



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**

**R77:1983**

# **3L-betongen**

## **Egenskaper i produktion och konstruktion**

**Olav Berge**

INSTITUTET FÖR  
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac *See*

*K  
1983*

R77:1983

3L-BETONGEN

Egenskaper i produktion  
och konstruktion

Olav Berge

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
780350-2 från Statens råd för byggnadsforskning,  
anslag 78-3754 från Styrelsen för teknisk ut-  
veckling till avd Betongbyggnad och avd Byggnads-  
material, CTH, Göteborg.

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

R77:1983

ISBN 91-540-3968-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1983



## INNEHÅLL

FÖRORD . . . . .		6
SAMMANFATTNING . . . . .		9
1	INLEDNING . . . . .	11
1.1	Historik, bakgrund . . . . .	11
1.1.1	Forskning i Sverige . . . . .	11
1.1.2	Uppfinningen polymera mikropartiklar i 3L-betong . . . . .	11
1.1.3	Begreppet 3L-betong . . . . .	12
1.2	Projektets målsättning . . . . .	12
1.3	Riktlinjer för forskningsprogrammets omfattning . . . . .	13
1.4	Principer för slutrapportens ut- formning . . . . .	15
2	POLYMER DISPERSION CEMOS 110 . . . . .	16
2.1	Sammansättning . . . . .	16
2.2	Hälsa- och miljöfarlighet . . . . .	16
2.3	Lagring och behandling av Cemos 110. . . . .	17
2.4	Tillsättning av dispersionen till betong . . . . .	17
2.5	Effekterna i den färska betongen . . . . .	17
2.5.1	Luftporbildningen . . . . .	17
2.5.2	De sammanhållande krafterna i betongen . . . . .	18
2.5.3	Luftporbildning om ballasten är undergraderad . . . . .	19
2.5.4	Vattenabsorption i porös ballast . . . . .	19
2.6	Effekterna i den hårdnande betongen . . . . .	19
2.7	Polymerfilmens beständighet i betong . . . . .	21
3	LÄTTBALLASTEN . . . . .	22
3.1	Fabrikat . . . . .	22
3.2	Densitet . . . . .	22
3.3	Fraktioner . . . . .	22
3.4	Fukthalt . . . . .	23
4	BETONGSAMMANSÄTTNING OCH PROPOR- TIONERING . . . . .	24
4.1	Allmänna grundförutsättningar . . . . .	24
4.2	BBK's krav på betongens tryck- hållfasthet . . . . .	25
4.3	BBK's krav på betongens densitet . . . . .	25
4.4	Betongdensitet vid olika ålder . . . . .	26
4.5	Ballastmaterial . . . . .	26
4.6	Exempel på betongsammansättning . . . . .	28
4.7	Riktlinjer för justering av betong- sammansättningar efter förprovning . . . . .	29
5	PROVNING OCH KONTROLL . . . . .	31
5.1	Ballastprovning . . . . .	31
5.1.1	Fukthalt . . . . .	31
5.1.2	Kornfördelning . . . . .	31
5.1.3	Korndensitet . . . . .	31
5.1.4	Skrymdensitet . . . . .	32
5.2	Betongprovning . . . . .	32
5.2.1	Densitet, färsk betong . . . . .	32

5.2.2	Konsistens . . . . .	32
5.2.3	Tryckhållfasthet . . . . .	33
5.2.4	Densitet, hårdnad betong . . . . .	33
5.3	Kontroll av delmaterialförbrukning . . . . .	33
6	TILLVERKNING, TRANSPORT OCH GJUTNING	35
6.1	Allmänt . . . . .	35
6.2	Tillverkning . . . . .	35
6.3	Transport . . . . .	36
6.4	Gjutning . . . . .	36
7	HÄRDNING . . . . .	37
7.1	Tillstyvnad . . . . .	37
7.2	Temperatur vid härdning . . . . .	37
7.3	Fuktförhållanden vid härdning . . . . .	37
7.4	Hållfasthetstillväxten . . . . .	38
8	HÅLLFASTHETS- OCH DEFORMATIONS- EGENSKAPER . . . . .	40
8.1	Sambandet tryckhållfasthet/densitet . . . . .	40
8.2	Spräckdraghållfasthet . . . . .	41
8.3	Arbetskurvan vid fri och förhindrad tvärutvidgning . . . . .	43
8.4	Elasticitetsmodul . . . . .	44
8.5	Maximal betongstukning (betong- stukning vid maximalpåkänning) . . . . .	45
8.6	Krytpal . . . . .	45
8.7	Krympning . . . . .	46
9	DET ARMERADE 3L-BETONGELEMENTETS HÅLLFASTHETS- OCH DEFORMATIONS- EGENSKAPER . . . . .	47
9.1	Spänningsfördelningen i armerade balkars tryckzon i brottstadiet . . . . .	47
9.2	Inverkan av tryckarmering på 3L- betongbalkars bärförmåga . . . . .	48
9.3	Rotationskapacitet i flytleder . . . . .	48
9.4	Tvårkraftskapacitet . . . . .	50
9.5	Förankring av kamstångsarmering . . . . .	51
9.6	Förankring och skarvning av svetsade armeringsnät . . . . .	54
9.7	Nedböjningar . . . . .	55
9.8	Sprickor . . . . .	57
9.9	Slutsatser . . . . .	58
10	HYDROFOBIRELATERADE EGENSKAPER . . . . .	60
10.1	Allmänt . . . . .	60
10.2	Vattentäthet . . . . .	61
10.3	Ångdiffusionstal . . . . .	62
10.4	Vattenabsorptionskaraktäristika . . . . .	63
10.5	Vatten- och fukttransport genom 3L- betong . . . . .	63
10.6	Uttorkning . . . . .	64
10.7	Frostbeständighet . . . . .	65
10.8	Brandbeständighet . . . . .	66
10.8.1	Spjälkning orsakad av ång- eller vattentryck . . . . .	66

10.8.2	Hållfasthetsförluster och spjälkning orsakad av skillnad i temperatur- rörelse mellan cementmatrix och ballast . . . . .	67
10.8.3	Silikatens volymexpansion vid högre temperatur . . . . .	68
10.8.4	Cementets nedbrytning . . . . .	68
10.8.5	Värmeledningsförmågan vid högre temperatur . . . . .	68
10.9	Kemisk beständighet . . . . .	69
10.10	3L-betongens skydd mot armerings- korrosion . . . . .	69
10.10.1	Allmänt . . . . .	69
10.10.2	Karbonatiseringshastigheten . . . . .	69
10.10.3	Kloridinträngning . . . . .	70
10.10.4	Rekommendationer till revidering av BBK 79 . . . . .	72
11	ÖVRIGA STUDERADE EGENSKAPER HOS 3L-BETONGEN . . . . .	74
11.1	Formbarhet i hårdnat tillstånd . . . . .	74
11.2	Infästningar i 3L-betong, anpassad sammanfogningsteknik . . . . .	74
11.2.1	Spikning . . . . .	74
11.2.1.1	Allmänt . . . . .	74
11.2.1.2	Utdragshållfasthet för spiken . . . . .	75
11.2.1.3	Tvärkraftshållfasthet . . . . .	76
11.2.2	Skruv . . . . .	77
11.2.2.1	Fransk träskruv . . . . .	77
11.2.2.2	Spånskiveskruv . . . . .	78
11.2.2.3	Expanderbult, kemiska ankare . . . . .	78
11.3	Ljudisolering . . . . .	79
11.3.1	Luftljudsdämpning . . . . .	79
11.3.2	Stegljudsdämpning . . . . .	79
11.3.3	Slutsatser . . . . .	79
11.4	Värmeledningstal . . . . .	79
11.5	Värmekapaciteten . . . . .	80
11.6	Limning . . . . .	81
11.7	Målning . . . . .	81
11.8	Kalkutfällningar . . . . .	82
11.9	Radongasutveckling . . . . .	82
12	TEKNISK/EKONOMISK BEDÖMNING . . . . .	83
12.1	Bakgrund . . . . .	83
12.2	Grundläggande förutsättningar för en teknisk/ekonomisk jämförelse . . . . .	84
12.3	Egenskaper av betydelse för bedöm- ning i jämförelse med normalbetong . . . . .	85
12.3.1	Materialpriser . . . . .	85
12.3.2	Egentyngden . . . . .	86
12.3.3	Bra beständighet . . . . .	87
12.3.4	Hållfasthetstillväxt . . . . .	88
12.3.5	Formbarhet i hårdnat tillstånd . . . . .	88
12.3.6	Sammanfogningar, infästningar . . . . .	88
12.3.7	Målning . . . . .	88
12.4	Egenskaper av betydelse för be- dömningen i jämförelse med trä . . . . .	88
13	SAMMANFATTANDE SLUTSATSER . . . . .	90
LITTERATUR	. . . . .	92

## FÖRORD

Utvecklings- och forskningsarbetet som resulterat i dagens 3L-betong har utförts vid Chalmers tekniska högskola och kännetecknas av att det har varit ett grupparbete sedan arbetet startade sommaren 1975.

Idéen att använda en lätt betong i konstruktioner härstammar från professor Anders Losberg. Redan på 70-talets början ifrågasatte han om man inte hellre borde framställa en lätt betong i stället för att eftersträva en höghållfast, men tung betong. Denna åsikt framfördes med övertygelse och entusiasm vid en tidpunkt då detta inte var så opportunt. Losberg medverkade aktivt vid lättballastbetongprojektens tillkomst, och hans råd och stöd i forskningsarbetet var av avgörande betydelse. Losberg lyckades att införa färiska forskningserfarenheter i BBK 79 och det var tack vare hans insatser som vi fick beräkningsmodeller och -regler för 3L-betongen i dessa bestämmelser. Det var naturligt att Losberg blev ordförande i projektstyrelsen. Det var emellertid tråkigt att han bara fick uppleva den första början av 3L-betongens användning. Strax innan han dog besökte han gjutningarna vid Kungsbacka Stadshus, och in i det sista tog han aktivt del i forsknings- och uppföljningsarbetena.

Metoden hur man åstadkommer denna nya betong härstammar från uppfinnaren Bengt Hedberg. Bengts idéer har fått stöd och kritik från Leif Berntsson och han har således haft tillgång till Leifs stora kunskaper om betong och andra material. Tillsammans har dessa två uppfinnare och forskare utgjort en unik kombination med stor uppfinningsrikedom väl förankrad i realiteter. Båda har aktivt deltagit i projektarbetet även om de inte har varit projektanställda och de har båda haft sitt ordinarie arbete att ta hänsyn till. Jag har som projektledare haft ovärderlig hjälp vid utformningen och uppläggningsen av de delar av projektet som kunde hänföras till Byggnads-material.

Under Olof Magnussons aktiva tid vid Bofors Nobel Kemi AB hade forskargruppen ett värdefullt samarbete i det utvecklingsarbete som ledde fram till Cemos 110. Det är mycket lyckligt att Magnusson efter sin pensionering åter har slutits till gruppen och fortsätter sitt arbete på deltid vid CTH.

Professor Roman Malinowski har kanske i mindre utsträckning deltagit i själva utvecklingsarbetet, men detta arbete präglades ändå till stor del av hans kunskaper och hans kreativa sätt att tänka, vilket han har lärt sina medarbetare. Malinowski har genom sin patenterade metod att vakuumsuga/karbonatisera 3L-betongen åstadkommit en metod att snabbt härda denna betong.

Större delen av forskningsarbetet har utförts av medarbetarna Juhan Aavik och Satish Chandra vid Byggnadsmaterial och av Per-Ake Olsson och Stig Öberg vid Betongbyggnad. Alla har utvecklat gedigna kunskaper inom sina områden. Flera av projektets delrapporter kommer att utnyttjas i framtida doktorsarbeten. Andrzej Tomaszewicz, numera Norges Tekniska Högskola, och Wanda Sobko, Betongbyggnad, har gjort betydelsefulla insatser inom projektet.

Aktiva inom forskningsarbetena har även varit Jan Isberg, Husbyggnadsteknik, CTH, Göran Kårfalk, Byggnadsfysik AB, Yngve Anderberg, Byggnadsstatik, Tekniska högskolan i Lund, Per Flodin, Polymerteknik, CTH, Jan Byfors och Ulf Wats, Cements AB. Tack vare deras medverkan har det varit möjligt att få en bred dokumentation av 3L-betongens egenskaper.

Sven Knutson, Betongbyggnad och Bengt Dellming, Byggnadsmaterial, har alltid varit mycket behjälpliga att få fram lämplig utrustning och utrymme till försöken. Wanda Sobko har gjort ritningsunderlaget för denna rapport och Yvonne Juliusson och Birgitta Lendheim har båda belastats med mycket skrivarbete.

Ett stort tack riktas till alla som varit med och finansierat projektet "Konstruktioner i hydrofob 3L-betong" och även de forskningsprojekt som föregick och ledde fram till detta.

#### Från Byggforskningsrådet:

Projektet "Konstruktioner i 3L betong - lätt låghållfast lättballastbetong" 1973-78	kr 638.000
Projektet "Utredning om den hydrofoba 3L-betongens användning"	kr 55.000
Projektet "Konstruktioner i hydrofob 3L-betong"	kr 950.000

#### Från Styrelsen för Teknisk Utveckling:

(Till Bofors Nobel Kemi AB för optimering av polymera mikropartiklar, överförd till Byggnadsmaterial, CTH)	kr 180.000)
Projektet "Konstruktioner i hydrofob 3L-betong"	kr 500.000

#### Från företagen:

Icopal/Leca AB	kr 225.000
Bofors Nobel Kemi AB	kr 75.000
Halmstads Järnverks AB	kr 50.000
Gottåsa Cementgjuteri AB	kr 45.000

Skånska Cementgjuteriet AB	kr	45.000
BPA/Västerås Byggnadsprodukter AB	kr	45.000
AB Strängbetong	kr	30.000
A-Betong AB	kr	30.000

Förutom denna direkta finansiering har Cementa i form av forskningsinsatser satsat 50.000:-. Företagen Strängbetong och A-Betong har under tiden varit medverkande inom projektet "Tunnväggiga betongkonstruktioner" och har bidragit till finansieringen av detta.

Projektledare har varit Olav Berge - författaren av denna rapport - som har varit ansvarig inför projektstyrelsen sammansatt av

Anders Losberg, Betongbyggnad, CTH (ordf)  
 Roman Malinowski, Byggnadsmaterial, CTH  
 Gunnar Brockman, Juridiska sektionen, CTH  
 Leif Berntsson, Byggnadsmaterial, CTH,  
 uppfinnare

Folke Johansson, Icopal/Leca  
 Bengt Persson, AB Gottåsa Cementgjuteri  
 K-G Bernander, AB Strängbetong (suppl)  
 Olof Magnusson, Bofors Nobel Kemi AB  
 (suppl)

Magnusson efterträddes vid sin pensionering av C Heinegård, Bofors Nobel Kemi AB

Författaren vill härmed rikta ett tack till alla ovanstående för deras stora intresse och bidrag till fullföljande av projektet. Utan allas hjälp hade denna rapport inte kommit till stånd.



## SAMMANFATTNING

Denna rapport är en sammanfattning av den forskning med hydrofob 3L-betong som bedrivits på Chalmers tekniska högskola, avd Byggnadsmaterial och Betongbyggnad under åren 1975 till 1982. Forskningen har finansierats av Byggforskningsrådet, av Styrelsen för Teknisk Utveckling och av representanter för svensk byggnadsindustri.

Den hydrofoba 3L-betongen som studerats har varit en lättklinkerbetong i densitetsområdet 1000 till 1300 kg/m<sup>3</sup>. 3L-betongen baseras på tillsats av polymera mikropartiklar i den färska betongen. Principen uppfanns ursprungligen av Bengt Hedberg vid avd Byggnadsmaterial, CTH, och de polymera mikropartiklarna utvecklades av uppfinnaren i samarbete med Leif Berntsson vid samma avdelning och med Bofors Nobel Kemi AB's forskare under ledning av Olof Magnusson.

Rapporten är en sammanfattning av forskningresultat, egenskapsdokumentation och erfarenheter från sju års verksamhet och praktiska appliceringar. Den beskriver egenskaperna hos den hydrofoba 3L-betong i det färska stadiet, och ger allmänna enkla anvisningar för betongens tillverkning, transport och hantering. Den hårdnade betongens hållfasthets- och deformationsegenskaper samt dess funktion i den armerade konstruktionen presenteras, diskuteras och förslag till ändringar i Bestämmelser för Betongkonstruktioner BBK 79 gällande 3L-betongen anges. Teorier för den hydrofoba polymerfilmen placerad på por- och kapillärväggar uppställs, och dess funktion i fuktiga miljöer belyses. 3L-betongens beständighet i olika miljöer dokumenteras. Även andra egenskaper av betydelse för den praktiska användningen i bostäder har studerats, dess akustiskt dämpande egenskaper, dess värmeledningstal och infästningars hållfasthet i betongen. Dess bearbetbarhet i det hårdnade stadiet beskrivs. Slutligen ges grundläggande riktlinjer och råd för teknisk/ekonomisk analys av den hydrofoba 3L-betongen i jämförelse med normalbetong och trä.

Projektet har lett fram till flera applicerings- och utvecklingsprojekt, och resultaten från den fleråriga verksamheten visar att 3L-betongen är ett intressant material med goda hållfasthets- och beständighets-egenskaper. Till trots för ett högt materialpris jämfört med normalbetong innebär användningen av den hydrofoba 3L-betongen i många konstruktioner en lägre totalkostnad om man utnyttjar denna betongs speciella egenskaper.

## SUMMARY

This report is a summary of the research on the hydrophobe 3L-concrete that has been done during the

years 1975 to 1982 on Chalmers University of Technology, Division of Building Materials and Division of Concrete Structures.

The research has been financed by The Swedish Council of Building Research, by The National Board of Technical Development and by representatives of Swedish building industry.

The hydrophobe 3L-concrete that was studied was a lightweight aggregate concrete with density between 1000 and 1300 kg/m<sup>3</sup>. It was developed by a research group at Chalmers University of Technology and is based on addition of polymer microparticles in the fresh concrete. The principle was invented by Bengt Hedberg at the Division of Building Materials, Chalmers University of Technology and the polymer microparticles were developed together with Leif Berntsson at the same Division and with a research group at Bofors Nobel Kemi AB under the leadership of Olof Magnusson.

The report is a summary of research results, documentations of properties and experiences from seven years work and practical applications. It describes the properties of the hydrophobe 3L-concrete in the fresh state and gives practical advises for the manufacturing, transport and handling of the concrete. The strength and strain properties of the hardened concrete as well as its function in the reinforced structure are presented, discussed and proposals for revision of the Swedish Concrete Code are given. Theories for the function of the hydrophobe polymer coating on the walls of voids and capillaries are set up and its function in moist environments is discussed. The durability of the 3L-concrete in different aggressive environments are documented. Even other properties of fundamental importance for practical application in house building have been studied, its accoustic damping properties, its heat conductivity and the strength of various attachments. The excellent formability in the hardened state is described. Finally basic recommendations and advises for technical/economical analysis of the hydrophobe 3L-concrete in comparison with normalweight concrete and timber are presented.

The project has resulted in several application and development projects, and the results from the work during several years show that the 3L-concrete is a material with good strength and durability properties. In spite of high material cost in comparison to the normalweight concrete, the total cost are often lower if you use the 3L-concrete in structures where you can take benefit of the special properties of this concrete.



