfte att uppnå lösare konsistens gör betongen mer separationsbenägen. Ballastens volymandel, maximala stenstorlek och kornstorleksfördelning är storheter som samtliga påverkar separationen [1]. Kompakteringsförfarandet bör väljas sådant att god komprimering med minsta möjliga separation erhålles.

Tillsats av flytmedel är i regel mer gynnsamt ur separationssynpunkt än en ökning av vattenhalten till motsvarande konsistens [2]. Med flytmedel kan vattenhalten hållas så pass låg att betong med mycket lös konsistens är gjutbar utan alltför kraftig separation [2][3]. Separationens inverkan på betongegenskaperna i färdig konstruktion har ej analyserats. Det kan bero på svårigheter att på ett tillförlitligt sätt bestämma vattencementtalet hos hårdnad betong, vilket är av avgörande betydelse för de flesta egenskaper.

I föreliggande arbete presenteras en analysmetodik anpassad till att bestämma fördelningen av samtliga delkomponenter i hårdnad betong. Då denna är känd kan även fördelningen av vattencementtal och vattenluftcementttal uppskattas. Detta medför att separationens inverkan på betongegenskaperna bättre kan bedömas. Med denna metod analyseras delkomponenternas fördelning i bordsvibrerade laboratorietillverkade plattor. Samband mellan separation och resultat från kapillaritets- och frystester utförda på 4 olika skikt i plattorna diskuteras. Provningsarna utfördes på ett begränsat antal provkroppar från 6 olika blandningar av normal- och flytbetong.



## 2 FÖRSÖKSPROGRAM

Undersökningen omfattade två försöksserier, serie N och L, med vardera tre stycken betongblandningar. Blandningarna betecknas enligt följande:

Serie N: Ej lufttillsatt betong

- NN - trögflytande konsistens, normalbetong
- NA - flytande konsistens, flytbetong A
- NB - flytande konsistens, flytbetong B

Serie L: Lufttillsatt betong

- LN - trögflytande konsistens, normalbetong
- LA - flytande konsistens, flytbetong A
- LB - flytande konsistens, flytbetong B

Av varje blandning tillverkades 3 st standardkuber, 15 cm, och 1 st platta 60x60x10 cm. Provingarna omfattade

- bestämning av betongens konsistens, lufthalt och densitet samt normenlig tryckhållfasthet (kubhållfasthet) vid 28 dygns ålder.
- bestämning av tryckhållfasthet på utborrade cylindrar från plattorna vid 28 dygns ålder.
- bestämning av betongens cementmängd i olika djup av plattorna.
- kapillärsugningsförsök för bestämning av betongens kapillära porositet och motståndstal i olika djup av plattorna.
- frysöversikt för bedömning av betongens frostbeständighet i olika djup av plattorna.



### 3 FÖRSÖKSBETINGELSER

#### 3.1 Delmaterial

##### Bindemedel

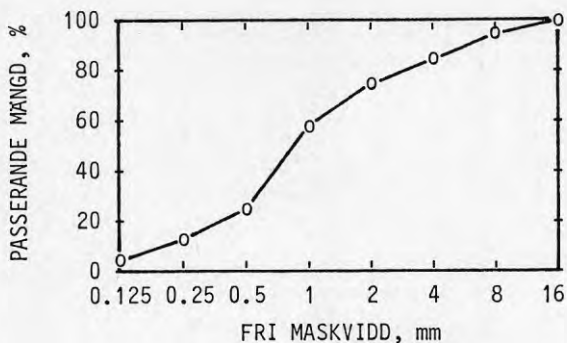
- Std portlandcement, Skövde (levererad i feb 1981).

##### Ballastmaterial

- Gjutgrus 0-8 mm. Finhetsmodul 2.99. Siktkurva se figur 1.
- Makadam 8-16 mm. Finhetsmodul 6.51.

##### Tillsatsmedel

- Luftporbildare, tensid
- Flytmedel A, melamin
- Flytmedel B, naftalen



Figur 1 Siktkurva för gjutgrus 0-8 mm, FM = 2.99.

### 3.2 Betongproportionering

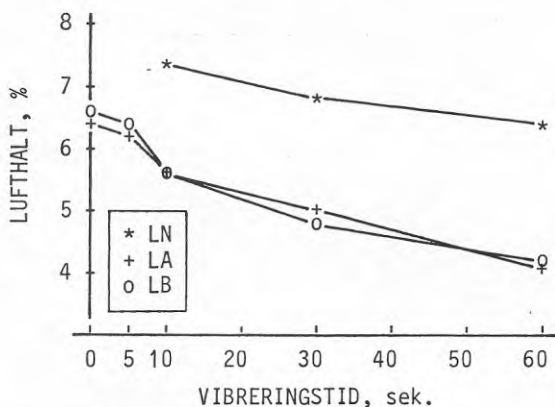
Normalbetong NN och LN i serie N resp. L proportionerades för trögflytande konsistens och hållfasthetsklass K30. Flytbetong erhöles genom att till normalbetongblandningarna tillsätta flytmedel A respektive B i sådan mängd att betongmassans sättmätt blev 20 cm.

Den totala finmaterialmängden (cement + ballast <0,25 mm) i serie N och L var 460 resp. 470 kg/m<sup>3</sup> betong. Stenhalten (ballast >4 mm) var 44 resp. 46%. Rekommenderad minsta finmaterialmängd och högsta stenhalt för intern transport av flytbetong på byggplats är 400 kg/m<sup>3</sup> resp 45% [4]. Satsrecepten visas i bilaga 1.

### 3.3 Gjutning av betong

Blandningen utfördes i satser om 200-260 liter i en 300 liters betongblandare. Normalbetong blandades 5 minuter och flytbetong 5+3 minuter.

Gjutna kuber och plattor vibrerades på vibrobord. Vibreringstiden valdes sådan att små lufthaltsförluster erhöles - 20 sekunder för normalbetong och 5 sekunder för flytbetong. Se figur 2.

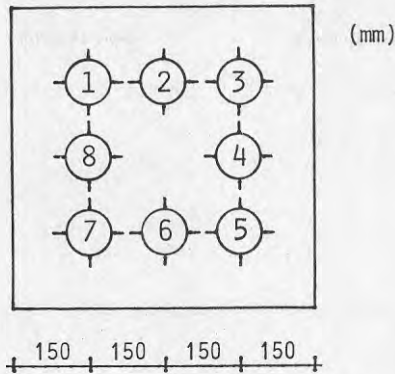


Figur 2 Erhållen lufthalt vid olika vibreringstider. Bordsvibrerad betong med trögflytande konsistens (LN) och flytande konsistens (LA, LB). Lufthalten bestämd enligt SS 13 71 11.

Kuberna och plattorna härdades under första dygnet under våt säckväv, dygn 2-5 i vatten och därefter i klimatrums +20°C, RH 50%.

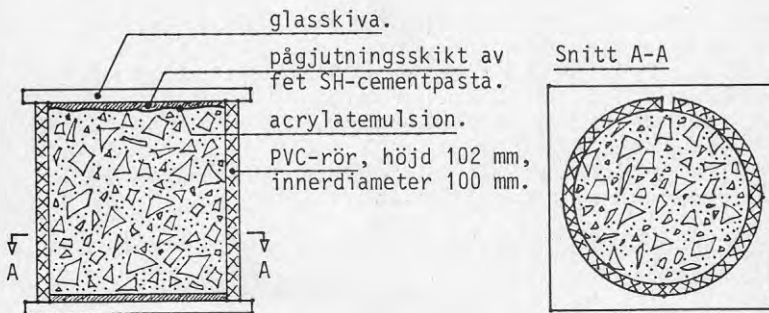
### 3.4 Uttagning och preparering av provkroppar

Ur varje platta borrades 8 st cylindrar med diametern 10 cm. Utborrningen ägde rum 14 dygn efter gjutning. Plan över cylindrarnas lägen i plattan anges i figur 3.



Figur 3 Plan med beteckningar av utborrade cylindrar ur platta 60x60x10 cm.

Cylindrarna nr 1,3,5 och 7 användes för tryckhållfasthetsbestämning. Ändytorna preparerades för planparallellitet med hjälp av ett tunnt cementpastaskikt. För att säkerställa vidhäftningen mellan ändyta och pågjutningsskikt penslades acrylatemulsion i fogen, se figur 4.



Figur 4 Principskiss för preparering av cylindrarna nr 1,3,5 och 7 för tryckhållfasthetsbestämning.

Cylindrarna nr 2,4,6 och 8 delades i 4 st skivor med höjden 20-22 mm. Före delningen bortsågades det yttre skiktet (2-4 mm) från ändytorna. Skivor från cylindrarna nr 2 och 6 användes för cementmängdsbestämning och skivor från cylindrarna nr 4 och 8 för kapillärsugnings- resp. frystest. Se figur 5.

<u>Cementmängdsbestämning</u>		<u>Kap.sugn.test</u>	<u>Frystest</u>
Cylinder nr 2	Cylinder nr 6	Cylinder nr 4	Cylinder nr 8
skiva I	I	Δ I	Δ I
skiva II	II	Δ II	Δ II
skiva III	III	Δ III	Δ III
skiva IV	IV	▽ IV	▽ IV

Figur 5 Beteckningar av skivor från cylindrarna nr 2,4,6 och 8. Δ anger provad yta.

Efter preparering förvarades cylindrar för tryckhållfasthetsbestämning i klimatrum, +20°C, RH 50%. Skivor för cementmängdsbestämning och kapillärsugningstest förvarades i förslutna plastpåsar och skivor för frystest i vatten.

### 3.5 Provningsförfaranden

#### Cementmängdsbestämning i hårdnad betong:

Provningarna baseras på en metod beskriven i [5]. Genom att upplösa cementpastafasen hos uttorkad betong med utspädda lösningar av saltsyra och natriumhydroxid kan andelen cementpasta i betongen bestämmas. Glödförlustbestämning av betongen medför att cementmängden kan bestämmas. (I okarbonatiserad betong utgörs glödförlusten huvudsakligen av det kemiskt bundna vattnet varför cementets hydrationsgrad då bör kunna bedömas.)

Vid försöken modifierades metoden ovan enligt följande:

- Använd provmängd ca 600 gram i stället för rekommenderad mängd 2.4 kg.
- Ingen glödförlustbestämning. Hydrationsgraden antages vara lika genom plattans tvärsnitt.

### Kapillärsugnings- och frystest:

Provningarna utfördes enligt metoder tidigare beskrivna i [6]. Vid kapillärsugningsförsöken placeras konditionerade provkroppar (RH 50%) med ena ändytan i vatten. Proverna vägs efter vissa tidsintervall och uppsuggen vattenmängd plottas mot kvadratroten ur tiden. Frys-försöken utförs med ena ändytan nedsänkt i 3%-ig natriumkloridlösning. Nedfrysning och upptining sker cykliskt i luft. Avskalad mängd material bestämdes efter 14 fryscyklar.

Samtliga provningar enligt 3.5 påbörjades vid 2-3 månaders provkroppsalder.

### 3.6 Analysmetodik

Vid analys av betongsammansättningen utnyttjas resultat från dels cementmängdsbestämningsförsöken och dels kapillärsugningsförsöken. Andelen cement, ballast, ballastens kornfördelning och vattenluftcementtalet fås ur den förra och vattencementtalet ur den senare. Vid kapillärsugningsförsöken antas de valda konditioneringsbetingelserna medföra att den uppsugna vattenvolymen motsvaras av betongens kapillärporvolym (inklusive kontraktionsporer), varvid vattencementtalet kan beräknas ur sambandet  $W_a = C(v_{ct} - 0.3375\alpha)$ . Lufthalten fås ur värdena på vattenluftcementtal, cementmängd och vattencementtal.

Vid analys av delmaterialens separation antages att materialsammansättningen och delmaterialens separation är lika för samtliga cylindrar från samma platta. Resultat från de utsågade cylinderskivornas sammansättning sammanställs och delmaterialens fördelning genom tvärsnittet beräknas. Beräkningarna visas i bilaga 1A.

För uppskattning av betongsammansättningen i varje enskilt skikt korrigeras samtliga försöksvärden så att medelvärdena för sammansättningarna hos de fyra skivorna genom plattans tvärsnitt överensstämmer med satsens totala sammansättning. Beräkningarna visas i bilaga 1B.