## 1 INLEDNING

### 1.1 Historik, bakgrund

#### 1.1.1 Forskning i Sverige

Denna rapport baseras på det forsknings- och utvecklingsarbete som ägt rum i Sverige under åren 1975-1982, huvudsakligen på Chalmers tekniska högskola.

I forskningen framstod tidigt rätt klart att om lättballastbetongen skulle komma till allmän användning i Sverige så var en lätt betong den ekonomiskt mest attraktiva. 1975-07-01 påbörjades projektet "Konstruktioner i lätt, låghållfast lättballastbetong (3L-betong) och partiellt förspända lättballastbetongkonstruktioner". Parallellt med detta projekt pågick vid Byggnadsmaterial, CTH, ett projekt under ledning av Leif Berntsson med målsättningen att lösa tillverkningstekniska problem i samband med mikro-partikel tillsats i betong. Detta projekt finansierades av STU.

#### 1.1.2 Uppfinningen polymera mikropartiklar i 3L-betong

Efter energikrisen 1973 började en strävan att reducera lättballastbetongens densitet för att därigenom förbättra de värmeisolerande egenskaperna hos betong, och för att reducera kostnader och energi för transport och bearbetning. Denna utveckling ägde till stor del rum i Västtyskland. Där försökte man med hjälp av överdosering av luftporbildare eller s k skumbildare minska cementbrukets densitet. Denna utveckling var inte särskilt lyckosam och den s k skumbetongen har inte fått någon större användning då metoden visade sig ge instabila blandningar, svårkontrollerbar hållfasthet och densitet hos betongen samt i flera fall en besvärande krympning.

Bengt Hedberg vid Byggnadsmaterial, CTH, hade vid ett tidigt tillfälle upptäckt att genom tillsats av polymera mikropartiklar med diameter mindre än  $0,5\mu\text{m}$  resulterade i stabil luft i betong. Vid författarens försök att framställa 3L-betong med densitet ned mot  $1000\text{ kg/m}^3$  provades i april 1975 sådana partiklar. Försöket var mycket vällyckat och i fortsättningen användes enbart 3L-betong på mikropartikelbas i lättballastbetongprojekten vid CTH då detta visade sig vara det säkraste sättet för att stabilisera luftporer i betong.

Hösten 1975 sökte Bengt Hedberg patent på uppfinningen. Ett samarbete etablerades med Bofors Nobel Kemi AB under ledning av civ ing Olle Magnusson med målsättning att optimera mikropartiklarna.

Uppfinnargruppen vid CTH tillsammans med forskarna vid Bofors Nobel Kemi AB lyckades efter många försök att komma fram till den produkt som vi idag känner som Cemos 110. Kunskaperna om denna produkts verkningssätt i betong var så gedigna att man redan våren 1978 kunde förutsäga de flesta egenskaperna hos den hydrofoba 3L-betongen.

Händelseutvecklingen vid CTH förstärkte behovet av analys av de kunskaper och erfarenheter som erhållits under 3 års forskning och utveckling. Detta resulterade i ett programarbete beställt av BFR. Målsättningen var att studera konsekvenserna av användning av en 3L-betong med hydrofoba egenheter i olika konstruktioner och ledde fram till rapporten "Användning av hydrofob 3L-betong", Publikation 78:1, Betongbyggnad. I denna rapport skisserades det forskningsprogram och den dokumentation som erfordrades vid en bred användning av 3L-betong och detta program har legat till grund för forskningsprojektet.

### 1.1.3 Begreppet 3L-betong

Begreppet 3L-betong fanns redan innan polymera mikropartiklar använts i denna betong. Från början avsågs en lätt, låghållfast lättballastbetong i densitetsområdet 1000 till 1300 kg/m<sup>3</sup>. Allmänt besitter en sådan betong inga vattenavvisande egenskaper, den är dock i det hårdnade tillståndet, bearbetbar på liknande sätt som den polymerbaserade 3L-betongen

Den 3L-betong som man lyckades utveckla med hjälp av filmbildande mikropartiklar och som visat sig ha förbättrade beständighetsegenskaper kallades från början hydrofob 3L-betong. I denna rapport och så som numera är vanligt i tal och skrift kallas den hydrofoba betongen allmänt 3L-betong.

### 1.2 Projektets målsättning

I tidigare projekt vid CTH hade en avsevärd kunskapsmängd samlats om 3L-betongens hållfasthets- och deformationsegenskaper samt om denna betongs funktion i armerade konstruktioner. Dessa kunskaper sammanställdes i författarens doktorsavhandling "Konstruktioner i armerad lättballastbetong" och de flesta av BBK 79's beräkningsmodeller gällande lättballastbetong kunde verifieras.

Det var emellertid uppenbart att inom olika områden var baskunskaperna bristfälliga och inom dessa områden var det nödvändigt att beräkningsmodellerna för lättballastbetongen sattes väl på säkra sidan. Fördjupade kunskaper om 3L-betongen i vissa sammanhang och dess funktion som konstruktionsmaterial var således nödvändig. En övergripande målsättning med

projektet var att ge underlag för reviderade beräkningsregler i BBK 79 inom sådana områden där detta kunde befaras vara behövt - ur såväl säkerhets- synpunkt som ur ekonomisk synvinkel. Likaledes har målsättningen varit att kunna ge rekommendationer för de kontrollåtgärder som kan anses vara nödvändiga för en säker produktion av 3L-betong.

3L-betongen är framställd med ny teknik och dess strukturbildning är avvikande från det man tidigare studerat i betongforskningen. Det var således nödvändigt för bedömning av dess livslängd få fram data för dess beständighet i olika miljöer. Likaledes erfordrades elementära materialdata om dess värme- och fukttekniska egenskaper för introduktionen av 3L-betongen i olika konstruktioner och produkter. Målsättningen för projektet var att ta fram erforderliga materialdata som en jämförelse med andra byggnadsmaterial och som underlag för Svensk Byggnorm och BBK 79.

Påpekas måste dock att projektets målsättning har inte varit att de framtagna materialdata skulle täcka appliceringar i vilka betydelsefulla material-egenskaper utnyttjades till fullo. Inom projektets ram var det möjligt för industrideltagarna att påverka programutformningen - eller att söka anslag från BFR/STU för fördjupade studier.

3L-betongen med dess lätta formbarhet i det hårdnade stadiet möjliggör sammanfogningsteknik känd från träkonstruktioner, t ex spikning, skruvning, limning. Denna teknik baseras på forskning, men även på erfarenheter från många hundra års användning. Inom ramen för ett delprojekt var det inte möjligt att få fram allmängiltiga regler för denna teknik applicerad på 3L-betong. Däremot har avsikten varit att samla så mycket information att en eventuell användare vid projekteringen kan bedöma möjligheterna för sådana sammanfogningar, och sedan genom enkla provningar fastställa hållfastheten hos de förbindningar som han valt. Genom att samla in framtida erfarenheter torde det vara möjligt att inom rimlig tid få tillräckligt underlag för att kunna fastställa mera allmängiltiga regler för förbindningar i 3L-betong.

Slutligen bör påpekas att det har aldrig varit avsikten hos forskargruppen vid CTH att forskningsresultaten skulle kunna leda fram till ett allmängiltigt typgodkännande av 3L-betongen vid Statens Planverk. Emellertid skulle den utförda forskningen och dess dokumentation kunna vara till hjälp t ex för typgodkännande av enskilda produkter.

### 1.3 Riktlinjer för forskningsprogrammets omfattning

Av naturliga skäl begränsades projektets omfattning av de förutsättningar som rådde på den svenska

marknaden vid tidpunkten för projektets planering och genomförande och av de ekonomiska ramarna för projektet.

Den produkt som utvecklades i förprojektet - Cemos 110 - bildar en polymer film på betongens por- och kapillärväggar. Den är patenterad i Sverige och några andra länder och någon annan jämförbar produkt finns inte på marknaden. I de försöksserier där man kunde ha anledning att förmoda att den polymera filmen skulle kunna inverka på den provade egenskapen göres jämförelse med den ursprungliga mikropartikeln CMT 2 som var en hård, icke filmbildande polymer. I flera försöksserier görs jämförande försök med en konventionell luftporbildare, vilken visat sig ge lättballastbetong med lätt lättklinker acceptabla gjutegenskaper.

Under den tid då försöken pågick fanns på svenska marknaden bara ett lättballastfabrikat - nämligen Leca - som kunde uppfylla ett densitetskrav av 1000 till 1300 kg/m<sup>3</sup>.

I framtiden kommer 3L-betongen att introduceras på marknader där det finns annan ballast än den som provades vid CTH. Vidare kan andra lättballastfabrikat eller -typer än Leca komma att användas i Sverige. I inget fall får man förutsättningslöst anta att de egenskaper som här redovisas för den Cemos-baserade 3L-betongen kan erhållas med det nya materialet. Ballasten måste bedömas i varje enskilt fall. En förundersökning måste äga rum och denna måste utformas på basis av grundläggande kunskaper om polymera mikropartiklars funktion i betong.

Ur litteraturen framgår att flera av de mest betydelsefulla egenskaperna hos betongen påverkas negativt av stor porositet i cementbruket. Det var därför målsättningen i utvecklingsgruppen att försöka hålla lufthalten i betongen vid ett minimum och att göra den så finfördelad som möjligt. De speciella egenskaperna hos Cemos 110 medför emellertid att om delar av ballastfraktionerna saknas är det ändå möjligt att tillverka en betong med s k monolitisk struktur - i vilken mellanrummet mellan ballastpartiklarna är helt utfyllt av cementpasta - och med acceptabla gjutegenskaper. Bruket i denna betong har dock en hög porositet och luftporerna är stora.

Vid projektets början beslöt forskargruppen vid CTH att inom projektet arbeta med en betong vars ballast-sammansättning ger liten porositet i cementbruket och således en stark, monolitisk struktur. Genom att ställa krav på ballastsammansättningen kan man erhålla en betong med goda gjutegenskaper vid ett lågt vattencementtal, och man kan förvänta små variationer i gjutegenskaper och hållfasthet, med andra ord en produktionsanpassad betong. I enstaka försöksserier har dock inverkan av en för hög halt

luft studerats. Allmänt gäller dock att de egenskaper som redovisas i denna rapport och dess delrapporter förutsätter att betongen i sin sammansättning - och ballasten i sin fraktionering - uppfyller de krav som forskargruppen vid CTH har kommit fram till är optimal med hänsyn till krav på goda gjutegenskaper och homogenitet, hållfasthet, beständighet och täthet.

Det vetenskapliga underlaget för att åstadkomma denna sammansättning och allmänna riktlinjer för proportionering av denna betong har utarbetats av Berntsson 1982. På basis av denna rapport ges i kapitel 4 utgångsvärden på hur betongen - och i första hand ballasten - måste vara sammansatt för att man skall kunna uppfylla kraven på hållfasthet densitet och täthet. I Appendix visas i tre exempel proportioneringsförfarandet baserat på Berntssons rapport.

#### 1.4 Principer för slutrapportens utformning

Författaren har vid utarbetande av denna rapport haft som övergripande målsättning att förklara de polymera mikropartiklarnas funktionssätt i 3L-betong på basis av försök, erfarenheter och observationer. Avsikten är att öka läsarens förståelse för betongen och ge honom känsla för materialet. Därigenom ökar hans möjligheter att bedöma 3L-betongen i olika appliceringar och minskar riskerna för misslyckanden. I detta avseende utnyttjar författaren inte bara försöksresultat, men även i stor utsträckning redovisas erfarenheter och observationer som gjorts under flera års laboratorieverksamhet och från praktiska appliceringar.

Rapporten får också ses som en uppsummering av det kunnande som finns på området 3L-betong innan BFR-projektet "Kungsbacka Stadshus" publiceras hösten 1982. Många frågor har inte kunnat besvaras och nya tillkommit såsom i all forskning och utveckling. Emellertid är kunskaperna om materialet 3L-betong efter många års forskning i laboratorie-betingelser så gedigna att man med fördel och stor säkerhet kan använda det i en lång rad konstruktioner och produkter.

Rapporten är ingen formelsamling och konstruktören som använder den torde behöva såväl BBK 79 som Betonghandboken för att ha fullt utbyte av den. För den som vill förkovra sig mer eller om man söker bakgrunden till texten kan de olika delrapporterna ge mera information. Vid ett senare tillfälle då mer underlag från den praktiska användningen föreligger kan det bli aktuellt med en uppdatering, kanske mer i manualform.



## 2 POLYMER DISPERSION CEMOS 110

## 2.1 Sammansättning

Bofors Nobel Kemi AB har 1980-06-26 utfärdat en varuinformation om Cemos 110 hälso- och miljöfarlighet. Enligt denna består polymerdispersionen av:

Styren-akrylsampolymer	27,5 %
Asfalt	5,5 %
Petroleumdestillat	0,25%
Ammoniak	0,2 %
Vatten	65,85%
Tensid, anjontyp	0,7 %

I produkten finns max totalt 0,2% monomerrester.

## 2.2 Hälso- och miljöfarlighet

I Bofors Nobel Kemis varuinformation klassificeras Cemos 110 såsom ej hälsofarlig. Man påpekar emellertid att ångorna från produkten är obehagliga och att inandning av dessa bör undvikas då man öppnar nya kärl.

Vid användningen vid CTH har konstaterats att lukten från Cemos 110 kan sägas vara mindre behaglig men svag. Den utgörs av en blandning av ammoniak och kolväten.

Under 3 års användning inomhus utan särskilda ventilationsåtgärder har hittills inga klagomål framförts beträffande illamående eller andra sjukdomstecken. I samband med arbetena vid Kungsbacka Stadshus har Bygghälsan inkomplat för att bedöma Cemos 110 vid användning på arbetsplats. Deras utlåtande kommer att föreligga vid slutrapporteringen av detta projekt.

Dispersionen är något alkalisk och man bör enligt varuinformationen undvika kontakt med hud och ögon. I de fall man vid laboratoriehanteringen fått Cemos på händer har detta gett upphov till en lätt klåda som till viss del härrör från uppsprickning av den tunna polymerfilm som bildas på huden. Denna kan vara svår att tvätta bort med tvål och vatten. Man bör undvika att få dispersionen på kläder, en polymerimpregnering av dessa innebär att kläderna för alltid är vattentäta!

Polymererna kan inte lämna vätskefasen utan att partiklarna klibbar samman. I betongen är polymeren placerad på por- och kapillärväggarna och har bildat film på hydratationsprodukterna vid uttorkningen. En mindre andel partiklar torde finnas kvar i kapillär-

vattnet. Vid torr sågning eller slipning smälter polymeren och kan åstadkomma en glansig betongyta. På de dammpartiklar som bildas är polymeren bunden till hydratationsprodukterna. Vid våt metod stannar polymerpartiklarna i vattnet. Man kan därför på goda grunder förmoda att det damm som bildas inte har större olägenheter än vid liknande härrörande från normalbetong.

### 2.3 Lagring och behandling av Cemos 110

Vid för låg vattenhalt i dispersionen kommer mikropartiklarna i kontakt med varandra och bildar då större partiklar och klibbar samman. Detta bör man alltid ha i minnet vid hantering och transport av dispersionen. Man bör därför omedelbart spola ren den utrustning man använt med vatten innehållande tvättmedel och därefter med rent vatten. Problem kan uppstå i pumpar och i ledningar eller sprutmunstycken genom asfaltutfällning om man glömmar att uppmärksamma detta, eller om man enbart spolat utrustningen med rent vatten.

Om dispersionen utsätts för frost sker också en flockning eller sammanklibbning av mikropartiklarna och dispersionen blir oanvändbar. Se därför till att Cemos 110 alltid lagras frostfritt.

Den ammoniak som används har bl a en stabiliserande funktion. Vid några tillfällen har vid misstag ammoniaken vid hanteringen i laboratorier på CTH fått avdunsta, t ex då lock inte förslutits ordentligt. Den ändring av Cemos 110 som detta har haft till följd har påtagligt reducerat de sammanklibbning krafterna i betongen. Ballastseparationen i betongen ökar samtidigt som lufthalten i cementbruket ökar starkt. Resultaten blir således att man erhåller en betong som är för lätt och som har starkt försämrade gjutegenskaper. Den "sjuka" Cemosen kan man känna igen genom en lätt unken lukt och tecken till flockning eller filmbildning på dispersionens yta.

### 2.4 Tillsättning av dispersionen till betong

Cemos 110 är oändligt utspädbar i vatten. Om för litet vatten finns tillgängligt klibbar polymerpartiklarna samman. Lämpligast tillsättes Cemos vattnet för betongen innan detta kommer i blandaren.

### 2.5 Effekterna i den färska betongen

#### 2.5.1 Luftporbildningen

I projektet har de teorier som tidigare uppställdes och som beskrev mikropartiklarnas funktionssätt i betong kunnat verifieras.

Mikropartiklarna som sådana bidrar inte till bildande av luftporer. Genom omrörning i blandaren tillförs den energi som skapar luftporer. Mikropartiklarna stabiliserar dessa genom sin placering i porernas väggytor. Vid fortsatt omrörning bildas nya luftporer tills jämvikt erhållits mellan mikropartiklarna i vätskefasen och de som befinner sig i luftporväggarna. Därefter tillförs ingen mer luft till betongen - densiteten förblir konstant och den luftmängd som nu finns i betongen är stabil, se fig 2.1.

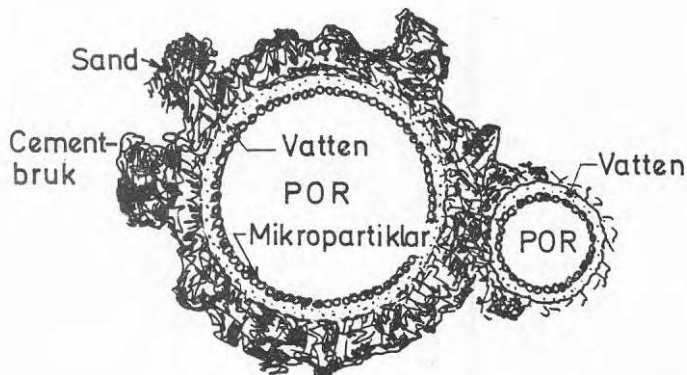


Fig 2.1 Polymera mikropartiklars placering i luftporväggarna förhindrar luft- och ångtransport mellan porerna i den färska betongen

#### 2.5.2 De sammanhållande krafterna i betongen

Luft i cementbruket reducerar densitetskillnaderna mellan ballast och cementbruk. Det ökar också de sammanhållande krafterna i betongen genom de vattenmenisker som bildas mellan partikelfasen (cementkornen, sanden, ballasten). I ett tidigt utvecklingsskede av Cemos 110 utnyttjades enbart de ökade sammanhållande krafterna i betongen som åstadkoms genom den finfördelade luften och det därmed starkt ökade antalet vattenmenisker. Detta var emellertid inte tillräckligt för att förhindra ballasten i betongöverytorna att delvis separera och att åstadkomma en viss "nopprighet" där. På annat sätt har man vid optimeringen av Cemos egenskaper gett dispersionen förstärkt tixotropi. De sammanhållande krafterna är stora då betongen befinner sig i ro. Vid vibrationer löses dessa och betongen flyter ut. Så snart vibrationerna upphör stelnar betongen igen. Denna effekt finns kvar ända tills hydratationsprocessen kommit igång.