## 4 RESULTAT OCH ANALYS

## 4.1 Sammansättning och tryckhållfasthet

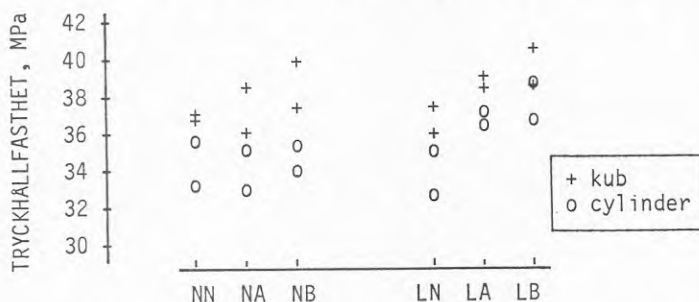
Betongsammansättningarna baserat på siktanalys, delmaterialens densitet, satsrecept och uppmätt lufthalt visas i bilaga 1. För analys av stenseparationen är ballastmaterialet uppdelat i ballast större än 2 mm och ballast mindre än 2 mm.

Uppmätt tryckhållfasthet på normkuber och utborrade cylindrar visas i tabell 1.

Tabell 1 Tryckhållfasthet och densitet för kuber (15 cm) och utborrade cylindrar (diameter 10 cm, höjd 10 cm) provade efter 28 dygn. Varje resultat utgör medelvärde av 3 respektive 4 provkroppar.

Btg	Tryckhållfasthet MPa		Densitet Kg/m <sup>3</sup>	
	Kub	Cylinder	Kub	Cylinder
NN	36.8	34.4	2329	2327
NA	37.0	34.1	2348	2360
NB	38.6	34.8	2338	2335
LN	36.5	34.3	2255	2258
LA	38.7	36.7	2268	2264
LB	39.5	37.7	2282	2282

Från tabellen ovan framgår att samtliga betongblandningar var av hållfasthetsklass K30, (motsvarande medelkubhållfasthet på 37 MPa). Cylinderhållfastheten var 5-10% lägre än kubhållfastheten. Spridningen vid provningarna visas i figur 6.



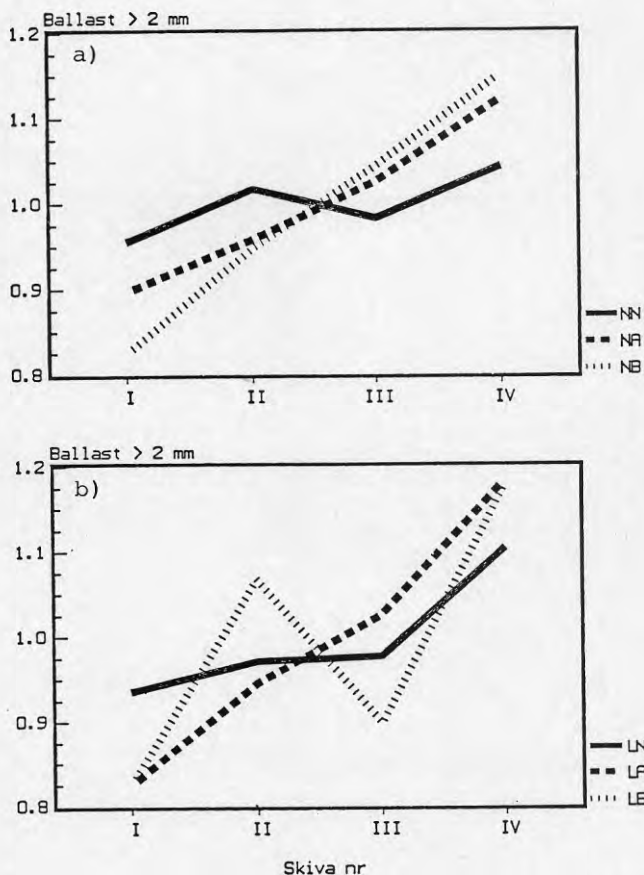
Figur 6 Största och minsta tryckhållfasthetsvärde vid kub- och cylinderprovning av betong.



## 4.2 Separation i platta

Delmaterialens fördelning genom plattorna (skiva I - IV) visas i bilaga 1A. Ur beständighetssynpunkt har stenseparationen samt variationerna i lufthalt och vattencementtal bedömts som speciellt intressanta. Dessa visas i figurerna 7, 8 respektive 9. Med diagrammen i figurerna avses att ange tendenser för materialvariationerna genom plattans tvärsnitt. Avvikelser från dessa tendenser kan förklaras med lokala variationer i betongsammansättning och den begränsade provmaterialmängden, se 3.5.

Separation av grovballast i betongen visas i figur 7.

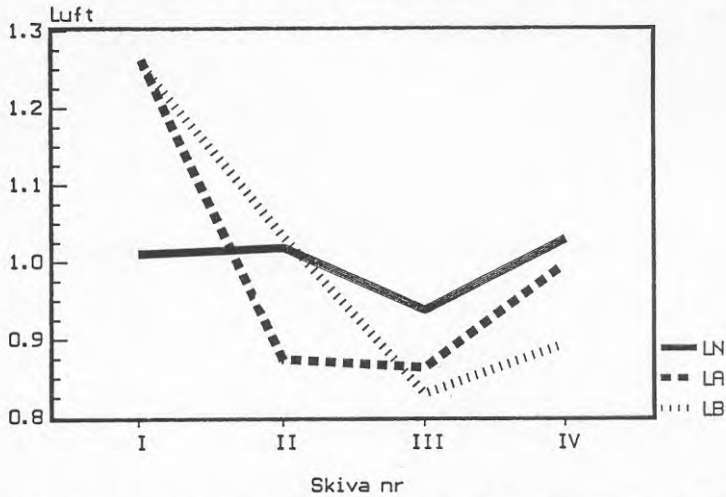


Figur 7 Andel ballast större än 2 mm i fyra olika djup i plattan. Relativa värden.  
 a) Ej lufttillsatt betong - serie N  
 b) Lufttillsatt betong - serie L



- Figuren ovan visar att
- andelen grovballast ökar med ökat djup i plattan.
  - stenseparationen i flytbetong är betydligt kraftigare än i normalbetong.

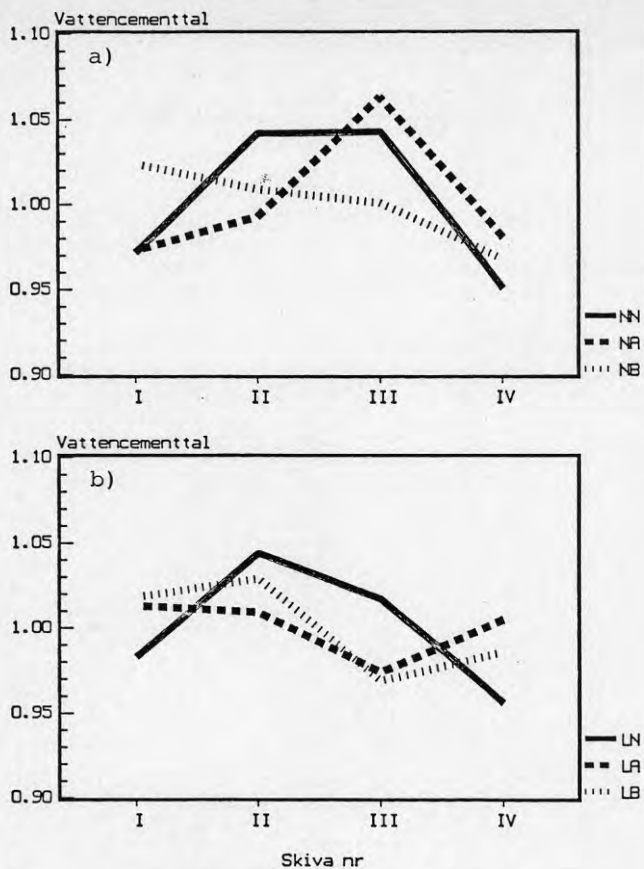
Separation av luft i bruksfasen visas i figur 8.



Figur 8 Andelen luft i betongens bruksfas i fyra olika djup i plattan. Relativa värden. Plattor av lufttillsatt betong - serie L

- Figuren ovan visar att
- lufthalten i bruket för normalbetong är tämligen konstant genom hela plattan.
  - lufthalten i bruket för flytbetong är mycket förhöjd i plattans övre skikt (skiva I) men tämligen konstant genom resten av plattan.

Variationer i vattencementtal visas i figur 9.



Figur 9 Vattencementtal bestämt i fyra olika djup i plattan.

- a) Ej lufttillsatt betong - serie N  
b) Lufttillsatt betong - serie L

Figuren ovan visar att

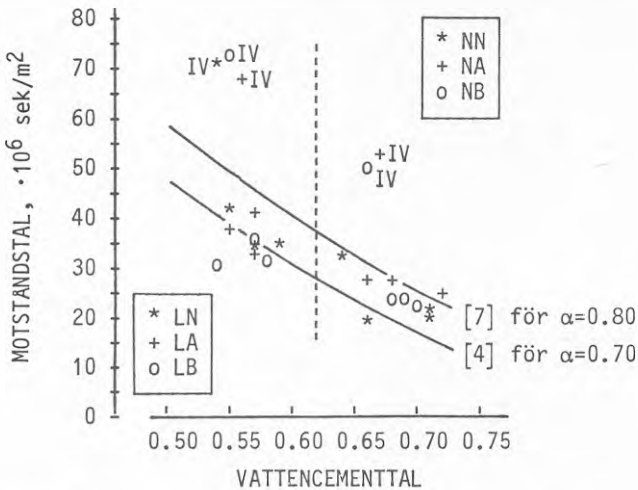
- vattencementtalet tenderar att minska med ökat djup i plattan.
- vattencementtalet för normalbetong (NN, LN) är lågt i översta skiktet. Detta kan förklaras med blödning [2].

#### 4.3 Motståndstal - separation

Motståndstalen för de provade skivorna visas i bilaga 2. Från denna framgår att motståndstalet i plattornas undre del (skiva IV) är 50-100 % högre än i någon annan del av plattorna. Skillnaden i motståndstal mellan normalbetong och flytbetong är liten.

Motståndstalet bestäms vid kapillärsugningstest och fås ur tiden för vattenfronten att nå provkroppens överyta. Talet beror huvudsakligen på kapillärernas finhet. Ju lägre vattencementtal desto finare kapillärer och desto högre motståndstal.

I figur 10 har motståndstalen i serie N och L plottats mot vattencementtalen. (Luftporerna i serie L anses ej påverka uppsugningsförloppet [7].)



Figur 10 Samband mellan erhållna motståndstal och vattencementtal för skivor från olika djup av betongplattor ur serie N och L.

Figuren ovan visar att försöksresultaten för skivorna I, II och III samt skiva IV från betong NN överensstämmer väl med i litteraturen angivna samband mellan motståndstal och vattencementtal [4] [7]. Motståndstalet för övriga skivor IV avviker kraftigt från givna samband. Avvikelsen beror troligen på den förhållandevis stora stenandelen i dessa skivor, se figur 7. Ökad stenmängd kan medföra att den "ekvivalenta" stighöjden ökar och att tiden för vattenfronten att nå provkroppens överyta förlängs.

#### 4.4 Frostbeständighet - separation

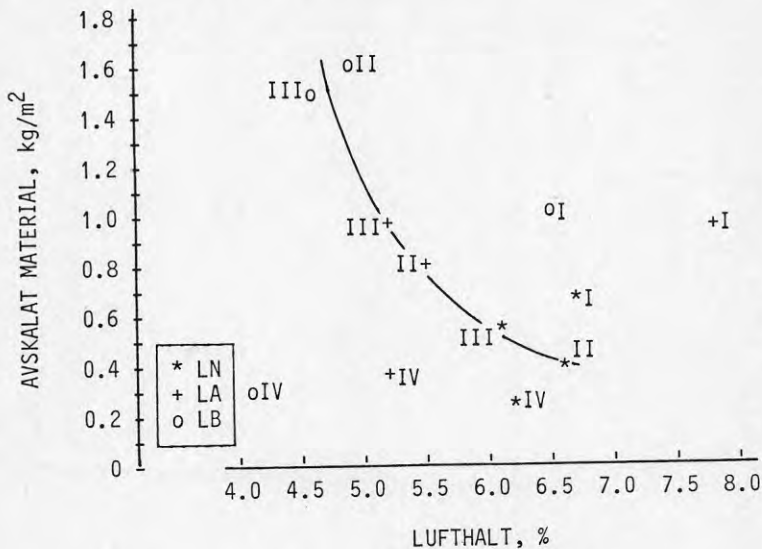
Avskalat material vid frystester av de provade skivorna visas i bilaga 2. Från denna framgår att mängden avskalat material i samtliga fall är betydligt lägre för skiva IV än för övriga. Skillnaden i avskalning mellan normalbetong och flytbetong i serie L är liten för skiva IV men stor för övriga skivor.