Vanliga luftpor- och skumbildare åstadkommer inte samma luftporstabilitet. Porerna blir större och kan lämna betongen. De sammanhållande krafterna i betongen är med större porer betydligt mindre och tixotropieffekten saknas. Just i fråga om transport- och gjutegenskaper skiljer sig 3L-betong med mikropartiklar markant från sådan med konventionella luftbildare.

### 2.5.3 Luftporbildning om ballasten är undergraderad

De luftporer som stabiliseras av de polymera mikropartiklarna förblir vanligen små. Storleken kan emellertid påverkas av den ballast som man använder, av dess kornform och i synnerhet av dess fraktionsammansättning. Om ballasten är undergraderad fattas matrix (cementbruk) för att allt utrymme mellan ballastkornen skall kunna utfyllas. Utan mikropartiklar i betongen erhåller man då en hålrumstruktur. Om det finns tillräcklig mängd polymera mikropartiklar i betongen kommer luftporerna i matrixen att öka i storlek. Dessa förblir emellertid stabila därför att ång- och lufttransporten mellan porerna förhindras. Därmed ökar porvolymen i cementbruket och även restutrymmet kan fyllas. Betongen kan således karakteriseras ha en monolitisk struktur även om den formellt är undergraderad. Detta kan i många sammanhang vara fördelaktigt, i synnerhet om man eftersträvar extremt låg densitet. Man kan därigenom ersätta natursanden i de finare fraktionerna, utan att gjutegenskaperna försämras påtagligt. Den porösa strukturen påverkar emellertid många av betongens egenskaper negativt vilket man måste vara medveten om, t ex sämre vattentäthet, lägre hållfasthet.

### 2.5.4 Vattenabsorption i porös ballast

Filmbildande mikropartiklar enbart förmår inte stoppa eller ens märkbart påverka vattenabsorptionen hos porös ballast. Däremot visar erfarenheterna från en mångfald gjutningar att vattenabsorptionen även i torr lättklinker kommer att upphöra efter kort tid, oftast under betongens blandningstid om lättklinkern befinner sig i mikropartikelbaserat cementbruk.

### 2.6 Effekterna i den hårdnande betongen

Mikropartiklarna förblir i sitt läge i luftporväggarna sedan betongen börjar hårdna. Vid hydratiseringen förbrukas vatten och mikropartiklarna kommer genom denna "inre uttorkning" att förankras i de hydratationsprodukter som befinner sig i porernas omedelbara närhet. "Fria" mikropartiklar finns emellertid kvar i vattnet i kapillärerna. Vid en ytterligare uttorkning kommer även dessa partiklar

att placeras på hydratationsprodukterna i de yttre kapillärerna, se fig 2.2 och bild 2.3, den senare visande hårda formbeständiga MMA-polymerpartiklar.

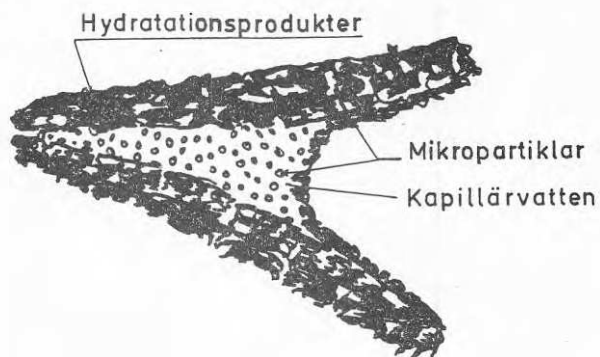


Fig 2.2 Mikropartiklarnas placering på hydratationsprodukterna på de yttre kapillärväggarna

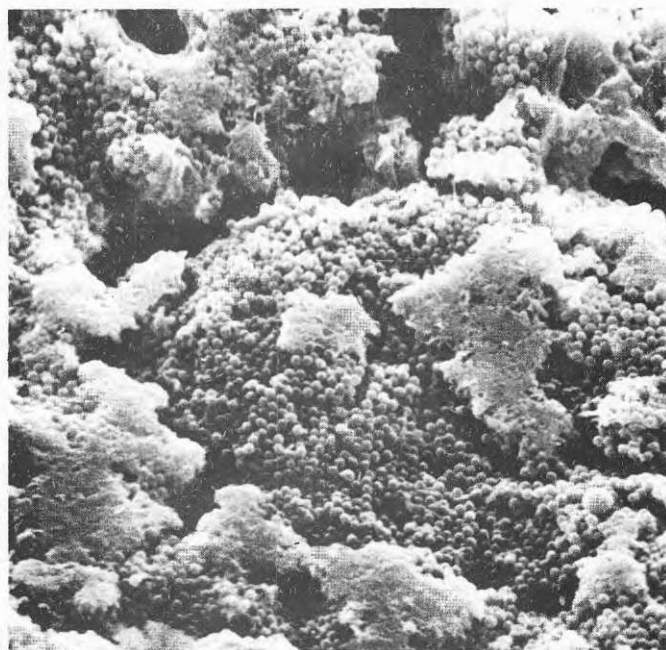


Fig 2.3 SEM-bild av hårda, formbeständiga mikropartiklar i luftporväggarna i 3L-betong

De valda polymererna bildar film vid relativa fuktigheter under 98% RH. Polymererna bildar först film på väggarna i de större porerna därför att här sjunker den relativa fuktigheten först. Man har anledning att förmoda att enskilda partiklar täcker vattenytan i kapillärerna. Filmbildning av dessa partiklar kan sannolikt först ske sedan en viss uttorkning ägt rum. Det är osäkert i vad mån kapillärerna är klädda med polymerfilm och om denna film är väl förankrad i hydrationsprodukterna eftersom den bildas sedan dessa har formats.

## 2.7 Polymerfilmens beständighet i betong

I en förundersökning till projektet "Strukturstabilisering av cementpasta och betong genom polymertillsats" finansierat av Byggeforskningsrådet vid avd Byggnadsmaterial och vid inst för Polymerteknik, CTH, kunde Chandra och Flodin 1980, konstatera att polymerfilmen inte är stabil i den miljö som betongen utgör. Filmen bildar tillsammans med hydrationsprodukterna under inflytande av kalkens fria  $(OH)_2^-$  joner ett nytt material. Denna utveckling går långsamt och ökar successivt 3L-betongens hydrofobitet. Filmen har framställts i laboratoriebetingelser och dess beständighet gentemot olika syror såsom svavelsyra, saltsyra och mjölksyra har visat sig vara mycket god.

## 3 LÄTTBALLASTEN

## 3.1 Fabrikat

Under projekttiden har bara en svensk ballasttyp funnits tillgänglig, nämligen Leca. Vid enstaka tillfällen har också dansk ballast av typ FIBO använts i projektet. Detta har varit vid tidpunkter då Leca har haft störningar i sin produktion och inte har kunnat leverera jämn kvalitet till laboratorieförsöken.

## 3.2 Densitet

70% av volymen i betong utgörs av ballast. Dess densitet är därför av avgörande betydelse för betongdensiteten. Fig 3.1 visar uppmätt densitet i fraktionen 4-12 mm vid olika tidpunkter under projekttiden. Till följd av ändrade lertäkter har densiteten hos denna ballastfraktion ökat med tiden. Medan man från början kunde räkna med betongdensitet ned till  $1000 \text{ kg/m}^3$  med höga krav på betongens gjutegenskaper är  $1100 \text{ kg/m}^3$  den densitet man idag lägst bör räkna med.

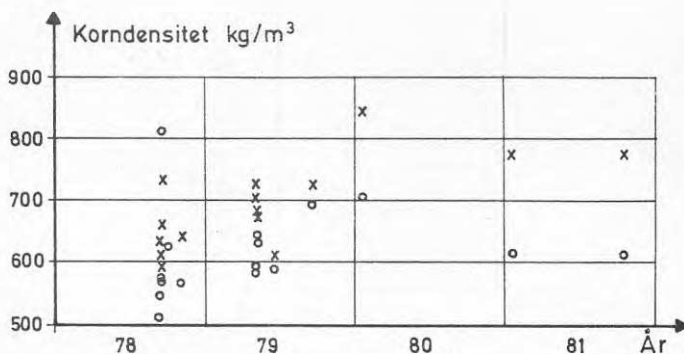


Fig 3.1 Registrerade korndensiteter i levererad lättballast till CTH. (x) avser korndensitet inom fraktionen 4-8, (o) inom fraktionen 8-12 mm. Leveranserna under året 1978 och den första leveransen 1979 var fraktionerat 4-12 mm och siktades vid CTH

## 3.3 Fraktioner

Vid projektets början var fraktionerna 0-4, 4-12 och 12-16 mm tillgängliga på marknaden. 12-16 mm visade sig inte vara lämplig då den gav sämre gjutegenskaper och inte nämnvärd densitetsreduktion.

0-4-fraktionen utgjordes av en varierande andel krossprodukter, som inte är önskvärda i 3L-betongen då de ger okontrollerbar luftporbildning i betongen. Numera levereras siktat material i 2-4 mm fraktion.

Just förhållandet mellan fraktionerna 4-8 och 8-12 mm inom 4-12-fraktionen är av den största betydelse för säkerställande av 3L-betongens gjutegenskaper. Även om Cemos 110 möjliggör undergradering av ballast inom måttliga gränser står det utom allt tvivel att en sådan leder till icke acceptabla variationer i betongens egenskaper - hållfasthet, densitet, deformationer, beständighet - som ingalunda kan accepteras i en löpande betongproduktion till armerade betongkonstruktioner. Fig 3.1 visar också de densitetsvariationer som uppmätts i olika säckar inom samma leverans (framgår i figuren en mångfald registreringar vid samma tidpunkt).

Vid leveranser av fraktionen 4-12 mm har andelen 8-12 mm varierat mellan 15 och 70%. Liknande variationer har förekommit vid leveranser till betongstationer och elementfabriker. Med hänsyn till ovanstående erfarenheter och de konsekvenser dessa kan få för den färska och hårdnade 3L-betongens egenskaper erbjuder idag och i framtiden Icopal/Leca AB sin ballast i fraktionerna 2-4, 4-9, 9-12 mm.

#### 3.4 Fukthalt

Den fukt som finns i ballasten före blandningen av betongen ökar mängden vatten och fukt som skall lämna betongen innan fuktjämvikt återställts i den färdiga konstruktionen. Detta kan resultera i skador, t ex uttorkningssprickor. Cemos 110 gör det möjligt att använda relativt torr lättklinker utan att detta nämnvärt påverkar gjutegenskaperna hos betongen. Med hänsyn till de fördelar som ett torrt bygge innebär bör betongtillverkaren ställa krav på ballastens fukthalt vid leverans och samtidigt se till att ha goda lagringsförhållanden. Den högsta fukthalt som man i framtiden bör acceptera är 10 viktsprocent. Under ett inledningsskede kan ballasttillverkaren ha praktiska svårigheter att uppfylla detta krav, varför en viss förståelse för detta bör iakttas.

#### 4.1 Allmänna grundförutsättningar

Det övergripande målet med en betongproportionering är att den tillverkade betongen skall kunna uppfylla uppställda krav på egenskaper i färskt och hårdnat tillstånd. Sådana krav kan gälla den färska betongens gjutegenskaper, konsistens och sammanhållning, den hårdnade betongens hållfasthet, densitet och beständighet. Valet av betongsammansättning styrs av de fysikaliska lagar som gäller för den totala kornsammansättningen om man skall åstadkomma en monolitisk struktur, samtidigt som även ekonomiska överväganden påverkar proportioneringen. För normalbetongens del anges i B5 betongsammansättningar som uppfyller krav på hållfasthet och konsistens. Med hjälp av förprovning eller baserad på erfarenheter från löpande produktion kan även andra sammansättningar än dessa vara möjliga.

För lättballastbetong gäller allmänt att förutom de krav som gäller för normalbetongen tillkommer även ett krav på betongens densitet, därför att den är bestämmande för konstruktionernas belastning - och i någon mån ändras betongens egenskaper med densiteten. Proportionering av lättballastbetong försvåras därigenom att man använder ballastfraktioner med olika densitet och av att ballastens densitet påverkar såväl betongens hållfasthet som densitet. För 3L-betongens del tillkommer dessutom att kornfördelningen tillsammans med de polymera mikropartiklarnas speciella effekter i den färska betongen påverkar luftporhalten och därmed betongens hållfasthet och i någon mån dess densitet. Det är således betydligt svårare att tekniskt/ekonomiskt optimera betongsammansättningen än det är i normalbetong därför att man har flera inverkanse faktorer.

I Berntsson 1982 ges de allmängiltiga grunderna för hans utvecklade proportioneringsmetod och det tabell- och diagramunderlag som erfordras för denna. Utvärdering av föröksdata från projektet "Kungsbacka Stadshus" visar att metoden är noggrann men något omständlig. Den kommer emellertid att förenklas, så snart det erforderliga försöksunderlaget finns och metoden mera ingående provats i praktiken. Program för proportionering medelst bordsdatorer är för närvarande under utarbetande av Berntsson och Hedberg.

Även om man strikt följer Berntssons proportioneringsmetod är en förprovning av 3L-betongen nödvändig, därför att man måste ta hänsyn till de enskilda lokala produktionsbetingelserna. Med utgångspunkt från resultaten från förprovningen justerar respektive optimerar man betongsammansättningen. Riktlinjer för hur man då skall gå tillväga lämnas av Berntsson 1982 och några riktlinjer är



sammanställda i punkt 4.7. Tre i detalj utförda proportioneringsexempel visas i Appendix i denna rapport.

#### 4.2 BBK's krav på betongens tryckhållfasthet

Hållfasthetsklasserna K8, K12 och K16 enligt BBK 79 är tillämpliga för framställning av 3L-betong eftersom hållfasthetskraven kan uppfyllas inom det aktuella densitetsområdet för denna betong.

I BBK 79 anses hållfasthetskraven uppfyllda om provningsresultaten uppfyller något av de två villkoren benämnda A och B. Villkoret A baseras på serier om minst tre prov och hållfasthetskraven anges i tabell 4.1. Enligt villkor B fordras minst nio prov och man kan då använda den aktuella standardavvikelsen för samtliga enskilda prov för bestämning av fordrat medelvärde på kubhållfastheten. Praktisk erfarenhet från projektet "Kungsbacka Stadshus" visar att i en löpande produktion kommer villkoret B troligen att vara tillämpligt på 3L-betongen om man har en anpassad kontroll av betongens delmaterial. De angivna värdena i tabell 4.1 kolumn 3 kan anses vara realistiska i en löpande fabrikstillverkning.

Tabell 4.1 Fordrat medelvärde på kubhållfasthet (MPa) i olika hållfasthetsklasser enligt BBK 79's villkor A. Fordrat medelvärde enligt villkor B baseras på en uppskattning av hållfasthetens standardavvikelse i löpande produktion.

Hållfasthetsklass	Villkor A		Villkor B
	> 3 prov	> 9 prov	> 9 prov
K8	12	11	10,5
K12	16	15	14,5
K16	20	19	18,5

I BBK 79 finns även angivet fordrat hållfasthetsvärde för enskilda prov. Dessa krav behandlas inte i denna rapport.

#### 4.3 BBK's krav på betongens densitet

Några villkor för valet av lättballastbetongens densitet har inte uppställts i BBK 79. Konstruktören äger därför full frihet att välja den betongdensitet han önskar med hänsyn till konstruktionens utformning

och funktion. Ekonomiska bedömningar kan vara av betydelse vid detta val. Han måste emellertid vara medveten om de praktiska begränsningar som föreligger. Riktlinjer för konstruktörens val av hållfasthetsklass och betongdensitet ges i kapitel 8.1.

I BBK 79 anges villkor för variation i betongdensitet. Denna bestäms vid normal tidsålder (28 dygn) på serier om tre prov, varvid medeldensiteten inte får överstiga fordrat värde och inte underskrida detsamma med mer än  $150 \text{ kg/m}^3$ . På samma sätt som för hållfastheten finns villkor för enskilt prov.

#### 4.4 Betongdensitet vid olika ålder

3L-betongens densitet varierar efter de fuktförhållanden som råder i omgivningen. I normala fall har 3L-betongen den högsta densiteten i färskt tillstånd. Med stigande ålder sker en uttorkning och densiteten minskar som följd härav. Olika lättballastmaterial kan från början innehålla vatten som kan ligga i området 5 till 100 viktsprocent. För lättklinkerballast är fuktkvoten sällan mer än 30 och vid framtida svenska leveranser mindre än 10 viktsprocent. Utgångsfukthalten i lättballasten måste beaktas vid proportioneringen. Vid fuktkvot < 10 viktsprocent och normenlig lagring av provkropparna kan följande definitioner och samband anges:

- $\rho_F$  = Den färska betongens densitet - Utnyttjas vid proportionering, utgångsvärde för beräkning av formtryck och formbelastning
- $\rho$  = Betongdensitet efter 28 dygn normallagring - Äsyftad densitet enligt BBK 79, utgångsvärde för belastningar angivna i Svensk Byggnorm 80 ( $\rho = \rho_F - 40 \text{ kg/m}^3$ ).

#### 4.5 Ballastmaterial

Ballastmaterialet består av normalsand eller -grus och av lättballast. Eftersom erfarenheterna vid tillverkning av 3L-betong huvudsakligen baseras på användning av lättklinker gäller nedanstående definitioner och anvisningar enbart detta material.

Av praktiska skäl indelas ballasten på följande sätt:

- Sand: Natursand med kornstorlek < 2 mm kan anses vara bäst lämplig. Även natursand och -grus med kornstorlek > 2 mm kan användas, men detta ökar naturligtvis betongens densitet.



**Lättballast:** Undre kornstorleksgräns har fixerats till 2 mm. Även om mindre mängd lättballast < 2 mm kan förekomma i leveranserna. Övre gräns kan variera, exempelvis 8 (9), 12, 16 mm. Praktiskt väljer man inte största kornstorlek större än 12 mm.

**Finbruk:** Det bruk i betongen som innehåller partiklar med största kornstorleken 2 mm. Vid proportioneringen utnyttjas volymen av finbruket för uppskattning av luftporvolymen.

**Grovbruk:** Det bruk i betongen som innehåller partiklar större än 2 mm. Volymen av grovbruket används för uppskattning av betongens hållfasthet.

Denna indelning för bruket i betongen har gjorts därför att gränserna för partikelstorleken i natursand och -grus och för lättballasten inte alltid strikt kan sättas till 2 mm.

Betongbestämmelsernas krav på egenskaperna hos natursanden respektive -gruset gäller allmänt, men för 3L-betongens egenskaper har olika delfraktioner större betydelse än man är van vid då det gäller normalbetongens proportionering. För luftporbildningen är delfraktionen 0,25-0,5 mm av väsentlig betydelse. Ju större denna fraktion är, desto större stabil luftporvolym förmår betongen uppta. Denna delfraktion ger dessutom luftporerna en ur beständighetssynpunkt optimal storlek. Mängden natursand inom delfraktionen 0,25-0,5 mm bör ligga mellan 15 till 30% av sandmängden < 2 mm. Det mindre värdet avser betong med stor sandvolym, dvs betong med hög densitet ( $\approx 1300 \text{ kg/m}^3$ ).

Kornfraktionen < 0,125 mm befrämjar inte luftporbildningen. Halten av denna fraktion bör begränsas, då den enbart är vattenkrävande. Normalt har den betydelse för vattentätheten och halten partiklar < 0,25 mm inklusive cement är då viktig. För 3L-betong som innehåller relativt hög cementmängd ( $> 300 \text{ kg/m}^3$ ) samt hög luftporvolym ( $> 8\%$ ) är finpartikelhalten av underordnad betydelse. Andelen korn < 0,125 mm skall helst understiga 15%.