Frostbeständigheten är en funktion av betongens lufthalt, luftporernas fördelning och betongens vattencementtal. Enligt BBK 79 skall följande krav vara uppfyllda för betong i måttligt aggressiv miljö:

- Hållfasthetsklass lägst K30
- Lufthalt större än 5% vid maximal stenstorlek 16 mm
- Vattencementtal högst 0.60.

För betongblandningarna i serie L är samtliga dessa krav uppfyllda.

I figur 11 har mängden avskalat material för skivor i serie L plottats mot lufthalten.



Figur 11 Samband mellan mängd avskalat material (14 fryscyklar) och provskivans lufthalt. Frysförsök utförda på skivor från olika djup av betongplattor i serie L.

Figuren ovan visar ett entydigt samband mellan avskalat material och lufthalt för skivor uttagna i plattornas mittdelar (skivor betecknade II och III). För dessa skivor ökar avskalningen kraftigt då lufthalten understiger 5-6%.

Sambandet ovan gäller inte för skivor ur plattornas övre (I) och undre del (IV). Skivorna I har hög avskalning i förhållande till lufthalten. Motsatt förhållande råder för skivorna IV. Den troligaste orsaken till dessa avvikelser är skillnader i luftporernas storlek och fördelning. Vid vibrering vandrar större porer uppåt. Sammanslagning sker med mindre porer. Det övre skiktet kommer att påverkas mest och få hög lufthalt men ogynnsam porstorleksfördelning. Vid vibreringen ökar andelen grovballast i undre skiktet. Rörligheten hos porerna i detta skikt minskar vilket medför mindre benägenhet till sammanslagning och separation av finare porer. Såväl separationen av grov luft som stensegregationen bidrar till att undre skiktet får en lägre lufthalt men en mer gynnsam porstorleksfördelning.

En ytterligare bidragande orsak till skillnaderna i avskalning mellan plattans övre och undre del är minskningen i vattencementtal med ökat djup i plattan. Minskningen är måttlig och lika stor för normal- som för flytbetong, se figur 9, varför den inte ensamt kan förklara den stora skillnaden i frostbeständighet.

## 5 SLUTSATSER OCH KOMMENTARER

- 1) Försöken gav entydiga och rimliga resultat vad avser delmaterialens fördelning (separation) i tvärsnittet av en hårdnad betongplatta.
  - förhöjd lufthalt i plattans övre del
  - förhöjd grovballastandel i plattans undre del
  - en tendens till minskning av vattencementtalet med ökat djup i plattan
  - en klar ökning av luft- och grovballastseparationen i flytbetong
- 2) Separation av delkomponenterna påverkar i hög grad beständighetsegenskaperna i plattans olika delar. Detta gäller för såväl normal- som flytbetong men speciellt för flytbetong.
  - Motståndstalet och frostbeständigheten i plattans undre del var betydligt högre än i någon annan del av tvärsnittet.
  - Skillnaden i frostbeständighet mellan normalbetong och flytbetong var liten i plattans undre del men stor i övriga delar.
- 3) Den stora skillnaden i motståndstal och frostbeständighet mellan plattans olika delar kan ej endast förklaras med skillnader i vattencementtal. Grovballastens och luftporernas fördelning tycks ha en avgörande inverkan på dessa egenskaper.
  - Stor grovballastandel fördröjer vattnets inträngning i hårdnad betong. Orsaken härtill kan vara en ökning av den "ekvivalenta" stighöjden för vattentransport i bruksfasen.
  - Luftporernas rörlighet reduceras vid ökad grovballastandel. Luftporerna förhindras därmed från att slås samman och bilda en ur frostbeständighetssynpunkt ogynnsam luftporstruktur.

## LITTERATUR

- [1] Sidky M, Legrand C, Barrioulet M. Influence de la concentration en granulats et du temps de vibration sur la segregation interne dans le beton frais. Materials and structures, No 83, sep-oct 1981.
- [2] Lukas W. Segregation tendency of concrete compounded with superplasticisers. 4. Simposio internacional sobre tecnologia del concreto/ superplasticantes, p 295-310, Spain.
- [3] Johansson A. Flytbetong - egenskaper, arbetsteknik och användningsmöjligheter, CBI re-search 1:79.
- [4] Betonghandbok, Material. Svensk Byggtjänst, 1980.
- [5] Iken H, Lackner R, Zimmer U. Handbuch der Betonprüfung, 2. Auflage. Beton Verlag, Düsseldorf, 1977.
- [6] Aavik J, Kutti T, Rodhe M. Flytbetong med silica - kapillärsugning och frostbeständighet. Byggeforskningsrådet, Rapport R66:1985.
- [7] Fagerlund G. On the capillarity of concrete. Nordic Concrete Research, Publication no 1, Nordic Concrete Federation, 1982.



## BILAGA 1

## A. DELKOMPONENTERNAS FÖRDELNING GENOM TVARSNITTET

## INGANGSDATA FÖR BETONGBLANDNINGARNA

Delmaterialens densitet

Densitet cement (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>C</sub> = 3200	Antaget värde
Densitet ballast (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>A</sub> = 2700	Antaget värde

Mängd ballast < 2 mm

Serie N	Y <sub>2N</sub> = 48%
Serie L	Y <sub>2L</sub> = 46%

Hydratationsgrad

Serie N	$\alpha = 0.8$	Antaget värde
Serie L	$\alpha = 0.7$	Antaget värde

## INGANGSDATA FÖR PROVSKIVORNA

Kapillär porositet erhållna från kapillärsugningsförsök

## Kapillär porositet

Btg	p (%)			
	I	II	III	IV
NN	12.2	12.3	12.2	10.9
NA	12.8	12.6	12.5	10.9
NB	13.6	12.8	12.2	10.8
LN	10.9	11.3	11.1	9.1
LA	11.5	11.7	11.0	9.6
LB	12.3	11.4	11.2	9.6

Densitetsbestämning  
( 2 st provskivor )

Vikt, våta skivor

Btg	M <sub>SL</sub> (g)				
		I	II	III	IV
NN	855.5	831.7	835.8	889.1	
NA	922.7	855.2	853.5	933.5	
NB	818.3	844.8	853.0	1039.3	
LN	785.9	815.2	814.2	890.5	
LA	781.9	806.5	823.2	902.4	
LB	792.7	829.4	831.9	971.9	