Lättballastens kornfördelning bör följa så nära som möjligt nedan angivna värden:

Max korn- storlek	Volymandelar (%) av fraktion			
	2-4 mm	4-8 (4-9) mm	8-12 (9-12) mm	12-16 mm
8	60	40	-	
9	55	(45)	-	
12	45	38 (43)	17 (12)	
16	40	33 (40)	17 (10)	10

Bestämning av lättballastens korndensitet och skrymdensitet kan lämpligen ske enligt de metoder som beskrivs i kap 5.

Tillgängligt lättballastmaterial har stor betydelse för möjligheten att uppnå optimala egenskaper hos 3L-betongen i såväl färskt som hårdnat tillstånd. Betong med låg densitet fordrar lättballast med låg korndensitet. Med en lättklinker som finns på den svenska marknaden är det svårt att åstadkomma en betong med densitet under  $1150 \text{ kg/m}^3$  som samtidigt uppfyller CTH-gruppens krav på goda gjutegenskaper hos den färska betongen och homogenitet, hållfasthet, beständighet och täthet hos den hårdnade betongen.

#### 4.6 Exempel på betongsammansättning

Nedan ges tre exempel på betongsammansättningar för olika betongkvalitet. Dessa kan utgöra utgångsvärden för kostnadskalkyler. Exemplet förutsätter följande:

Lättballast 2-4 mm:	skrymdensitet	450 $\text{kg/m}^3$
	korndensitet	780 "
4-8, 8-12 mm:	korndensitet	380 "
	korndensitet	680 "

och en fukthalt i ballasten 10 viktsprocent.

Konsistensen för den färska betongen kan antas motsvara de värden som anges under punkt 6.2.

Betongkvalitet K8,  $\rho = 1150 \text{ kg/m}^3$

Cement		315 $\text{kg/m}^3$	
Sand		265 "	
Lättklinker	2-4 mm	200 "	
	4-8 (9) mm	145 "	(165)
	8 (9)-12 mm	75 "	(55)
Vatten		170 "	
Cemos		10 "	
Luft		110 $1/\text{m}^3$	

Betongkvalitet K12,  $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$

Cement		325	$\text{kg/m}^3$	
Sand	0-2 mm	355	"	
Lättklinker	2-4 mm	190	"	
	4-8 (9) mm	135	"	(155)
	8 (9)-12 mm	60	"	(42)
Vatten		170	"	
Cemos		10	"	
Luft		95	$\text{l/m}^3$	

Betongkvalitet K16,  $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$

Cement		350	$\text{kg/m}^3$	
Sand	0-4 mm	405	"	
Lättklinker	2-4 mm	185	"	
	4-8 (9) mm	130	"	(150)
	8 (9)-12 mm	60	"	(42)
Vatten		175	"	
Cemos		11	"	
Luft		85	$\text{l/m}^3$	

#### 4.7 Riktlinjer för justering av betong-sammansättningar efter förprovning

Sedan man utfört en proportioneringsberäkning och en förprovning av materialet kan det sannolikt vara motiverat att företa en justering eller optimering av betongsammansättningen så att kraven på betongkvalitet uppfylls med rimliga marginaler. Nedanstående riktlinjer kan vara till hjälp i detta sammanhang:

##### - Om man önskar reducera betongens densitet

Man ökar lämpligen halten lättballast. Denna åtgärd sänker samtidigt betongens hållfasthet och försämrar vanligen betongens gjutegenskaper.

##### - Om man vill höja betongens hållfasthet

Höjning av cementhalt eller reduktion av vattencementtalet medför bara obetydlig hållfasthetsökning och den sistnämnda åtgärden påverkar starkt betongens gjutegenskaper. Man kan öka natursandhalten, eller övergå från natursand i fraktionerna 0-2 mm till 0-4 mm. Denna åtgärd ökar samtidigt betongens densitet.

##### - Om man vill förbättra gjutegenskaperna

Ett höjt vattencementtal ger ökad porvolym och ökad porstorlek. Detta ger en lösare konsistens och skenbart förbättrade gjutegenskaper. Samtidigt minskar de sammanhållande krafterna i betongen. Man får därmed svårigheter att undvika "nopprighet" i betongens överyta. Hållfastheten sjunker och beständighetsegenskaperna försämras. Ett vattencementtal över 0,55 bör undvikas.

Gjutegenskaperna kan förbättras om man ökar halten natursand i fraktionsområdet 0,25-0,5 mm, vilket medför ökad halt finfördelade porer. Åtgärden påverkar i liten grad betongens densitet och hållfasthet.

Ökad mängd Cemos 110 ökar också mängden finfördelade porer. De sammahållande krafterna ökar, betongen blir mera tixotrop. Åtgärden medför något reducerad hållfasthet.

Vid justering av betongsammansättningen på basis av förprovningensresultaten skall man uppmärksamma att det är svårt att höja betongens hållfasthet om man samtidigt skall sänka dess densitet. Den justering man kan åstadkomma i detta avseende är marginell.

Om förprovningen skulle visa att de ställda kraven på hållfasthet och densitet är svåra eller omöjliga att uppfylla bör man samråda med konstruktören om ändrade krav är möjliga. I detta sammanhang är det oftast enklast att bibehålla hållfasthetskravet och tillåta användning av en något tyngre betong därför att en densitetsändring - inom rimliga gränser - bara marginellt ändrar belastningen på konstruktionen.

## 5 PROVNING OCH KONTROLL

Under en inkörningstid kan det vara nödvändigt att man har en intensivare provning. Utrustning, ingående material och arbetsrutiner bestämmer den spridning som provningarna kommer att uppvisa. Om spridningen är stor kan det därför vara skäl att se över sina produktions- men även kontrollrutiner. Provningsintensiteten måste självklart väljas större vid stor spridning än i sådana fall då materialen visar en jämn kvalitet.

## 5.1 Ballastprovning

## 5.1.1 Fukthalt

Fukthalten kan bestämmas enligt SS 13 21 13. Fukthalten är viktig att känna då den - i synnerhet om volymdosering av ballasten inte kan tillämpas i betongstationen - i hög grad påverkar betongens proportioner.

## 5.1.2 Kornfördelning

Om lättballasten levereras fraktionerat 2-4, 4-8(9) och 8(9)-12 mm kan provningen utgå, eller bara tillgripas om ballasten uppvisar stor halt krossprodukter. I fall då lättballasten levereras i fraktionen 4-12 mm är provningen av denna fraktion mycket betydelsefull. Den natursand som ingår i betongen skall provas, då lättballastens sammansättning i viss mån påverkas av natursandens kornfördelning.

## 5.1.3 Korndensitet

Provningen baseras på DIN 4226 blad 3 då denna metod har ansetts vara mest tillförlitlig samtidigt som den är enkel att utföra.

Ur ett större genomsnittsprov som torkats till jämvikt vid 105°C uttages ett prov vars vikt (G) bestäms med en noggrannhet av 1 g. Vid skrymdensitet < 0,8 kg/dm<sup>3</sup> erfordras ca 150 g ballast.

Efter avsvälning besprutas provet med en vattenavvisande vätska t ex fotogen så att alla ytor är täckta av en tunn film. Provet hålls i en mätcylinder med 1000 cm<sup>3</sup> volym, som till 500 cm<sup>3</sup> fyllts med vatten. Uppflytande ballastkorn hindras att flyta upp medelst en styv perforerad platta med känd volym (V<sub>s</sub>). Totalvolym (V) avläses.

$$\text{Korndensitet} = \frac{G}{V - (V_s + 500)} \text{ g/cm}^3$$

Medelvärdet av tre mätningar anger korndensiteten.

#### 5.1.4 Skrymdensitet

Skrymdensitetsprovningen är enkel att utföra och således lämplig för snabb kontroll av lättballastleveranserna. För detta ändamål används en 10-12 l hink med känd vikt och volym som fylls med lättballast, skakas väl och därefter avjämnas över ytan med en linjal. Hinken med innehåll väges.

#### 5.2 Betongprovning

##### 5.2.1 Densitet, färsk betong

Provning kan ske enligt den metod som beskrivs i B5.

##### 5.2.2 Konsistens

Utbredningsmått enligt DIN 1048 blad 1 har visat sig vara mest ändamålsenligt för bestämning av 3L-betongens konsistens, se fig 5.1.

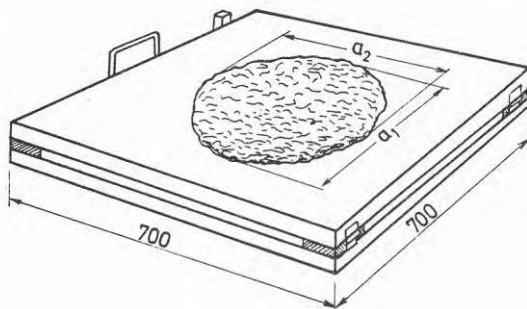


Fig 5.1 Fallbord för bestämning av betongs utbredningsmått enligt DIN 1048 blad 1

Utrustningen består av ett fallbord med area 700 x 700 mm med gångjärn på ena sidan och ett handtag på andra. Lyfthöjden är genom en spärr begränsad till 40 mm. Bordets överdel skall väga 16 kg, överytan utgörs av en 2 mm tjock plåt. Mittpunkten markeras med ett kors parallellt med kanterna och en cirkel med 200 mm diameter ritas in runt denna mittpunkt. Vidare används en stympad kon av 2 mm plåt med höjden 200 mm, övre diameter 100 mm. Konen är upptill försedd med två handtag och den nedre kanten med två fotstöd. En trästamp med ändarean 40 x 40 mm används.

Vid provningen ställs fallbordet på ett fast, vågrätt underlag. Bord och kon fuktas före provningen. Konen ställs mitt på bordet och fylls med betong i två omgångar som vardera komprimeras med 10 lätta stötar med trästampen. Betongytan avjämnas och efter 1/2 minut lyfts plåtkonen försiktigt rakt upp. Överdelen av bordet lyfts sedan upp mot spärren



och får falla fritt. Detta upprepas 15 gånger under 15 sekunder. Härvid breder betongen ut sig. Utbredningen anges som medelvärdet av två mätningar (U) mm av diametern  $a_1$  och  $a_2$  i fig 5.1 parallellt med bordets kanter. Utbredningsmättet anges i mm.

Betongen skall efter provningen vara homogen och ha en god sammanhållning.

### 5.2.3 Tryckhållfasthet

Enligt SS 13 72 10 och 13 72 11. Då 3L-betongens hållfasthetstillväxt är snabbare än normalbetongens kan en provning vid 3 och 7 dygns ålder ge tillförlitlig indikation om hållfastheten vid normaltidsprovningen.

### 5.2.4 Densitet, hårdnad betong

Provningen kan utföras enligt SS 13 72 17 med reservation för klimatet som bör ligga runt 20°C 50% RH i lagringsutrymmet för provkropparna.

Den nominella densiteten är enligt BBK 79 den som man fastställer enligt SS 13 72 17 på provkroppar vid 28 dygns ålder. Vid den tidpunkt då BBK 79 skrevs antogs att fukthalten i ballasten för leveranser till 3L-betong inte skulle överstiga 10 viktsprocent. Senare erfarenheter från projektet "Kungsbacka Stadshus" har visat att fukthalter upp till 30% kan förekomma. Detta medför att den fukt som under 28 dygn kan torka ut bara är en del av den totala fukten i ballasten. Provningen blir missvisande under sådana betingelser. Om man uppfyller det formella densitetskravet enligt BBK 79, kan det vara svårt att klara hållfasthetskravet, därför att den verkliga betongdensiteten är lägre än den uppmätta.

### 5.3 Kontroll av delmaterialförbrukning

De förbättrade beständighetsegenskaperna hos 3L-betongen beror på användning av polymera mikropartiklar och förutsätter att det finns tillräckligt mycket partiklar i betongen så att en bra porstruktur kan bildas och att por- och kapillärväggarna kan beläggas med en polymer film. I likhet med annan betong är det viktigt att det finns tillräcklig mängd cement samt att vattencementtalet är lågt. Det torde dock ligga i företagets intresse att välja en betong med en väl sammansatt ballastkornfördelning, med föreskriven mängd Cemos och cement. Denna betong har goda beständighetsegenskaper. Dess gjutegenskaper är de bästa och leder till de lägsta kostnaderna för betongens hantering och gjutning. Då risken ändå kan finnas att någon kan förledas till underdosering av den betydelsefulla mängden CEMOS,

torde det vara nödvändigt med en kontroll av inköpt material, förbrukning och utgående mängd produkter i 3L-betong. Hur denna kontroll skall utformas bör bestämmas av berörda myndigheter i samråd med tillverkarna i avvaktan på utarbetande av fasta regler.



## 6 TILLVERKNING, TRANSPORT OCH GJUTNING

## 6.1 Allmänt

I princip gäller att samma tillverknings-, transport- och gjututrustning som den för normalbetongen kan användas. I Delcon AB's "Råd och anvisningar för betongtillverkning" har sammanställts några allmän-giltiga råd och tips hur tillverkningen bäst går till. I samband med pågående arbeten på Kungsbacka Stadshus har många erfarenheter med 3L-betongen i praktisk applicering erhållits och kommer att publiceras i samband med slutrapporteringen av det projektet. I denna rapport ges därför bara enkla minnesanteckningar som baseras på erfarenheterna i laboratorieverksamheten.

## 6.2 Tillverkning

- Lättballasten bör volymdoseras då densitetsvariationer aldrig helt kan undvikas. Viktdosering enbart leder till ökade kostnader för betongtillverkaren då kontrollen av ballast och betong måste utökas.
- Tvångsblandare och frifallsblandare kan användas, den förra är dock bättre och snabbare.
- Blandningstiden är något längre än för vanlig betong. Det tar tid att generera luftblåsorna i betongen.
- Om effektmätning av tillförd energi till blandaren används för konsistensmätning görs måste denna omkalibreras med hänsyn till 3L-betongens lägre motstånd i blandaren.
- Blandningen kan avslutas sedan uppmätt effekt till blandaren stabiliserats på en konstant nivå.
- En 3L-betong har acceptabel sammansättning och goda gjutegenskaper om den uppvisar ett utbredningsmått av

380-410 mm	för en	1300 kg/m <sup>3</sup>	betong	
370-410 "	"	"	1200 "	"
355-395 "	"	"	1100 "	"
345-380 "	"	"	1000 "	"

(jfr Berntsson, 1982)

om den efter skakning har full sammanhållning och inga sprickor i betongmassan.

### 6.3 Transport

- Den låga egentygnden hos 3L-betongen möjliggör fördubblad transportvolym vid oförändrad lyftkapacitet eller axeltryck. Om utrustningen har dimensionerats för transport av normalbetong är ofta dimensionerna överdimensionerade, utrustningen är tyngre än erforderligt vilket leder till reducerad transportvolym för 3L-betongen.
- I betong med föreskriven sammansättning föreligger ingen separationsrisk.
- Betongens tixotropi kan i speciella transportutrustningar t ex baskarna leda till att den kan fastna. Vibrering kan tillgripas för att få betongen flytbar igen.
- Pumpning av 3L-betong har hittills inte lyckats.

### 6.4 Gjutning

- Vid all hantering och gjutning måste man ta hänsyn till de speciella egenskaperna hos 3L-betongen - tixotropin och lättheten.
- Som i all lättballastbetong dämpas vibrationer snabbare, vibrostavnadsticken måste vara tätare än i normalbetong om man inte kan utnyttja formar, armering etc för att sprida vibrationerna.
- Om ingen bearbetning av överytan görs kommer en viss nopprighet att vara kvar efter komprimeringen till följd av lättballastens strävan att separera.
- Vid stålslipning av 3L-betongens överytor måste man utnyttja betongens tixotropi.
- 3L-betongen kan vakuumsugas, dess struktur är synnerligen väl lämpad för detta.
- Vid väggjutningar kan man öka stighastigheten i formarna avsevärt på grund av den låga egentygnden och betongens tixotropi.
- Om formvibratorer används på horisontella formar måste man ibland reducera den tillförda energin, då den lätta 3L-betongen kan kastas ur formen.
- Vid användning av vibrobrygga kan gjutkapaciteten ökas jämfört med normalbetong.

## 7 HÄRDNING

### 7.1 Tillstyvnad

Genom sin tixotropi kan 3L-betongen ge sken av tillstyvnad i ett tidigt skede. Vid rörelse får betongen åter sin lösa konsistens.

Någon förändring av cementets bindetid har inte konstaterats, då Cemos 110 är ett fysikaliskt verkande ämne. De kemiska reaktionerna vid cementets hydratisering påverkas således inte.

Den runda, småkorniga ballasten som är omgiven av luftporer gör att det kan dröja något längre innan man kan gå på betongen vid efterarbeten efter gjutning. Vid vanlig betong går man mera "på sten".

### 7.2 Temperatur vid härdning

När man planerar sina gjutningar måste man ha i minnet att 3L-betongens värmelagringsförmåga per volymenhet är bara hälften av den vanliga betongen. Samtidigt är värmeledningsförmågan sämre. Vid gjutning i kallt väder kan man riskera stora temperaturförluster i tunna 3L-betongkonstruktioner, och i tjocka kan det var fara för att ytskikten fryser. Vid gjutning i höga temperaturer kan temperaturerna i betongen stiga betydligt mer än man är van vid till följd av hydratationsvärme och den lägre värmekapaciteten. I det senare fallet ökar risken för ytsprickor i 3L-betongen i tidig ålder.

### 7.3 Fuktförhållanden vid härdning

All betong måste skyddas mot för snabb uttorkning i det tidiga härdningsskedet. Man bör i detta sammanhang påpeka att stora temperaturgradienter vid låga temperaturer kan leda till svår uttorkning. Således skall man vid svår kyla skydda betongen inte bara mot låga temperaturer, utan även mot uttorkning. Under normala och varma betingelser bör man vattna 3L-betongen under de första två dygnet.

Den polymera filmen bildas då den relativa fuktigheten sjunker under 98%. Det kan ur flera synvinklar vara fördelaktigt om man påbörjar uttorkningen av 3L-betongen relativt tidigt eller att man använder membranhärdare. På så sätt erhåller man en snabbare uttorkning av konstruktionen och kan därmed reducera byggtiden.

## 7.4 Hållfasthetstillväxten

3L-betongen har något högre cementhalt än den som vanligen förekommer i normalbetong. Dess värmekapacitet per volymenhet är som nämnts bara hälften. Den hydratationsvärme som utvecklas kommer att vara större och temperaturutvecklingen snabbare i tidig ålder än i normalbetong. Detta leder till snabbare hållfasthetsutveckling för cementbruket i 3L-betongen, åtminstone om lufthalten i bruket inte är för stor. Vid låga hållfastheter motsvarar brukets hållfasthet betongens, Berntsson, 1982. I 3L-betongen når man tidigare den gräns då ballastens hållfasthet är bestämmande och då betongens hållfasthet bara stiger måttligt som följd av stigande brukshållfastheter.

Av dessa orsaker kommer hållfastheten i tidig ålder i 3L-betong med optimal betongsammansättning även i absoluta siffror mätt ofta att vara större än i normalbetong, och hållfasthetsutvecklingen relativt 28-dygnshållfastheten vara betydligt snabbare.

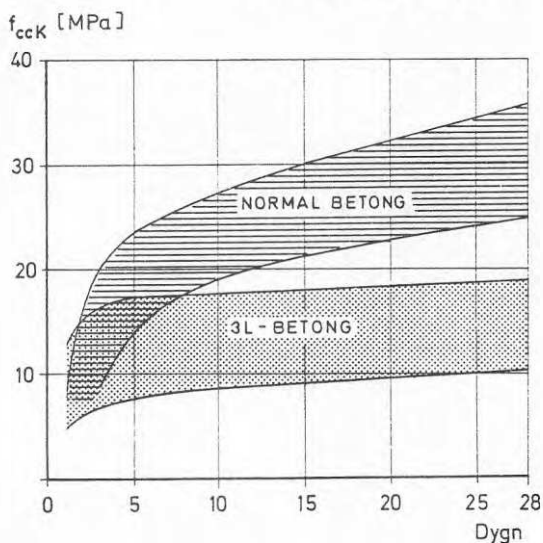


Fig 7.1 Tryckhållfasthetsutvecklingen i absoluta siffror i normal- och 3L-betong av varierande kvalitet. 150 mm kuber lagrade i 20°C

I fig 7.1 och 7.2 visas hållfasthetsutvecklingen i oisolerade kuber lagrade i 20°C. Man får härav inte dra för långtgående slutsatser för betong härdad under andra förhållanden därför att hållfasthetstillväxten är beroende av en rad faktorer såsom utgångstemperatur hos den färskbetongen, dess behandling, lufttemperatur, isolering, formtyp, betongdimensioner osv. Om man vill utnyttja 3L-betongens snabba hållfasthetstillväxt fordras att man säkert kan förutsäga hållfastheten i konstruktionen. Man bör ovillkorligen ha provningssystem och -rutiner som

garanterar tillräcklig säkerhet vid avformning.  
 Detta gäller såväl för 3L- som för normalbetong.

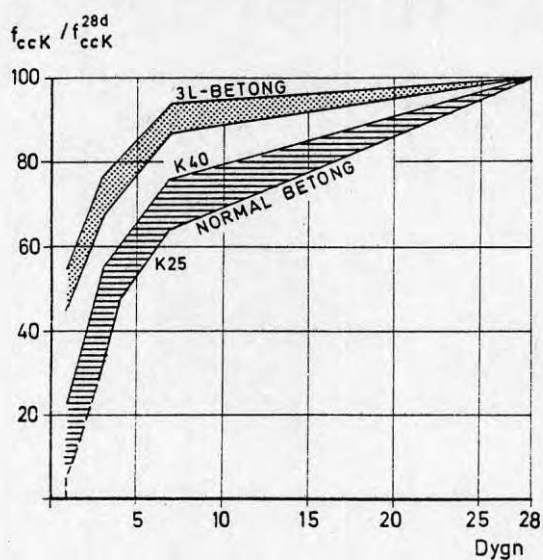


Fig 7.2 Hållfasthetsutvecklingen i relation till 28-dygnshållfastheten i normal- och 3L-betong av varierande kvalitet 150 mm kuber lagrade i 20°C

## 8.1 Sambandet tryckhållfasthet/densitet

I fig 8.1 visas registrerad tryckhållfasthet baserad på 150 mm kuber och densiteten av dessa kuber lufttorrt lagrade. Varje punkt avser medelvärdet av en serie på tre kuber. Punktskaran beskriver inte försök med strävan att uppnå så hög hållfasthet som möjligt, men ger en bild av det material som använts i projektet. Med hänsyn till förhållanden i laboratoriet med bara en och högst två gjutningar per dag, med relativt små ballastförsändelser och därmed ofta ändrade ballastkvaliteter vore det överambitiöst att dra för långtgående slutsatser på basis av detta försöksunderlag. I samband med utvärderingen av projektet "Kungsbacka Stadshus" kommer omfattande analyser av erfarenheterna med 3L-betongen i löpande produktion att publiceras.

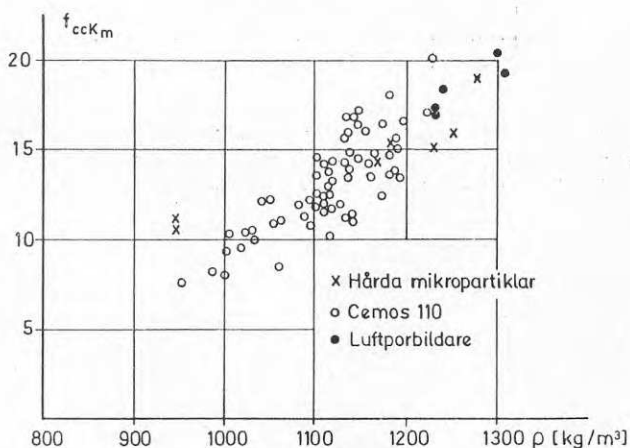


Fig 8.1 Registrerad kubhållfasthet och densitet på lufttorrt lagrade 150 mm kuber. Varje punkt avser medelvärdet av 3 kuber

Man kan dock konstatera följande:

- Med det ballastmaterial vi har idag i Sverige är det orealistiskt att räkna med nominella betongdensiteter under  $1100 \text{ kg/m}^3$  i armerade konstruktioner
- De tryckhållfastheter man kan räkna med motsvarar för en

1100 $\text{kg/m}^3$	betong	hållfasthetsklassen	K 8	enl	BBK 79
1200 "	"	"	K12	"	" "
1300 "	"	"	K16	"	" "

- Förutsättningen för att de ovan ställda hållfasthetskraven skall kunna uppfyllas är väl sammansatt betong med liten hållfasthetsspridning vilket



förutsätter en lämplig uppdelning av ballastfraktionen 4-12 mm

- Man kan utläsa av provningsresultaten att typen mikropartiklar knappast kan påverka hållfastheten hos 3L-betongen. Luftporbildare av traditionell typ ger samma hållfasthet men det är svårt att åstadkomma densiteter under  $1250 \text{ kg/m}^3$  med motsvarande gjutegenskaper
- En jämförelse med uppmätta värden ur tyska litteraturkällor visar att de högsta hållfasthetsvärdena som uppmättes i CTH-försöken nära överensstämmer med motsvarande i tyska försök i vilka olika luftporbildare och skumbildare hade använts.

Vid konstruktionsarbete baserat på reglerna angivna i BBK 79 bör följande synpunkter beaktas av myndigheter och byggandets parter:

För 3L-betongen är idag bara tre hållfasthetsklasser aktuella. Dessa är K8, K12 och K16. Detta innebär stora relativa skillnader mellan hållfasthetsklasserna. Att byta från K8 till K12 betyder en 50% ökning av hållfasthetskravet. Det vore därför önskvärt att få arbeta med hållfasthetsklassindelningen K8, K10, K12, K15 och K20. Det skulle bättre motsvara de relationer som man har för normalbetong i hållfasthetsområdet K20 till K30.

Beräkningsreglerna i BBK 79 och CEB/FIP Model Code för armerade konstruktioner baseras alla på värden på betonghållfasthetens spridning i löpande produktion och en ansevärd mängd normalbetongprovningar utgör underlaget för detta antagande. Man antager att tryckhållfasthetens standardavvikelse är lika för samtliga hållfasthetsklasser 5 MPa. För en 3L-betong ger detta antagande helt orealistiska konsekvenser. För en K8-betong kommer därmed medelvärdet att ligga på 16 MPa och den övre 5%-fraktilen på 24 MPa vilket är omöjligt att nå i densitetsområdet  $1000-1300 \text{ kg/m}^3$ . Detta påverkar i många avseenden de beräknande materialparametrarna och i de flesta fall missgynnas 3L-betongen. Det är av högsta angelägenhet att så mycket underlag från praktisk 3L-betonganvändning kan tillföras den databank som upprättats vid Byggnadsmaterial, CTH, så att en säkrare standardavvikelse snabbt kan tillämpas.

## 8.2 Spräckdraghållfasthet

Betongens draghållfasthet fastställs vanligen indirekt genom spräckdragprovning, varvid draghållfastheten vid ren dragning utgör ca 65% av draghållfastheten fastställd vid spräckprovning.

Enligt CEB/FIP Model Code och BBK 79 definieras draghållfasthetens medelvärde  $f_{ctm}$  såsom

$$f_{ctm} = 0,30 \left( 0,3 + 0,7 \frac{\rho}{2400} \right) f_{cck}^{2/3} \quad (8.1)$$

och dess karakteristiska värde  $f_{ctk}$

$$f_{ctk} = 0,21 \left( 0,3 + 0,7 \frac{\rho}{2400} \right) f_{cck}^{2/3} \quad (8.2)$$

Enligt Berge 1981 är det bästa sambandet för spräckdraghållfastheten  $f_{ctm}^s$

$$f_{ctm} = \left( 0,07 + 0,93 \frac{\rho}{2400} \right) f_{ccm}^{1/3} \quad (8.3)$$

och detta baserades på ett försöksunderlag av 100 egna försöksresultat och Skarendahls 1973 106 försök. Ekv (8.3) avser cylinderhållfastheten  $f_{ccmC}$ . Transfererad till kubhållfasthet  $f_{ccmK}$  där  $f_{ccmC} = 0,85 f_{ccmK}$  får vi

$$f_{ctm} = 0,95 \left( 0,07 + 0,93 \frac{\rho}{2400} \right) f_{ccmK}^{1/3} \quad (8.4)$$

I fig 8.2 är sammanställd uppmätt spräckdraghållfasthet vid ca 7-28 dygns ålder fastställt på lufttorrt lagrade kuber. Provningsförfarandet har varit ungefär detsamma som tillämpades i Berges 1981 och Skarendahls 1973 försök och försöksunderlaget är direkt jämförbart. Varje punkt i diagrammet avser 3 st prover för spräckdraghållfastheten respektive tryckhållfastheten. Densiteten är dock medelvärdet av samtliga sex kuberna.

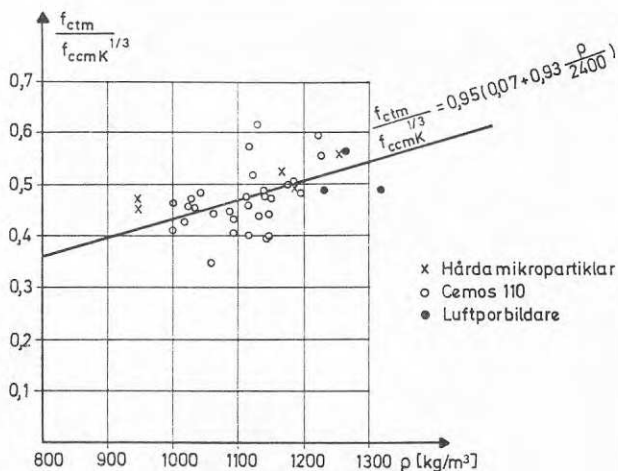


Fig 8.2 Relationerna mellan spräckdraghållfasthet  $f_{ctm}$ , tryckhållfasthet  $f_{ccmK}$  och betongdensitet  $\rho$

Fig 8.2 visar att samma samband som fastställdes i Berge 1981 ger en bra överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta värden. Spridningen är av samma storleksordning som i det andra försöksunderlaget. Man kan därför utgå från att samma förhållanden råder mellan 3L-betongens draghållfasthet och dess tryckhållfasthet och densitet som i konventionell lättballastbetong.

Reservationen i Berge 1981 att man i BBK 79 och CEB/FIP Model Code inte valt det uttryck som ger bäst överensstämmelse och minst spridning kvarstår emellertid.

### 8.3 Arbetskurvan vid fri och förhindrad tvärutvidgning

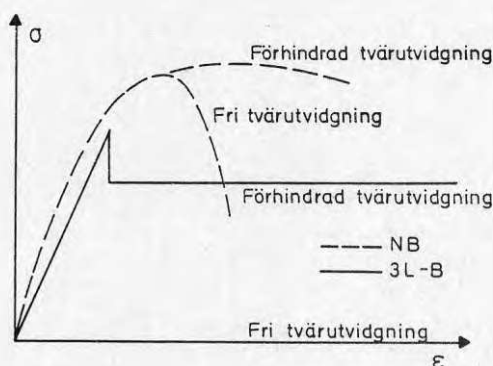


Fig 8.3 Arbetskurvorna för centriskt tryckta cylindrar för normal- och 3L-betong med fri respektive förhindrad tvärutvidgning

3L-betongen och normalbetongen har principiellt olika arbetskurvor vilket torde framgå av fig 8.3 och rapport B 82:3.

#### För normalbetong gäller:

Normalbetongens arbetskurva har en avrundad form upp till maximalpåkänningen. Detta ger utrymme åt hysteresiseffekter, svängningar kan dämpas. Sedan maximalpåkänningen uppnåtts är arbetskurvan för låghållfast betong långsamt sjunkande, dvs ett segt förlopp, medan höghållfast normalbetong har en snabbt sjunkande arbetskurva, dvs ett sprött brott.

Vid förhindrad tvärutvidgning hos normalbetongen kan maximallasten höjas. Detta är mest kännetecknande för låghållfast betong, som erhåller ett mycket segt deformationsförlopp. Motsvarande hos höghållfast betong är obetydlig höjning av hållfastheten genom förhindrad tvärutvidgning och ett relativt sprött brott.

### För 3L-betongen gäller:

Kännetecknande för 3L-betongens arbetskurva är att den går nära rätlinjigt upp till maximalpåkänning, vilket ger mindre utrymme för hysteresiseffekter. Därefter visar arbetskurvan ett nära idealplastiskt förlopp. Nivån för den plastiska delen av arbetskurvan beror på de sammanhållande krafterna i tvärled. Om ingen sådan finns torde sannolikt arbetskurvan vara triangulär vid centrisk belastning. Kännetecknande är dessutom att ingen eller bara obetydlig höjning av hållfastheten kan åstadkommas genom förhindrad tvärutvidgning.

3L-betongens arbetskurva indikerar att betongen har liten dämpande förmåga i det elastiska området. I det plastiska området torde 3L-betongen - om tvärutvidgningen kan förhindras - vara en bra energiabsorbator. En varning måste dock utfärdas mot användning av 3L-betongen i sådana konstruktioner där man utnyttjar betongens förhöjda hållfasthet i det triaxiella tillståndet, t ex i ofullständiga leder, vid pelarhuvuden i pelardäck.

#### 8.4 Elasticitetsmodul

I Berge 1981 erhöles ett regressions samband för vanlig lättballastbetong baserat på ett hundratal försök till

$$E_{cm} = 3,5\rho f_{cm}^{1/3} \quad (8.5)$$

Baserat på tre resultat med 3L-betong baserad på hårda mikropartiklar och med ett antal tyska försök i samma densitetsområde kunde i Berge et al 1978 visas att denna formel även gav bra överensstämmelse för betong med låg densitet. Av denna anledning ansågs vidare försök inom projektet vara överflödiga.

Det kan emellertid vara nödvändigt att påpeka att om man utnyttjar BBK 79's tabeller och reduktion av elasticitetsmodulen för lättballastbetong kan uppmätt och beräknad deformation skilja sig åt. Detta beror på att det erhållna regressions sambandet ger ca 10% lägre värden än det som låg till grund för BBK 79 vilket man ansåg sig kunna acceptera. Erfarenheterna från projektet "Kungsbacka Stadshus" visar emellertid att standardavvikelsen i löpande produktion är en bråkdel av den av CEB/FIP antagna 5 MPa. Medelhållfasthetsvärdena för de olika hållfasthetsklasserna är då i realiteten lägre än man antagit. De elasticitetsmodulvärden som anges i BBK 79 har beräknats med standardavvikelsen 5 MPa. Detta innebär att när man använder BBK 79's tabellvärden riskerar man att elasticitetsmodulen blir ca 25% högre än den verkliga.

### 8.5 Maximal betongstukning (betongstukning vid maximalpåkänning)

BBK 79 anger på basis av försöksunderlaget i Berge 1981 betongstukningen vid maximallast  $\epsilon_{cu}$  i tryckta konstruktioner till

$$\epsilon_{cu} = (0,3 + 0,7 \frac{\rho}{2400}) 2,0 \cdot 10^{-3} \quad (8.6)$$

Försöken redovisade i rapport B82:3 visar bra överensstämmelse med BBK 79, men indikerar att formel (8.6) är något för försiktig för den låghållfasta 3L-betongen. Med hänsyn till det begränsade försöksunderlaget föreslås ingen ändring av BBK 79.

### 8.6 Kryptal

I BBK 79 har man fastställt lättballastbetongens kryptal  $\phi^L$  till

$$\phi^L = (0,3 + 0,7 \frac{\rho}{2400}) \phi^N \quad (8.7)$$

I Betonghandboken ges en noggrannare beräkningsmetod för normalbetong där kryptalet

$$\phi = \phi_0 \cdot \gamma_h \cdot \gamma_i \cdot \gamma_t \quad (8.8)$$

där faktorerna  $\gamma$  beror på konstruktionstjocklek, klimat, betongens ålder och tiden räknad från pålastningen. Kryptalets grundvärde  $\phi_0$  är en funktion av betongens hållfasthetsklass.

I Berge 1981 kunde visas att för lättballastbetong kunde man sätta

$$\phi_0 = 1,0 (0,3 + 0,7 \frac{\rho}{2400}) \quad (8.9)$$

oberoende av hållfasthetsklass.

I tre separata försöksserier studerades 3L-betongens kryptal. I viss mån gav dessa försöksserier motstridiga resultat. I rapport M 82:1 är kryptalet mindre än BBK 79 anger. I rapporter B 82:1 och B 82:2 är kryptalet större än förväntat enligt Berge 1981 och Betonghandboken. I synnerhet gäller detta betong med låg densitet och med Cemos (ej hårda partiklar). Detta kan bero på den ökade porositeten i cementbruket vid lägre densiteter. Spridningen är emellertid inte större än som tidigare registrerats

i försök med normalbetong. Tills ett större försöksunderlag föreligger bör man dock sätta kryptalet till

$$\phi^{3L} = 1,2(0,3 + 0,7 \frac{\rho}{2400}) \phi^N \quad (8.10)$$

enligt BBK 79's anvisningar och

$$\phi_0 = 1,2(0,3 + 0,7 \frac{\rho}{2400}) \quad (8.11)$$

om man tillämpar Betonghandbokens beräkningsmodeller. Man bör dock uppmärksamma att man vid en eventuell revidering av beräkningsvärdena för elasticitetsmodulen även bör uppmärksamma vilka konsekvenser detta får för kryptalet.

### 8.7 Krympning

På basis av försöksunderlaget i Berge 1981 fastställs i BBK 79 lättballastbetongens krympning till

$$\epsilon_{CS}^L = \frac{1}{0,3 + 0,7 \frac{\rho}{2400}} \epsilon_{CS}^N \quad (8.12)$$

Krympningen i 3L-betongen i standardklimat har studerats i tre separata serier M 82:1, B 82:1 och 2 och resultaten har varit entydiga. Sambandet i BBK 79 mellan normalbetongens och lättballastbetongens krympning motsvarar ungefär det uppmätta, möjligtvis missgynnas 3Lbetongen.

Man måste emellertid understryka att den 3L-betong som studerades hade en max kornstorlek av 16 mm. Vid utnyttjande av max kornstorlek av 8 respektive 4 mm måste man räkna med en 20 respektive 50% större krympning. Betydelsefullt är också att ballastsammanställningen väljs så att ett lågt vattencementtal kan uppnås.