Vikt under vatten, våta skivor

Btg	M <sub>SW</sub> (g)				
		I	II	III	IV
NN	493.4	479.9	480.6	516.6	
NA	533.7	497.0	497.9	553.3	
NB	467.5	487.0	495.7	608.2	
LN	440.2	455.9	457.5	508.0	
LA	435.4	455.4	468.0	519.2	
LB	443.3	472.6	475.3	564.5	

Vikt, torra skivor

Btg	M <sub>S</sub> (g)				
		I	II	III	IV
NN	799.5	778.5	781.8	836.6	
NA	863.5	802.5	802.3	887.2	
NB	759.2	788.4	799.4	979.7	
LN	737.5	766.0	766.0	843.8	
LA	730.0	759.0	776.8	857.0	
LB	740.3	781.6	784.1	923.2	

Upplösning av cementpasta  
( ca 1,5 st provskivor )

Vikt material före upplösning

Btg	M <sub>B</sub> (g)				
		I	II	III	IV
NN	574.8	561.9	583.5	620.0	
NA	680.9	589.4	578.7	650.2	
NB	560.2	566.8	599.0	736.3	
LN	529.6	561.6	553.9	632.6	
LA	552.5	558.0	556.0	560.9	
LB	559.3	589.8	571.0	699.6	

Vikt material efter upplösning

Btg	M <sub>A</sub> (g)				
		I	II	III	IV
NN	470.3	470.6	489.1	517.2	
NA	553.8	485.8	489.1	553.2	
NB	455.0	466.0	497.6	621.4	
LN	427.4	460.1	451.8	528.9	
LA	447.5	452.3	452.0	476.0	
LB	447.3	485.8	461.8	591.7	

Vikt material > 2 mm efter upplösning

Btg	M <sub>A2</sub> (g)				
		I	II	III	IV
NN	228.2	236.7	238.8	264.1	
NA	243.8	223.1	232.8	276.9	
NB	170.1	194.2	222.3	296.5	
LN	196.8	216.9	213.7	268.4	
LA	180.3	203.6	217.4	247.4	
LB	171.2	225.7	183.3	285.5	

## BERÄKNINGAR

Densitetsbestämning  
( 2 st provskivor )

## Volym

Btg	$V_s$	(1)			
		I	II	III	IV
NN	0.362	0.352	0.355	0.373	
NA	0.389	0.358	0.356	0.380	
NB	0.351	0.358	0.357	0.431	
LN	0.346	0.359	0.357	0.383	
LA	0.347	0.351	0.355	0.383	
LB	0.349	0.357	0.357	0.407	

$$V_s = M_{sL} - M_{sW}$$

## Densitet

Btg	$D_s$	(kg/m <sup>3</sup> )				$D_{sM}$
		I	II	III	IV	
NN	2208	2213	2201	2246	2217	
NA	2220	2240	2256	2334	2263	
NB	2164	2203	2237	2273	2222	
LN	2133	2132	2147	2206	2156	
LA	2107	2162	2187	2236	2175	
LB	2119	2191	2199	2266	2196	

$$D_s = M_s / V_s$$

$$D_{sM} = \Sigma (D_s \cdot V_s) / \Sigma D_s$$

Upplösning av cementpastan  
( ca 1,5 st provskivor )

Provvoly m

Btg	$V_B$	(1)			
		I	II	III	IV
NN	0.260	0.254	0.265	0.276	
NA	0.307	0.263	0.256	0.279	
NB	0.259	0.257	0.268	0.324	
LN	0.248	0.263	0.258	0.287	
LA	0.262	0.258	0.254	0.251	
LB	0.264	0.269	0.260	0.309	

$$V_B = M_B / D_S$$

Cement

Btg	$C_B$	(kg/m <sup>3</sup> )				$C_{BM}$
		I	II	III	IV	
NN	334	300	297	310	310	
NA	345	328	291	290	314	
NB	339	327	316	296	318	
LN	350	328	337	308	330	
LA	341	348	348	288	330	
LB	361	329	358	297	335	

$$C_B = (M_S - M_A) / (1 + 0.25\alpha) / V_B$$

$$C_{BM} = \Sigma (C_B \cdot V_S) / EV_S$$

Ballast totalt

Btg	$A_B$	(kg/m <sup>3</sup> )				$A_{BM}$
		I	II	III	IV	
NN	1807	1853	1845	1874	1845	
NA	1805	1847	1907	1985	1886	
NB	1758	1812	1859	1918	1841	
LN	1722	1747	1752	1844	1768	
LA	1707	1752	1778	1898	1786	
LB	1695	1804	1778	1917	1803	

$$A_B = M_A / V_B$$

$$A_{BM} = \Sigma (A_B \cdot V_S) / EV_S$$

Vattenluftcementtal

Btg	$VLCT_B$				
		I	II	III	IV
LN	0.72	0.76	0.73	0.72	
LA	0.77	0.69	0.67	0.72	
LB	0.72	0.70	0.64	0.66	

$$VLCT_B = 1000 (1 - A_B / D_A - C_B / D_C) / C_B$$

Ballast &gt; 2 mm

Btg	$A_{B2}$ (kg/m <sup>3</sup> )				$A_{B2M}$
	I	II	III	IV	
NN	877	932	901	957	917
NA	795	848	908	994	886
NB	657	755	830	915	796
LN	793	823	828	936	847
LA	687	789	855	986	833
LB	649	838	706	925	785

$$A_{B2} = M_{A2} / V_B$$

$$A_{B2M} = \Sigma (A_{B2} \cdot V_S) / \Sigma V_S$$

Vattencementtal

Btg	$VCT_B$				$VCT_{BM}$
	I	II	III	IV	
NN	0.63	0.68	0.68	0.62	0.65
NA	0.64	0.65	0.70	0.65	0.66
NB	0.67	0.66	0.66	0.64	0.66
LN	0.55	0.58	0.57	0.53	0.56
LA	0.57	0.57	0.55	0.57	0.57
LB	0.58	0.58	0.55	0.56	0.57