De krympningsgradienter som uppmättes i provkroppar till följd av ojämn uttorkning var små och av samma storleksordning som tidigare uppmättes i normalbetongprovkroppar. Uttorkningshastigheten i 3L-betongprovkroppar med Cemos var något större än i sådana med hårda partiklar vilket kan tyda på något större hydrofobitet. Krympningsgradienter som kan hänföras till icke homogen betong var av samma storlek som tidigare registrerats i normalbetong.



9 DET ARMERADE 3L-BETONGELEMENTETS HÅLL-  
FASTHETS- OCH DEFORMATIONSEGENSKAPER

9.1 Spänningsfördelningen i armerade balkars  
tryckzon i brottstadiet

I BBK 79 visas tre förenklade spänningsblock för tryckzonen i armerade betongbalkar som man accepterar för beräkning av balkarnas momentkapacitet. I Berge 1981 kunde konstateras att om man tillämpade den bilinjära spänningsfördelningen kunde momentkapaciteten för armerade lättballastbetongbalkar beräknas med samma noggrannhet som om de vore i normalbetong om man gjorde den densitetsrelaterade reduktionen av maximala betongbrottstukningen som anges i BBK 79.

Detta betraktelsesätt skiljer sig i någon mån från CEB/FIP Model Code som accepterar en spänningsfördelning enligt fig 9.1 och som Berge 1981 visade även kan tillämpas på vanlig lättballastbetong med nästan samma noggrannhet som BBK 79, även om valet av elasticetsmodul i den triangulära delen av blocket inte är särskilt lyckosam för lättballastbetongens del.

I rapport B 82:4 visar Öberg att det bilinjära spänningsblocket enligt BBK 79 med samma noggrannhet som för normalbetong kan tillämpas på armerade 3L-betongbalkar för bestämning av momentkapacitet, balanserad armeringsmängd etc. Det förenklade triangulära spänningsblocket som föreslagits av Berge 1981 för överslagsberäkningar ger som man kunde förvänta en underskattning av tryckzonens bärförmåga.

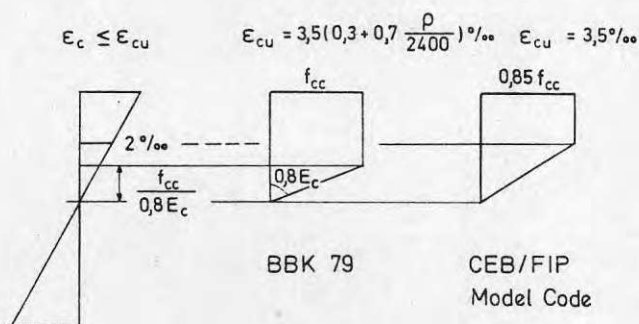


Fig 9.1 Deformationer och den bilinjära spänningsfördelningen i tryckzonen i brottstadiet enligt BBK 79 och CEB/FIP Model Code

Försöken visar att åtgärder såsom tryckarmering i någon mån inverkar på spänningsfördelningen i tryckzonen upp till maximalpåkänningen. Tryckarmering

påverkar emellertid mer betongstukningens storlek vid maximalpåkänning och höjer således gränserna för balanserad armering.

### 9.2 Inverkan av tryckarmering på 3L-betongbalkars bärförmåga

Om tryckarmeringen i en balk skall kunna utnyttjas helt upp till brott fordras att de inte "knäcker" innan betongkrossning inträffar. Denna knäckning motverkas av den omslutande betongen. Eftersom draghållfastheten hos 3L-betongen är låg har man befarat att sådan utknäckning av den tryckta armeringen lättare skulle kunna ske. Omslutande byglar skulle kunna förhindra utknäckningen därigenom att den fria knäckningslängden minskar.

I BBK 79 ställs inga krav på bygelarmering för att förhindra knäckning av tryckarmeringen i balkar. För pelare däremot krävs att hörnarmeringen skall omslutas av byglar med inbördes avstånd < 15 gånger diametern hos hörnarmeringen.

Öberg visar i rapport B 82:4 att följande maximalavstånd för omslutande byglar är plausibelt för tryckarmeringen i 3L-betongbalkar

$$l_k \leq \phi_{sc} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_{sc}}} \quad (9.1)$$

där  $l_k$  = bygelavstånd  
 $\phi_{sc}$  = diametern på tryckarmeringsstängerna  
 $\epsilon_{sc}$  = stukning i tryckarmeringen

Försöken visar alltså att man med tryckarmering kan höja bärförmågan i armerade 3L-betongbalkar enligt BBK 79 beräkningsmodeller. Detta är mycket betydelsefullt för 3L-betongen med dess relativt låga tryckhållfasthet. Att byglar erfordras för att undvika utknäckning av tryckarmering torde i praktiken inte påverka det totala armeringsutförandet då man i balkar vanligen använder byglar för andra ändamål, skjuvning, förankring, brandsäkerhetsarmering.

### 9.3 Rotationskapacitet i flytleder

I Betonghandbok-Konstruktion anges en metod för beräkning av armerade balkars rotationskapacitet. Denna metod baseras på Öbergs 1980 försök och utarbetades av Öberg och Losberg. Metoden kontrollerades av Berge 1981 på lättballastbetongbalkar provade vid Betongbyggnad, CTH, av samma storlek som Öbergs och med likartat armeringsutförande.

Den metod som ges i Betonghandboken innefattar inverkan av betongens och armeringens hållfasthet och av armeringsmängd, inverkan av tryckarmering och av omslutande byglar.

Nästan all litteraturdata om lättballastbetong beskriver denna betong som spröd till sin karaktär, men detta påstående baseras enbart på försök med relativ tung lättballastbetong och på arbetskurvans form fastställd i försök med centriskt belastade cylindrar. I rapport B 82:3 visades att arbetskurvan hos 3L-betong hade en annan form efter uppnådd maximalpåkänning än litteraturdata visar. Dessa försök bekräftade Berges 1981 försök för att fastställa rotationskapaciteten i armerade lättballastbetongbalkar. Om betongens densitet var lägre än  $1500 \text{ kg/m}^3$  observerades att lättballastbetongbalkarna hade betydande seghet.

Öbergs försök i rapport B 82:5 bekräftar Berges observationer och visar att 3L-betongbalkar har en förvånansvärt stor rotationskapacitet, vilket vida överskrider beräknade värden baserat på försöksunderlaget för normalbetong. Den reduktion av rotationskapaciteten för lättballastbetong såsom anges i Betonghandboken baserat på relationerna hos betongens brottstukning är obefogad, fig 9.2.

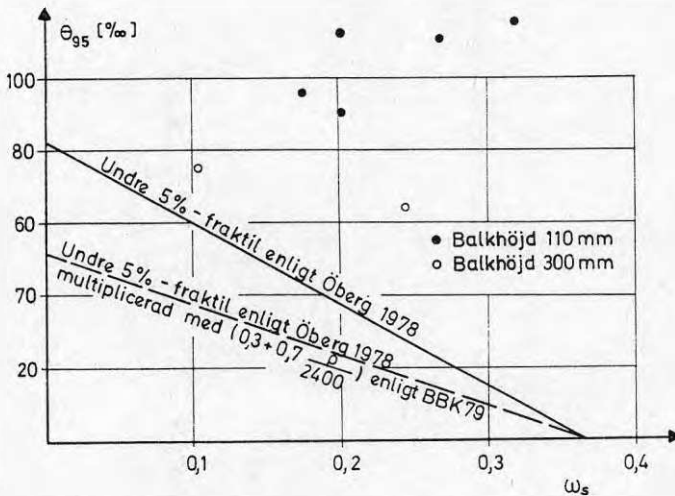


Fig 9.2 Inverkan av dragarmeringen på uppmätt rotationskapacitet  $\theta_{95}$

$$\omega_s = \frac{A_s \cdot f_{st}}{b_{cd} \cdot d \cdot f_{cc}} \quad \text{där } A_s f_{st} \text{ avser kraften i}$$

dragarmeringen vid flytning,  $f_{cc}$  betongens cylinderhållfasthet,  $b_{cd}$  betongtryckzonens bredd och  $d$  effektiv höjd hos balkarna

Försöken visar också att balkens höjd påverkar dess seghet i långt högre grad än man tidigare har haft anledning att förmoda.

#### 9.4 Tvärkraftskapacitet

I Berge 1981 gjordes en omfattande analys av lättballastbetongens tvärkraftskapacitet i vilken även 3 st 3L-betongbalkar ingick. Analysen visade att reglerna för beräkning av tvärkraftskapaciteten i BBK 79 kunde tillämpas även på lättballastbetongen, men att det valda sambandet mellan tvärkraftskapacitet och betongens densitet och tryckhållfasthet inte var det mest optimala.

De 3L-betongbalkar som ingick i försöksunderlaget uppvisade inget avvikande beteende från de övriga. Av denna anledning ansågs en förnyad provning av 3L-betongbalkars tvärkraftskapacitet inte vara befogad.

Emellertid uppstod oförutsedda tvärkraftsbrott i en del försöksserier. Således uppvisar rapport B 82:10 hela 6 st tvärkraftsbrott och 1 st förekommer i rapport B 82:4 respektive B 82:5. Dessa försök som är olika med avseende på balkdimensioner och armeringsutförande analyserades och resultatet visas för de icke tvärkraftsarmerade balkarnas del i fig 9.3.

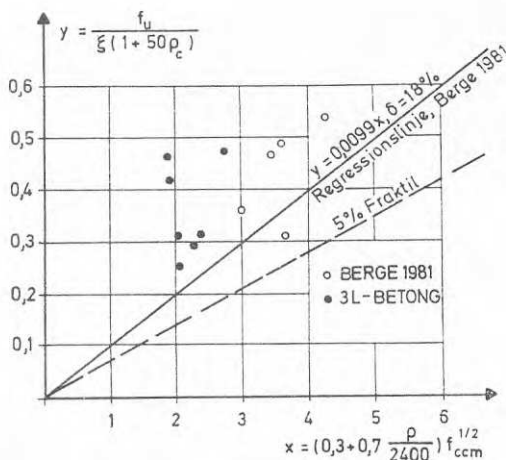


Fig 9.3 Inverkan av betongens tryckhållfasthet  $f_{cc}$  och densitet  $\rho$  på den formella skjuvhållfastheten  $f_u$ . Försöksvärdena har justerats med hänsyn till inverkan av längsarmering  $\rho_c$  och balkhöjd  $\xi$  med beteckningar enligt BBK 79

Det framgår klart att alla balkar har tvärkraftskapacitet som är betydligt större än medelvärdet av

analysunderlaget i Berge 1981. Med hänsyn till vad som vidare påpekas i kap 5 i Berge 1981 missgynnas 3L-betongen i BBK 79 starkt med avseende på dess tvärkraftskapacitet, och en revidering på denna punkt vore angeläget att få till stånd. Hur denna skall utformas får bli föremål för överläggningar då den berör grundläggande principer för BBK 79 och CEB/FIP Model Code.

I det mycket begränsade försöksunderlaget fanns två balkar som uppfyllde kraven på tvärkraftsarmerade balkar. I ena fallet var avståndet mellan byglarna 0,68 gånger balkhöjden. Brottvärdet för balken indikerade att tvärkraftsarmeringen inte fungerat - sprickan slog upp mellan byglarna. Detta visar att man kanske inte bör utnyttja maximala bygelavståndet fullt ut.

Den andra balken erhöll skjuvbrott vid 97% av flytlasten för längsarmeringen. Det är möjligt att den starka uppsprickningen i dragzonen kan ha påverkat tvärkraftskapaciteten och att denna därför endast blev bara 70% av den beräknade. Det kan även betyda att tvärkraftsarmeringen inte varit fullt verksam, men flera försök erfordras för att fastställa detta.

#### 9.5 Förankring av kamstångsarmering

Beräkningsreglerna för kamstångers förankring i betong enligt BBK 79 och Betonghandboken baseras på spjälkbrotts teorin. Modellerna i BBK 79 och Betonghandboken är en vidarebearbetning av Östlund, Tepfers och Losberg på grundval av försöksunderlaget och teorierna i Bernanders 1955, Östlund 1963 och Tepfers 1973 arbeten. Det begränsade försöksunderlaget i Berge 1981 gav belägg för att spjälkbrotts teorin kan tillämpas på lättballastbetong, men var för litet för en mera djupgående analys.

I BBK 79 och Betonghandboken anvisas två alternativa metoder att beräkna dragkraftstillväxten i armering förankrad i betong. En direkt metod, "spjälkbrottsmetoden", anvisas i Betonghandboken och avser förankring av kamstångar medan en förenklad och mera generell metod ges i BBK 79. (Eftersom man i BBK 79 direkt hänvisar till Betonghandbokens spjälkbrottsmetod har båda metoderna samma "normstatus".) Beräkningsmetoderna med dess formler och begränsningar bygger nästan uteslutande på försök med normalbetong. Vid praktisk tillämpning av beräkningsmodellerna på förankring av armering i 3L-betong har dessa visat sig i vissa fall få orimliga konsekvenser. Av denna anledning var det nödvändigt att få ett större försöksunderlag så att mera rättvisa beräkningsmodeller för 3L-betongen kunde uppställas.

I Olssons rapport B 82:10 har målsättningen varit att allmänt öka kunskaperna om armeringsförankring i

betong samt att få underlag för förslag till beräkningsregler avseende 3L-betongen. De föreslagna beräkningsreglerna baseras på Betonghandbokens eftersom dessa är mera nyanserade och möjliggör ett bättre utnyttjande av tvärsnittet än vad BBK 79's generella metod gör. För 3L-betongens del är detta synnerligen betydelsefullt.

En statistisk bearbetning av försöksresultaten i rapport B 82:10 i enlighet med BBK 79:s säkerhetsfilosofi ledde fram till följande beräkningsregler för 3L-betongen med beteckningar enligt Betonghandboken:

$$s_b = 3,5 \frac{u}{n} f_{ct} + k \frac{\pi A_{st}}{s} \leq 30\phi f_{ct} \quad (9.2)$$

För normalbetong och lättballastbetong gäller enligt Betonghandboken

$$s_b = 2,3 \frac{u}{n} f_{ct} + k \frac{\pi A_{st}}{s} \leq 15\phi f_{ct} \quad (9.3)$$

Konstanten  $k$  i ekv (9.2) ges olika värden beroende på stängens placering i förhållande till tvärarmeringen, se fig 9.4  $k$ -värdet för hörnstång överensstämmer med utförda försök medan konstantens värde för fall b) har uppskattats ha samma relationer som i Betonghandbokens beräkningsregler.

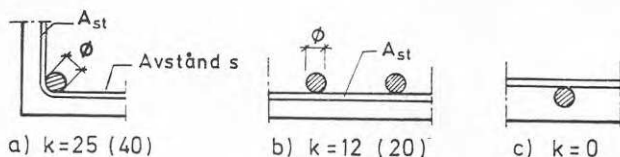


Fig 9.4 Inverkan av tvärarmeringen på dragkraftstillväxten. Värdet på konstanten  $k$  i formel (9.2) anges för olika fall. Motsvarande värden för normalbetong inom klammer ( )

Vid byggelavstånd  $s \geq 12\phi$  föreslås i stället att dragkraftstillväxt beräknas enligt ekv (9.4)

$$s_b = 3,5 \frac{u}{n} f_{ct} + k \frac{\pi A_{st}}{s} \cdot \frac{12\phi}{s} \leq 30\phi f_{ct} \quad (9.4)$$

Konstanten  $k$  ges värden enligt fig 9.4.

Ovan angivna formler (9.2) och (9.4) beaktar ej avvikelser från nominella mått avseende  $u$  och  $s$ . Reglerna avser i första hand förankring av armering



vid balkupplag men torde även vara tillämpliga vid avkortning och förankring i fält.

I övrigt torde - tills annat kan visas - anvisningarna gällande avkortning och förankring av armering i BBK 79 kunna tillämpas.

Försöken visar entydigt att betongens andel vid förankring av armering i 3L-betong är större än vad nuvarande beräkningsregler i Betonghandboken visar. Betongandelen förutsätts vara proportionell med betongens draghållfasthet  $f_{ct}$ . Man kan ha anledning att ifrågasätta om detta antagande är fel, eller om det i CEB/FIP Model Code och BBK 79 valda uttrycket för draghållfastheten är fel.

Då det senare baseras på ett rent dragprov på en betongprovkropp - känslig för härdnings- och lagringsbetingelser - utan att relationerna till betongens funktion i den armerade konstruktionen har studerats har man återigen anledning att ifrågasätta CEB/FIP:s val.

Försöken visar att även enskilda byglar ökar dragtillväxten. Av denna anledning har föreslagits avsteg ifrån nuvarande regel att endast bygelarmering med ett centrumavstånd  $s \leq 12\phi$  (där  $\phi$  avser längsarmeringens diameter) får anses öka förankringskapaciteten. Gränsen  $12\phi$  har dock behållits som en "brytpunkt" med kontinuerligt minskad inverkan av byglar med ett större centrumavstånd, jfr ekv (9.4).

Det framgår klart att bygelarmeringens andel till dragkraftstillväxten är mindre i 3L-betong än vad nuvarande beräkningsregler visar.

Fig 9.5 illustrerar - på basis av ett beräknings-exempel och är således inte allmängiltigt - hur dragkraftstillväxten i en armeringsstång förankrad i 3L-betong varierar som funktion av mängden tvärarmering. Olssons förslag jämförs med gällande Betonghandboksregler.

Det föreliggande förslaget kommer att öka den beräknade dragkraftstillväxten med i medeltal 30%. Ökningen är särskilt markant i förankringar med liten tvärarmering eller med stark tvärarmering. I områden med bygelavstånd strax under  $s = 12\phi$  innebär förslaget i några fall en lindrig skärpning.

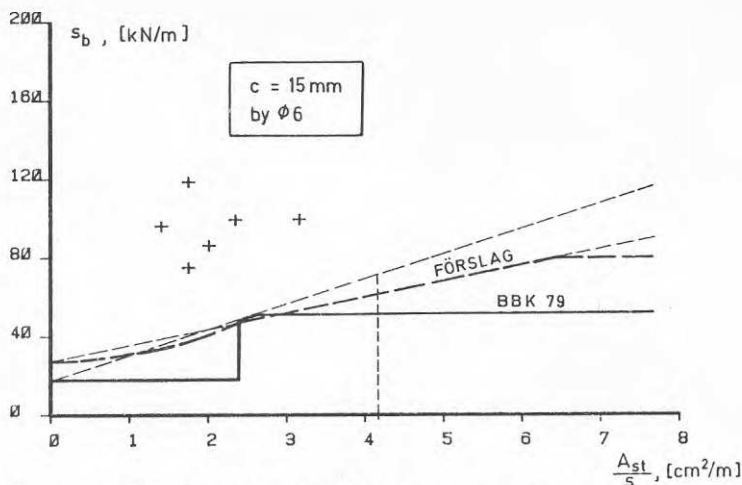


Fig 9.5 Dragkraftstillväxt  $s_b$  som funktion av tvärarmeringsmängden  $A_{sv}/s$ . Jämförelse mellan BBK 79 och föreslagna beräkningsregler. Förutsättningar i diagram. Betong K8,  $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$ . Säkerhetsklass 2

#### 9.6 Förankring och skarvning av svetsade armeringsnät

3L-betongen torde sannolikt oftast att komma användas i konstruktioner med liten nyttig last, med små betongdimensioner och där således egentyngsbelastningen är liten. Armeringsbehovet kommer därför att bli relativt litet, och man kan förutspå att svetsade armeringsnät ofta kommer att användas i 3L-betong.

I två begränsade försöksserier B 82:15 studerades förankring av nät vid upplag samt överlappsskarvning av svetsade nät.

Det visade sig svårt att åstadkomma förankringsbrott vid upplag. Bara i ett fall lyckades detta. I skarvförsöken erhöles fem förankringsbrott utav åtta försök.

Jämförelse med normalbetongförsök och med beräkningsreglerna i BBK 79 visar att  dessa regler  - med viss reservation för det begränsade underlaget -  kan tillämpas på 3L-betong . Svårigheten att åstadkomma förankringsbrott vid upplag samt det kända försöksresultatet indikerar att möjligen beräkningsreglerna i detta avseende är för försiktiga och därför förtjänar en översyn då ett större försöksunderlag föreligger.

## 9.7 Nedböjningar

Enligt samma förfarande som i Berge 1981 utfördes två separata långtidsförsöksserier med såväl slakarmerade som förespända balkar i 3L-betong, rapport B 82:1 och B 82:2. I det senare fallet rörde det sig om en betong med tryckhållfastheten 13 MPa och den förespända armeringen var av kvalitet Ks600. Balkarnas förspänningsgrad varierade från en svag partiell till en fullständig förspänning. Syftet med förspänningen var att reducera nedböjningar och sprickbildning. Försöken visar att betong och armering inte nödvändigtvis måste ha hög hållfasthet för att en förspänning skall vara möjlig och effektiv och att denna åtgärd kan tillämpas på 3L-betongen inom vissa gränser.

Såväl de slakarmerade balkarna som de förespända fungerade helt enligt teorierna och man kan fastställa att BBK 79's beräkningsregler för krökning i böjbelastade armerade balkar även kan tillämpas på 3L-betong med nästan samma noggrannhet som på normalbetong om det i kap 8.6 justerade värdet för kryptalet användes. Därmed finns grundförutsättningar för jämförande beräkningar av nedböjningar och deras förlopp mellan 3L- och normalbetong. På samma sätt som för normalbetong och konventionell lättballastbetong brister noggrannheten i beräkningsmodellerna då balkarna befinner sig i ett partiellt uppsprucket tillstånd, och resultaten får i detta skede behandlas med vederbörlig skepsis.

Försöken visade att den applicerade förspänningspåkänningen i armeringen snabbt reducerades och att reduktionen var störst i armering med stark förspänning. Detta beror till stor del på inverkan av krympning som är större i 3L-betong än i normalbetong. Ändå var effekterna av förspänningen på balkkrökningen påtaglig och visar att nedböjningarna även efter lång tids belastning kunde reduceras betydligt genom förspänning. En tumregel för att bedöma effekterna av förspänning på balkkrökningen är att krökningsreduktionen  $\Delta l/r$  kan antas vara densamma oberoende av den tid som förflyter. Den kan överslagsmässigt beräknas som

$$\Delta l/r = \frac{\epsilon_{sp}}{d}$$

där  $\epsilon_{sp}$  är initialtöjningen i spännarmeringen och  $d$  effektiv balkhöjd.

På basis av BBK 79's beräkningsregler analyserades i Berge 1981 nedböjningarna efter lång tid i bjälklagskonstruktionerna homogen platta och i en inspänd T-balk. Det kunde påvisas att i sådana konstruktioner var nedböjningarna av ungefär samma storlek. Den antagna nyttolasten motsvarade den i bostadsutrymmen. Denna analys kan kompletteras med följande slutsatser:

- Nedböjningar av utpräglad korttidsbelastning är vanligen alltid större i 3L-betongkonstruktioner. I detta sammanhang är de dämpande egenskaperna hos betongmaterialet av betydelse. Då 3L-betongen i det elastiska området besitter mindre hysteresiseffekt kan svängningar uppstå som påminner om träkonstruktioners.
- I T-balkskonstruktioner i 3L-betong där balklivet utgör tryckzon är nedböjningarna alltid större än i motsvarande i normalbetong.
- I T-balkskonstruktioner där balklivet utgör dragzon är troligen nedböjningarna av korttidslast 20-30% större, och nedböjningarna efter lång tid något mindre än i en motsvarande normalbetongkonstruktion.
- I homogena plattkonstruktioner utgör spricklastnivån en komplicerande faktor. I plattor där ingen uppsprickning inträder är nedböjningarna vanligen små och utan större betydelse. I sådana fall där uppsprickning sker i såväl 3L- som i normalbetong är de omedelbara nedböjningarna större i 3L-betongplattorna, men nedböjningsökningen till följd av långtidslast avsevärt mindre, se fig 9.6.
- För vissa spännviddsförhållanden kan den låga draghållfastheten hos 3L-betongen leda till uppsprucket tvärsnitt medan man med normalbetong kunde ha undvikit uppsprickning. I sådana fall är naturligtvis de totala nedböjningarna efter lång tid större i 3L-betongkonstruktionen. Emellertid måste påpekas att ofta är tidpunkten för nedböjningsutvecklingen av större betydelse än den totala nedböjningen. I 3L-betongkonstruktioner med dess låga draghållfasthet är det mer sannolikt att tvärsnittet övergår från stadium 1 till stadium 2 omedelbart vid avformning eller vid lyft av element och att därmed den fortsatta nedböjningsökningen - som kan orsaka skador på sekundärkonstruktionerna - blir liten, se fig 9.6.
- Krympningens inverkan på nedböjningarna är större i 3L-betongkonstruktioner och i synnerhet i tunna konstruktioner måste man uppmärksamma denna.

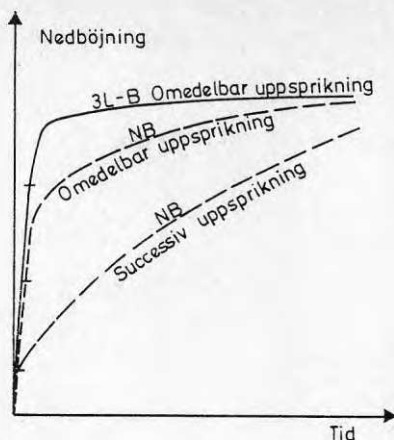


Fig 9.6 Principskiss visande möjliga nedböjningsförlopp för armerade element i 3L- och normalbetong, samma nyttiga last, betongdimensioner och spännvidd

#### 9.8 Sprickor

Försöken redovisade i rapport B 82:1 och B 82:2 visade att BBK 79:s beräkningsmodeller för sprickvidd i belastade armerade 3L-betongkonstruktioner inte är särskilt tillförlitliga, och tillförlitligheten är mindre för partiellt förspända balkar än för slakarmerade. Detta beror till större delen på att BBK 79-modellerna inte inkluderar inverkan av krympning i täcksiktet utanför armeringsstängerna. Med förspänning kan man reducera sprickvidderna på samma sätt som är fallet i normalbetongkonstruktioner.

Om man enbart studerar försöksresultaten och inte sätter dessa in i sitt rätta sammanhang kan de utförda försöken vara missledande. Det klimat som rådde i laboratoriet under försöken var torrt (30-50% RH). Ur korrosionssynpunkt är detta en orealistisk miljö, därför att korrosion bara äger rum om den relativa fuktigheten överstiger 75 till 80%. Vid denna fuktighetsnivå är krympningen bara en bråkdel av den som uppmättes vid försöken. Den omtalade extra sprickvidgning till följd av krympning i täcksiktet är i korrosiv miljö betydligt mindre än den som registrerades i försöken och torde i dessa sammanhang vara betydelselös.

I Berge 1981 visas att i de flesta konstruktioner i 3L-betong kommer den teoretiskt beräknade sprickvidden orsakad av långtidslast - och det är denna som har betydelse ur korrosionssynpunkt - att vara mindre än i normalbetongkonstruktioner av samma utförande därför att långtidslasten vanligen utgör en mindre andel av den totala i 3L-betongkonstruktioner.

Sprickor har också en viss betydelse ur estetisk synvinkel. I sådana fall har tidpunkten för sprickornas bildande ofta större betydelse än sprickviddens maximala värde. Man önskar inte sprickvidgning sedan spackling och målning utförts t ex. Det är ur denna synvinkel viktigt att uttorkningen av betongkonstruktionerna kan börja så tidigt som möjligt. Den låga draghållfastheten hos 3L-betongen medför att sprickor kommer att utbildas tidigare i 3L-betong än i normalbetong, rapport B 82:17. En allmängiltig regel för detta är dock svårt att ställa upp då orsakssammanhangen för sprickbildning i betong är komplex.

### 9.9 Slutsatser

Sammanfattningsvis har undersökningarna av materialet 3L-betongens och den armerade 3L-betongens hållfasthets- och deformationsegenskaper visat att gällande materialparametrar och beräkningsmodeller i BBK 79 i stora drag är tillämpbara på denna betong. Dessa utvecklades på basis av försöksunderlaget till avhandlingen "Armerade konstruktioner i lättballastbetong" och kontrollerades och diskuterades där för en något tyngre lättballastbetong. I avhandlingen utfördes en analys av konsekvenserna som en lättballastbetong med varierande densitet och hållfasthet skulle få på konstruktionernas armeringsutförande och vilka deformationer och sprickbildning man kunde förvänta sig vid belastning av dessa. Denna analys kan med smärre undantag även gälla för den lätta, låghållfasta 3L-betongen.

Följande slutsatser kan uppställas:

- I konstruktioner med liten nyttolastandel kan 3L-betongen anses vara tekniskt jämförbar med normalbetongen
- Armeringsutförandet kommer - vid samma nyttolast, med samma spännvidder och betongdimensioner - att vara nästan detsamma för båda betongtyperna med undantag för böjarmeringen som till följd av den starkt reducerade totalbelastningen kommer att vara 30-40% mindre.
- Nedböjningarna kommer i de flesta konstruktioner att vara desamma efter lång tid, för korttidslast däremot ca 20% större. En mera ingående diskussion om nedböjningar i olika konstruktionsutföranden redovisas i kap 9.7.
- Sprickor till följd av långtidslast är inte större än i normalbetong. Ojämn uttorkning av tvärsnittet kan dock medföra att sprickorna - åtminstone tidvis - kan vara större i ytskiktet.



- Sprickorna utbildas tidigare än i normalbetong. Detta kan i vissa fall vara en fördel. Nedböjningar och sprickbildning efter avformning eller efter montering av element är vanligen mindre än i normalbetongkonstruktioner.

Undersökningarna inom projektet visar att i vissa avseenden kan en översyn av gällande regler i BBK 79 med avseende på 3L-betongen erfordras:

- En ändring av antalet hållfasthetsklasser för 3L-betongen bör komma till stånd.
- Alla materialparametrar och beräkningsmodeller bör justeras med hänsyn till 3L-betongens verkliga hållfasthetsspridning i produktion.
- Uttrycket för draghållfastheten missgynnar betong med låg hållfasthet. Detta gäller såväl för den provade spräckdraghållfastheten som för olika beräkningsmodeller för den armerade betongens bärförmåga.
- I uttrycket för krympningen bör inverkan av ballastkornstorleken ingå.
- Kryptalet bör höjas ca 20%.
- Tvärkraftskapaciteten för icke tvärkraftsarmerade sektioner är större än beräkningsmodellerna anger.
- Beräkningsmodellerna för armeringsstångers förankring är för försiktiga med avseende på betongandelen och på osäkra sidan då det gäller bygelarmeringens inverkan.

## 10 HYDROFOBIRELATERADE EGENSKAPER

## 10.1 Allmänt

Betongens beständighet gentemot olika miljöangrepp är till stor del beroende på dess permeabilitet för vatten, och denna åter är en funktion av materialets strukturupbyggnad.

Vatteninträningen påverkas starkt av strukturella defekter, t ex mikrosprickor. De flesta provningsmetoder är så uppbyggda att man undviker denna inverkan genom att man vattenlagrar provkropparna fram till provningstillfället.

I normalbetong finns i kontaktzonen mellan matrix och ballast mycket kalciumhydroxid. Kontaktzonen utgör därför en starkt vattenabsorberande zon. Draghållfastheten är i denna zon låg vilket ökar risken för sprickbildning och denna ökar betongens permeabilitet. Ballastens stora styvhet gör motstånd mot krympdeformationer hos matrixen och därmed kommer mikrosprickor att bildas vinkelrätt mot kontaktzonen och ytterligare öka permeabiliteten. I betong som vattenlagrats kontinuerligt bildas självklart inte den senare typen av mikrosprickor.

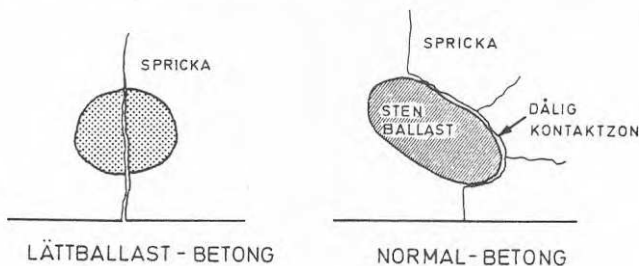


Fig 10.1 Sprickors läge i förhållande till ballasten i lättballast- och normalbetong

3L-betongens struktur skiljer sig i flera avseenden från normalbetongens.

I 3L-betong stabiliserar de polymera mikropartiklarna i det färska stadiet porerna och dessa förblir små. Polymeren bildar sedan film på porväggarna och denna film ökar sin hydrofobitet med åldern, vilket Satish och Flodin 1980 konstaterat.

Ytan hos lättballastkornen är ruggig och medverkar till den goda samverkan med matrixen. I det färska stadiet suger ballasten under kort tid upp vatten från kontaktzonen som därmed får ett lägre vattencementtal än den övriga matrixen. Man kan också förmoda att mikropartiklarna bildar polymerfilm som ytterligare ökar vattentätheten i denna zon. Före-

komsten av mikrosprickor i zonen är liten därför att ballastens styvhet är ringa. Även om sprickor kan uppstå till följd av yttre dragpåkänningar utbildas dessa i sektionen med störst andel lättballast. Inträngning av vatten i strukturen motverkas av den relativt täta matrixen runt ballasten.

Försök som utförts vid Statens Provningsanstalt på uppdrag av AB Bofors Nobel Kemi bekräftar att 3L-betong som lagrats lufttorrt innan vattentäthetsprovningen uppfyller vattentäthetskraven enligt BBK 79. Detta är inte möjligt med provkroppar i normalbetong.

Den fundamentala skillnaden mellan betongtyperna tycks således ligga däri att vatteninträngningen i 3L-betongen sker i matrixen, medan den i normalbetong sker i kontaktzonen invid ballasten.

Av ovanstående resonemang är det uppenbart att 3L-betongens vattenpermeabilitet i hög grad påverkas av dess sammansättning, därför att denna avgör porositet och täthet hos matrix. De egenskaper som redovisas nedan är bara giltiga om betongens sammansättning kan garanteras uppfylla ställda krav, såsom man även ställer krav på normalbetongens sammansättning. Väsentligt i detta sammanhang är den sammansatta siktcurvan för ballasten därför att en undergraderad ballast så starkt påverkar strukturuppbyggnad och täthet. En uppdelning av fraktionen 4-12 mm är ett krav som man inte kan frångå om man vill utnyttja 3L-betongens täthetsegenskaper.

## 10.2 Vattentäthet

Berntsson har studerat 3L-betongens vattenpermeabilitet vid vattentryck motsvarande de i naturen förekommande (0,1 MPa). Betong med densitet  $1100 \text{ kg/m}^3$  uppfyllde lätt de permeabilitetskrav som Norske Veritas ställer på betong i vågzonen i Nordsjö-konstruktionerna, Berge et al 1978.

Den normerade vattentäthetsprovningen använder betydligt högre vattentryck för att accelerera provningen. Vid provning enligt B5 - 1983 som föreskriver 0,8 MPa var vatteninträngningen efter 24 timmar bara ca 2 mm i de försök som redovisas i rapport M 82:1. Vid senare här inte redovisade försök har vatteninträngningen maximalt uppgått till 10 mm. Normalt karakteriseras en betong med inträngningsdjupet 50 mm som vattentät.

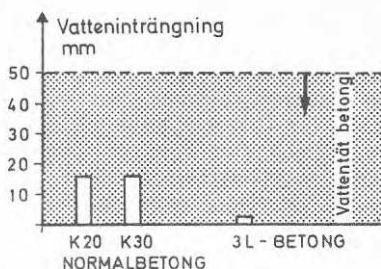


Fig 10.2 Vatteninträängningen i betongprovkroppar efter 24 timmar vid ett vattentryck av 0,8 MPa (SIS 13 72 14)

Det kan i detta sammanhang ifrågasättas om provningsmetoden med ett ensidigt vattentryck mot en tät gjuthud verkligen ger en korrekt bild av betongens vattentäthet.

Kanske skulle provningen utföras mot en sågad eller slipad yta. Sannolikt skulle en sådan provning inte missgynna 3L-betongen.

### 10.3 Ångdiffusionstal

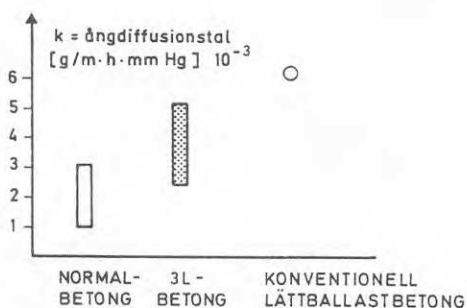


Fig 10.3 Ångdiffusionstalen för några betongtyper fastställt vid 20°C 50% RH

3L-betongens porositet är större än normalbetongens och därmed är strukturen mera diffusionsöppen. Diffusionstalet ökar vid sjunkande densitet vilket huvudsakligen kan tillskrivas ökad porositet i cementmatrixen. Jämfört med konventionell lättballastbetong var 3L-betongen betydligt mera diffusionstät, troligen orsakad av den annorlunda uppbyggnaden av matrixen.

## 10.4 Vattenabsorptionskaraktistika

Vattenabsorptionen i betong beskrivs med två karakteristiska konstanter. Motståndstalet beskriver sambandet mellan tid och inträngningsdjupet och kapillaritetstalet sambandet mellan uppsugen vattenmängd och tid. Båda dessa konstanter motsvarar de värden som anges i Betonghandboken - Material för normalbetong i hållfasthetsklassen K40, se fig 10.4.

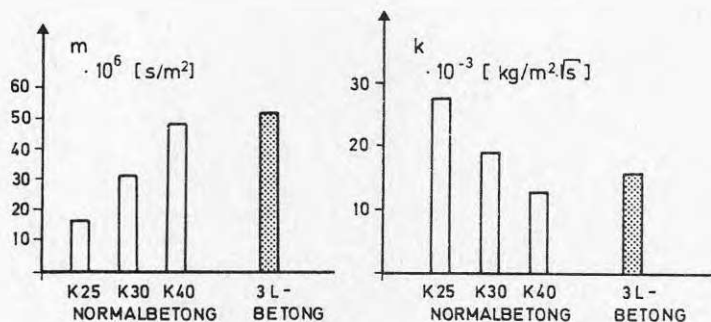


Fig 10.4 Motståndstalet  $m$  och kapillaritetstalet  $k$  i normal- och 3L-betong

## 10.5 Vatten- och fukttransport genom 3L-betong

I rapport M 82:10 illustreras i foton från korrosionsförsöken en remarkabel skillnad mellan 3L- och normalbetong med avseende på hur fukt transporteras genom materialen. Båda materialen är porösa om än i olika grad. Vatten söker tränga in och fylla porerna. Denna effekt förstärks av betongens kapillaritet. Den uppsugna vattenmängden per tidsenhet är ungefär densamma. Detta innebär att normalbetongstrukturen snabbare når vattenmättnadsgraden då fukten transporteras medelst kapillär strömning. Den betydligt mera porösa 3L-betongen vattenfylls inte och fukten transporteras genom strukturen huvudsakligen medelst diffusion. 3L-betongstrukturen förefaller vara mindre våt vid en ensidig vattenbelastning.