$$VCT_B = 10p / C_B + 0.3375\alpha$$

$$VCT_{BM} = \Sigma (VCT_B \cdot V_S \cdot C_B) / \Sigma (V_S \cdot C_B)$$

Lufthalt i bruket

Btg	$L_{BRB}$ (%)				$L_{BRBM}$
	I	II	III	IV	
LN	9.0	9.2	8.3	8.8	8.8
LA	9.4	6.2	6.1	6.8	7.1
LB	6.8	5.2	4.8	4.7	5.3

$$L_{BRB} = (VLCT_B - VCT_B) \cdot C_B / (10 \cdot (1 - A_B / D_A))$$

$$L_{BRBM} = \Sigma (L_{BRB} \cdot V_S) / \Sigma V_S$$

## Fördelning av delkomponenter genom tvärsnittet

Ballast &gt; 2 mm

Btg	$F_{A2}$				$F_{A2M}$
	I	II	III	IV	
NN	0.96	1.02	0.98	1.04	1.00
NA	0.90	0.96	1.02	1.12	1.00
NB	0.83	0.95	1.04	1.15	1.00
LN	0.94	0.97	0.98	1.10	1.00
LA	0.82	0.95	1.03	1.18	1.00
LB	0.83	1.07	0.90	1.18	1.00

$$F_{A2} = A_{B2} / A_{B2M}$$

$$F_{A2M} = \Sigma (V_S \cdot F_{A2}) / \Sigma V_S$$

Vattencementtal

Btg	$F_{VCT}$				$F_{VCTM}$
	I	II	III	IV	
NN	0.97	1.04	1.04	0.95	1.00
NA	0.97	0.99	1.06	0.98	1.00
NB	1.02	1.01	1.00	0.97	1.00
LN	0.98	1.04	1.02	0.96	1.00
LA	1.01	1.01	0.97	1.00	1.00
LB	1.02	1.03	0.97	0.99	1.00

$$F_{VCT} = VCT_S / VCT_{SM}$$

$$F_{VCTM} = \Sigma (VCT_B \cdot V_S \cdot C_B) / \Sigma (V_S \cdot C_B)$$

Lufthalt i bruket

Btg	$F_L$				$F_{LM}$
	I	II	III	IV	
LN	1.02	1.04	0.94	1.00	1.00
LA	1.32	0.88	0.86	0.96	1.00
LB	1.27	0.98	0.90	0.88	1.00

$$F_L = L_{BRB} / L_{BRBM}$$

$$F_{LM} = \Sigma (V_S \cdot F_L) / \Sigma V_S$$



## B. BETONGSAMMANSÄTTNING GENOM TVÄRSNITTET

Analys av betongsatsernas sammansättning och densitet

## Satsrecept och uppmätt lufthalt

Btg	Delmaterial		(kg/sats)		Sats- volym $V_1$ (1)	Luft- halt $L$ (%)
	Cem $C_1$	Grus $G_1$	Sten $S_1$	Vatten $W_1$		
NN	76.0	309.0	165.0	51.5	255	1.8
NA	61.1	249.0	133.0	41.6	205	1.2
NB	61.1	249.0	133.0	41.6	205	1.5
LN	82.0	287.0	170.0	46.0	257	6.4
LA	65.7	232.0	137.0	36.8	206	5.9
LB	65.7	232.0	137.0	36.8	204	5.0

## Betongsammansättning och densitet

Btg	Delmaterial		(kg/m <sup>3</sup> )	Vct	Vlct	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	
	Cem $C_M$	Bal- last $A_M$	Vat- ten $W_M$	$VCT_M$	$VLCT_M$	Färsk $D_{FM}$	Hårdnad torr $D_{TM}$
NN	298	1856	202	0.68	0.74	2355	2213
NA	299	1867	203	0.68	0.72	2369	2225
NB	298	1861	203	0.68	0.73	2361	2218
LN	319	1776	179	0.56	0.76	2273	2150
LA	319	1790	179	0.56	0.75	2287	2164
LB	322	1807	180	0.56	0.72	2309	2185

$$\begin{aligned}
 C_M &= C_1 \cdot 1000 / V_1 \\
 A_M &= (G_1 + S_1) \cdot 1000 / V_1 \\
 W_M &= W_1 / V_1 \\
 VCT_M &= W_M / C_M \\
 VLCT_M &= VCT + L \cdot 10 / C_M \\
 D_{FM} &= C_M + A_M + W_M \\
 D_{TM} &= C_M + A_M + \alpha \cdot 0.25 \cdot C_M
 \end{aligned}$$

Korrektionsfaktorer

Btg	Densitet $K_D$	Cement $K_C$	Ballast $K_A$	Ballast > 2 mm $K_{A2}$
NN	0.9980	0.9588	1.0059	1.0414
NA	0.9833	0.9509	0.9898	1.1019
NB	0.9982	0.9365	1.0110	1.1968
LN	0.9974	0.9650	1.0045	1.0802
LA	0.9952	0.9646	1.0018	1.1094
LB	0.9947	0.9610	1.0021	1.1887

$$K_D = D_{TM}/D_{SM}$$

$$K_C = C/C_{BM}$$

$$K_A = A/A_{BM}$$

$$K_{A2} = (100 - Y_2) \cdot A_{BM} / (A_{B2M} \cdot 100)$$

Korrigerade värdenDensitet

Btg	D (kg/m <sup>3</sup> )				$D_M$
	I	II	III	IV	
NN	2204	2209	2197	2242	2213
NA	2183	2203	2219	2295	2225
NB	2160	2200	2233	2269	2218
LN	2128	2126	2142	2200	2150
LA	2097	2151	2177	2226	2164
LB	2108	2179	2187	2254	2185

$$D = K_D \cdot D_S$$

$$D_M = \Sigma(D \cdot V_S) / \Sigma V_S$$

Cement

Btg	C (kg/m <sup>3</sup> )				$C_M$
	I	II	III	IV	
NN	321	287	284	297	298
NA	328	312	277	276	299
NB	317	306	296	277	298
LN	338	316	325	297	319
LA	329	336	336	278	319
LB	347	316	344	286	322

$$C = K_C \cdot C_B$$

$$C_M = \Sigma(C \cdot V_S) / \Sigma V_S$$

## Ballast total

Btg	A (kg/m <sup>3</sup> )				A <sub>M</sub>
	I	II	III	IV	
NN	1817	1865	1856	1885	1856
NA	1787	1828	1888	1965	1867
NB	1777	1832	1879	1939	1861
LN	1729	1755	1760	1853	1776
LA	1710	1756	1781	1901	1790
LB	1698	1808	1782	1921	1807

$$A = K_A \cdot A_B$$

$$A_M = \Sigma (A \cdot V_S) / \Sigma V_S$$

## Ballast &gt; 2 mm

Btg	A <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )				A <sub>2M</sub>
	I	II	III	IV	
NN	913	971	938	996	955
NA	876	935	1000	1095	976
NB	786	904	994	1095	953
LN	856	889	895	1011	915
LA	763	875	949	1094	925
LB	771	997	839	1099	933

$$A_2 = K_{A2} \cdot A_{B2}$$

$$A_{2M} = \Sigma (A_B \cdot V_S) / \Sigma V_S$$

## Vattenluftcementtal

Btg	VLCT			
	I	II	III	IV
NN	0.71	0.76	0.79	0.70
NA	0.72	0.72	0.77	0.67
NB	0.77	0.74	0.72	0.71
LN	0.75	0.79	0.76	0.74
LA	0.80	0.73	0.70	0.75
LB	0.76	0.73	0.68	0.70

$$VLCT = 1000 \cdot (1 - C/D_C - A/D_A) / C$$

## Vattencementtal korrektion

Btg	VCT <sub>2</sub>				VCT <sub>2M</sub>	K <sub>VCT</sub>
	I	II	III	IV		
NN	0.65	0.70	0.70	0.64	0.67	1.0121
NA	0.66	0.67	0.72	0.67	0.68	1.0036
NB	0.70	0.69	0.68	0.66	0.68	0.9981
LN	0.56	0.59	0.58	0.54	0.57	0.9875
LA	0.59	0.58	0.56	0.58	0.58	0.9676
LB	0.59	0.60	0.56	0.57	0.58	0.9653

$$VCT_2 = p \cdot 10 / (C + 0.3375\alpha)$$

$$VCT_{2M} = \Sigma (V_S \cdot C \cdot VCT_2) / \Sigma (V_S \cdot C)$$

$$K_{VCT} = VCT_M / VCT_{2M}$$

## Vattencementtal

Btg	VCT				VCT <sub>M</sub>
	I	II	III	IV	
NN	0.66	0.71	0.71	0.64	0.68
NA	0.66	0.68	0.72	0.67	0.68
NB	0.70	0.69	0.68	0.66	0.68
LN	0.55	0.59	0.57	0.54	0.56
LA	0.57	0.57	0.55	0.56	0.56
LB	0.57	0.58	0.54	0.55	0.56

$$VCT = K_{VCT} \cdot VCT_2$$

$$VCT_M = \Sigma (V_S \cdot C \cdot VCT) / \Sigma (V_S \cdot C)$$

## Vatten

Btg	W (l/m <sup>3</sup> )				W <sub>M</sub>
	I	II	III	IV	
NN	211	203	201	192	202
NA	217	211	200	184	203
NB	221	210	201	182	203
LN	187	185	185	159	179
LA	186	190	183	156	179
LB	198	182	187	158	180

$$W = VCT \cdot C$$

$$W_M = \Sigma (W \cdot V_S) / \Sigma V_S$$

## Lufthalt

Btg	L (%)				L <sub>M</sub>
	I	II	III	IV	
LN	6.7	6.6	6.1	6.2	6.4
LA	7.8	5.5	5.2	5.2	5.9
LB	6.5	4.9	4.6	4.1	5.0

$$L = (VLCT - VCT) \cdot C / 10$$

$$L_M = \Sigma (V_S \cdot L) / \Sigma V_S$$

## BILAGA 2

## SAMMANFATTNING AV FÖRSÖKSRESULTAT

Btg	Skiva	Sammansättning		(kg/m <sup>3</sup> )		Vct	Luft (%)	Motståndstal ( $\cdot 10^6$ s/m <sup>2</sup> )	Avskalning (kg/m <sup>2</sup> )
		Cement	Vatten	Ballast A>2	A<2				
NN	I	321	211	913	904	0.66		20	3.90 <sup>1</sup>
	II	287	203	971	894	0.71		20	4.50 <sup>1</sup>
	III	284	201	938	918	0.71		22	4.10 <sup>1</sup>
	IV	297	192	996	888	0.64		33	1.70 <sup>1</sup>
NA	I	328	217	876	911	0.66		27	5C <sup>2</sup>
	II	312	211	935	893	0.68		27	4C <sup>2</sup>
	III	277	200	1000	888	0.72		25	4C <sup>2</sup>
	IV	276	184	1095	870	0.67		53	6C <sup>2</sup>
NB	I	317	221	786	991	0.70		22	5C <sup>2</sup>
	II	306	210	904	928	0.69		24	4C <sup>2</sup>
	III	296	201	994	885	0.68		24	4C <sup>2</sup>
	IV	277	182	1095	844	0.66		50	6C <sup>2</sup>
LN	I	338	187	856	873	0.55	6.7	42	0.66 <sup>3</sup>
	II	316	185	889	865	0.59	6.6	35	0.40 <sup>3</sup>
	III	325	185	895	865	0.57	6.1	35	0.55 <sup>3</sup>
	IV	297	159	1011	842	0.54	6.2	71	0.25 <sup>3</sup>
LA	I	329	186	763	947	0.57	7.8	41	0.94 <sup>3</sup>
	II	336	190	875	881	0.57	5.5	33	0.88 <sup>3</sup>
	III	336	183	949	833	0.55	5.2	37	0.97 <sup>3</sup>
	IV	278	156	1094	807	0.56	5.2	68	0.36 <sup>3</sup>
LB	I	347	198	771	939	0.57	6.5	36	1.03 <sup>3</sup>
	II	316	182	997	812	0.58	4.9	32	1.60 <sup>3</sup>
	III	344	187	839	943	0.54	4.6	31	1.49 <sup>3</sup>
	IV	286	158	1099	822	0.55	4.1	73	0.30 <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Efter 6 fryscyklar<sup>2</sup> Brott efter antal fryscyklar<sup>3</sup> Efter 14 fryscyklar

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 830910-4  
från Statens råd för byggnadsforskning till CTH,  
Avdelningen för byggnadsmaterial, Göteborg.

R39: 1987

ISBN 91-540-4720-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6707039

Abonnemangsgrupp:  
Z. Konstruktioner och material

Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 7853  
103 99 Stockholm

Cirkapris: 30 kr exkl moms