Om den relativa fuktigheten på den torra sidan ökar påverkar detta diffusionshastigheten. Finns vatten på alla omslutande sidor kommer vattnet att tränga in i 3L-betongen med samma hastighet som i en normalbetong av hög kvalitet. Det kommer emellertid att ta avsevärt mycket längre tid innan fuktjämviktstillståndet har nåtts.

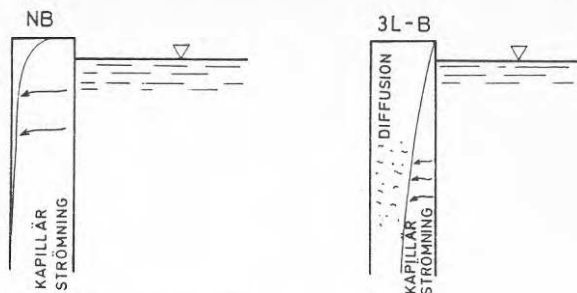


Fig 10.5 Principskiss visande vatten- och fukttransport genom en ensidigt vattenbelastad vägg i normal- och 3L-betong

### 10.6 Uttorkning

Med avseende på uttorkning gäller samma grundläggande regler för 3L-betongen som för vanlig betong. Det vatten som tillförs betongen vid blandning är ungefär detsamma som i normalbetong vid samma vattencementtal. Detta innebär att det vatten som återstår i betongen efter hydratiseringen och som är uttorkbart innan fuktjämvikt är återställd motsvarar det i en normalbetong av relativt hög hållfasthet och är alltså mindre än fukten i standardbetongen K25.

Den porösa ballasten är emellertid vattenabsorberande. De polymera mikropartiklarna förhindrar dock att större mängder fukt tränger in i ballasten vid blandning och hantering av den färska betongen. Vid vårdslös hantering av lättballasten kan den innehålla stora mängder fukt innan den blandas. Upp till 30 viktsprocent har uppmätts i leveranserna till Kungsbacka Stadshus. Detta innebär att ca  $70 \text{ l/m}^3$  extra vatten har tillförts betongen som sedan måste transporteras ut ur betongen innan fuktjämvikt inträder.

Det vatten som finns i 3L-betongen vid uttorkningens början torde vara bundet till strukturen med ungefär samma krafter som i normalbetong. Under en relativ fukthalt i betongen av 98% bildas emellertid polymer film och denna torde i någon mån bromsa den vidare uttorkningen. Å andra sidan är 3L-betongen mer diffusionsöppen än normalbetongen.

De relativt enkla försök som utfördes inom projektet visar att uttorkningshastigheten är något större i 3L-betongen i det tidiga skedet. Senare går uttorkningen långsammare, sannolikt till följd av filmbildningen men även orsakad av en reducerad kapillärströmning, rapport B 82:17.



Vid försökens planering fanns inte tillgång till Fagerlund 1980 ej heller till Betonghandboken, vilka sannolikt hade påverkat utformningen av försöksprogrammet. Man kan emellertid på basis av dessa fastställa följande allmängiltiga regler för 3L-betongens behandling för att kunna erhålla en snabb uttorkning av betongen utan menliga skador:

- hydratationen i 3L-betongen sker snabbare till följd av högre cementhalt och mindre värmetröghet. Uttorkningen kan därför starta tidigare
- uttorkningen i tidig ålder är mera effektiv då strukturen är mera diffusionsöppen vid denna tidpunkt
- det kan vara en fördel att använda membranhärdare
- ballasten måste vara fraktionerad så att ett lågt vattencementtal erhålls
- ballasten måste ha en fukthalt under 10 viktsprocent, helst under 5%. Fuktig ballast leder till längre uttorkningstid och till större fukt- och krympgradienter. Då 3L-betongens draghållfasthet är lägre än normalbetongens kan våt ballast i en del fall komma att leda till sprickbildning under uttorkningsskedet.

Försöken visade ingen påtaglig skillnad mellan 3L- och normalbetongen vid flera uttorkningsförlopp. I de flesta miljöer har man emellertid en växelverkan mellan vattenabsorption och uttorkning. Då 3L-betongen absorberar vatten långsammare än normalbetongen och uttorkningen går ungefär med samma hastighet kommer 3L-betongen vid en växelvis uttorkning-vätning att vara torrare än vanlig betong.

#### 10.7 Frostbeständighet

Kapilläritetstalet hos 3L-betongen är av samma storlekstal som i normalbetong av hög kvalitet samtidigt som porvolymen är stor. Porerna är dessutom små och detta ger 3L-betongen en frostbeständighet som är minst lika bra som en normalbetong av bästa kvalitet rapport M 82:3, M 82:4, B 82:13. Detta baseras på laboratorieförsök i hårda betingelser. Den hydrofoba filmens betydelse framgår av fig 10.6. Icke filmbildande partiklar ger en frostbeständighet som är jämförbar med konventionell luftporbildare.

I försöken framgår även att vanlig lättballastbetong utan Cemos besitter en relativt bra frostbeständighet och bekräftar antaganden i CEB/FIP Manual of Lightweight Concrete och Fagerlund 1977.

Polymera mikropartiklar ger även vanlig betong en bra frostbeständighet, rapport M 82:4.

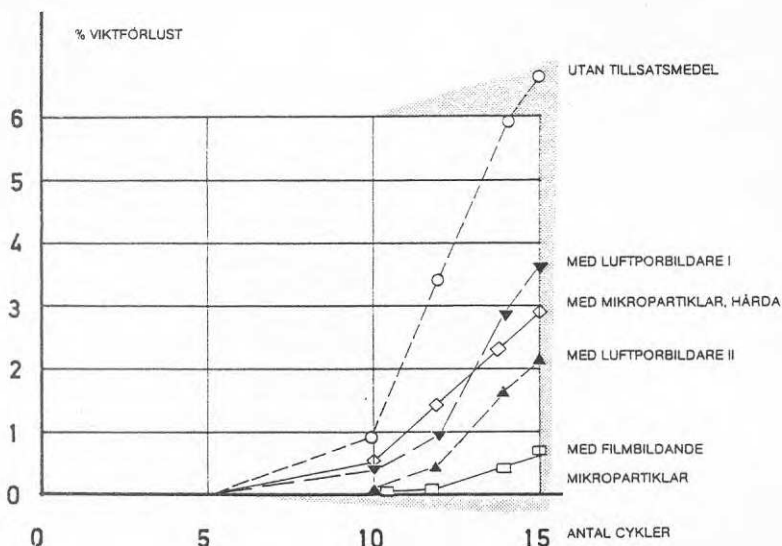


Fig 10.6 Viktförlust hos provkroppar 40x40x160 mm vid frysförsök. Jämförelse mellan provkroppar av bruk 1:2 med vattencementtal 0,35

Provkroppar i normal- och 3L-betong lagrade under två vintrar, vid en motorväg i Göteborg, bekräftar laboratorieförsöken, rapport M 82:5.

## 10.8 Brandbeständighet

Olika mekanismer bryter ner betongen då den utsätts för brandbelastning.

### 10.8.1 Spjälkning orsakad av ång- eller vatten-tryck

Vid brand är temperaturen hög vid ytan och temperaturgradienten förorsakar ett ångtryck som pressar fritt vatten framför sig. Om vattenflödet stoppas upp till följd av en tät struktur eller om betongsektionerna är tvärsidigt brandbelastade kan ångtrycket stiga så mycket att betongen exploderar. Detta innebär att spjälkningsrisken ökar med fukttinnehållet i betongen och minskar med betongens permeabilitet och diffusionsöppenhet.

Polymera mikropartiklar ger en öppnare mera porös struktur än den vanliga betongstrukturen. Även

tunna - 25 mm - nätarmerade 3L-betongskivor motstod tvåsidig brandbelastning utan att explodera. Exploderade gjorde dock en tvåsidig brandbelastad normalbetongplatta med samma utförande, rapport B 82:14.

Tryckpåkänningar i pelare och i balkar som verkar vinkelrätt mot de stora temperaturgradienterna ökar risken för spjälkning sannolikt därför att tryckspänningar ger upphov till dragpåkänningar i spjälkningsriktningen.

En sådan effekt kunde observeras i brandförsök med förspända T-balkar. Kraftig explosionsartad spjälkning förekom i en fem veckor gammal förespänd 3L-betongbalk medan en slakarmerad balk bara spjälkades litet. Motsvarande slakarmerad normalbetongbalk exploderade. Försök med äldre - mera uttorkade - förespända 3L-betongbalkar gav ingen spjälkning. Försöken som beskrivs i rapport B 82:14 visar den betydelse som betongens fuktillstånd har vid brand och att 3L-betongen i detta avseende är något bättre än normalbetong.

Bygelarmering har om den ligger för tätt inte samma positiva betydelse för avspjälkning som den har i normalbetong, sannolikt på grund av olikheter i termisk expansion.

#### 10.8.2 Hållfasthetsförluster och spjälkning orsakad av skillnad i temperaturrörelse mellan cementmatrix och ballast

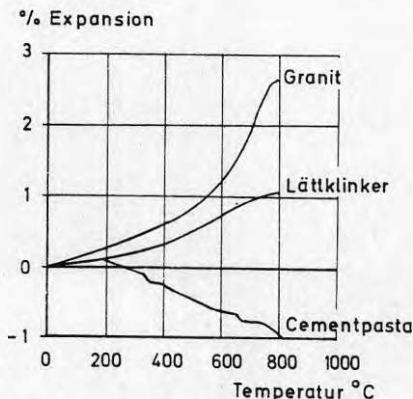


Fig 10.7 Deformationer i granit och lättklinker samt i cementpasta vid högre temperaturer

En starkt bidragande orsak till betongens nedbrytning vid brandbelastning beror på den omständighet att ballast expanderar medan cementmatrixen krymper vid stigande temperaturer, se fig 10.7. Då ballasten i normalbetong besitter en betydande styvhet resulterar detta i en uppsprickning av cementmatrixen och en

hållfasthetsförlust vid stigande temperaturer. I lättballastbetong och i synnerhet 3L-betong är sprickbildningen i matrixen liten då ballasten lättare trycks samman. Hållfasthetsförlusterna vid högre temperaturer är därför mindre.

#### 10.8.3 Silikatens volymexpansion vid högre temperatur

I tillägg till ovanstående mekanismer medverkar silikatets expansion vid höga temperaturer till betongens nedbrytning. Då 3L-betongen besitter liten andel natursand kan man nästan bortse från denna effekt.

#### 10.8.4 Cementets nedbrytning

Portland-cementet bryts ned vid högre temperaturer. Konstruktioner med bibehållen betonghållfasthet även vid mycket höga temperaturer kan bara åstadkommas om Portlandcementet byts ut mot brandresistent cement.

#### 10.8.5 Värmeledningsförmågan vid högre temperatur

Värmeledningsförmågan i 3L-betongen är vid högre temperaturer bara ungefär halva normalbetongens vilket innebär att det tar längre tid innan temperaturen höjs invid armeringen eller i isoleringsskikten i sandwichkonstruktioner, se fig 10.8.

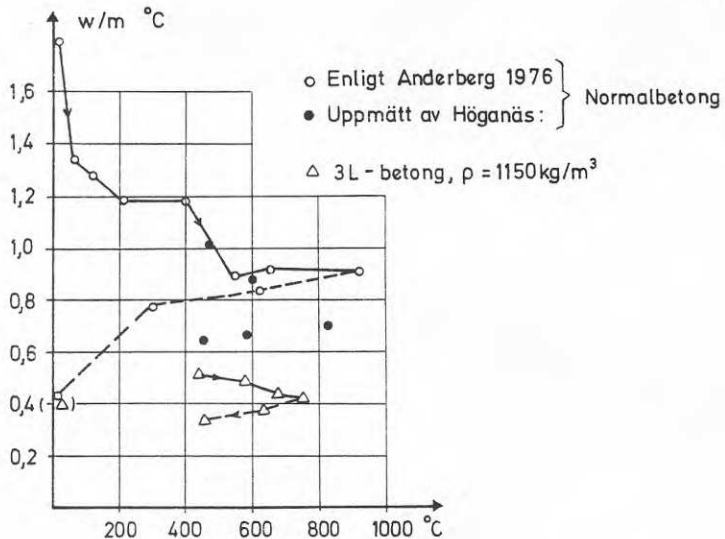


Fig 10.8  $\lambda$ -värden för normal- och 3L-betong vid högre temperaturer

## 10.9 Kemisk beständighet

Allmänt har all betong baserad på Portland-cement låg beständighet gentemot syraangrepp från saltsyra, svavelsyra och mjölksyra vilket framgår av litteraturen. Även om slutprodukten av den polymera filmen och hydrationsprodukterna visat sig ha mycket bra beständighet mot nämnda syror, skedde nedbrytningen av 3L-betong med ungefär samma hastighet som normalbetongen. 3L-betongen var mer beständig gentemot salt- och mjölksyraangrepp, medan svavelsyra bröt ned 3L-betongen snabbare än normalbetongen, rapport M 82:6.

## 10.10 3L-betongens skydd mot armeringskorrosion

### 10.10.1 Allmänt

Betongens höga alkalitet skyddar armeringsstängerna mot armeringskorrosion. Detta skydd kan brytas ned genom karbonatisering av luftens koldioxid eller därigenom att klorider tränger in till armeringen. Sprickor i täckskikten påskyndar vanligen denna process.

### 10.10.2 Karbonatiseringshastigheten

Karbonatiseringsförloppet styrs av diffusionshastigheten för luftens koldioxid och av betongens innehåll av kalciumhydroxid. 3L-betongen är mera diffusionsöppen än vanlig betong. Den innehåller emellertid samma mängd kalciumhydroxid som en normalbetong av hög kvalitet (K40-50) och dess vattencementtal är lågt. Likaledes kan den polymera filmen påverka karbonatiseringsförloppet.

Försöken visar att 3L-betongens karbonatiseringshastighet är ungefär densamma som i normalbetong med samma vattencementtal, rapport M 82:9, vilket motsvarar en normalbetong med kvalitet motsvarande hållfasthetsklassen K40 och betydligt långsammare än i en K25 betong.

Det framgick klart av försöken att ökad porositet i cementbruket ger snabbt ökad karbonatiseringsdjup. Man har alltså anledning att ställa krav på betongens ballastansättning och på dess vattencementtal om man vill utnyttja det förbättrade skyddet mot armeringskorrosion.

I försöken kunde någon lokal ökning av karbonatiseringsdjupet vid lättballastkornen inte konstateras såsom rapporteras av Schultze et al 1968. Detta kan bero på en tätare struktur runt ballastkornen eller på ballasttyp. En remarkabel iakttagelse vid försöken var en svag rödfärgning av fenoltalinlösning i de ytliga betongskikten av 3L-betongen som indikerar att det i dessa delar finns kvar en reserv av

hydroxid som inte omvandlats till karbonat, kanske till följd av polymerfilmen på porytorna som förhindrar koldioxiden att komma i kontakt med hydrationsprodukterna.

### 10.10.3 Kloridinträngning

3L-betongen kännetecknas av att dess porositet i cementbruket är större än i normalbetong, att den vätskemängd som transporteras vid kapillär strömning inte är större än den i normalbetong med tät struktur och att dess diffusionsöppenhet är 2-3 gånger större. Detta innebär att vätskor snabbare övergår från kapillär strömning till diffusion. Följaktligen är det svårt att fylla strukturen med vätska. Kloridinträngning och saltvandringen är följaktligen mycket mindre än i normalbetong, rapport M 82:10.

Vid täckskikt som är anpassade till en aggressiv miljö kommer initieringsskedet enligt Tuutti 1980 för 3L-betong med en optimerad sammansättning att vara minst lika långt som i normalbetong av bästa kvalitet. 3L-betongens resistivitet är betydligt större än normalbetongens och polarisationsmätningar utförda i enlighet med ASTM-G5 "Standard Reference Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurement" visar att den aktiva korrosionsströmmens styrka är markant lägre i 3L-betong med tillsats av polymera mikropartiklar. Detta indikerar att korrosionshastigheten i propageringsskedet är lägre än även i normalbetong av bra kvalitet.

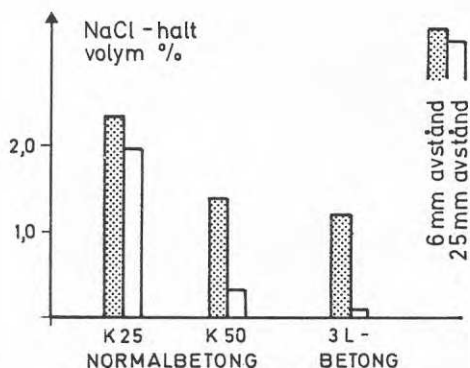


Fig 10.9 Saltkoncentrationen i volym-% på olika avstånd från den mot saltlösningen exponerade ytan



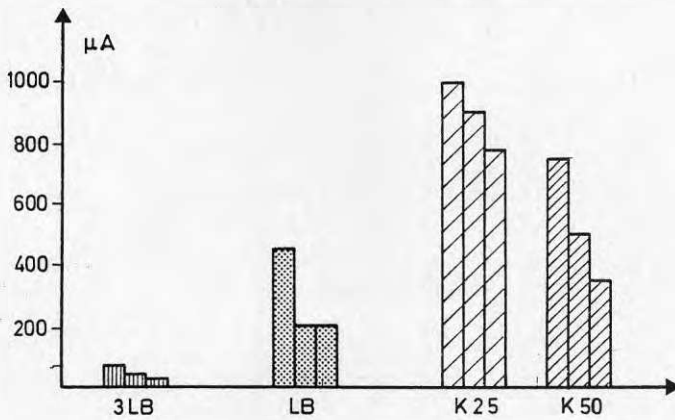


Fig 10.10 Den aktiva korrosionsströmmens styrka fastställd medelst polarisationsmätning i några betongtyper

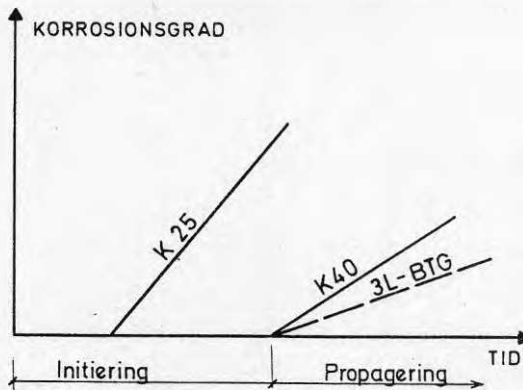


Fig 10.11 Schematisk skiss av stålets korrosionsförlopp i olika betongkvaliteter

Försöken indikerar att sprickor tycks ha ungefär samma betydelse på korrosionsförloppet i 3L-betong som i normalbetong.

Ehuru den ena försöksserien ännu inte kunnat avslutas kan dessutom följande slutsatser uppställas:

- Täcksiktet bör i miljöer där stål kan korrodera inte väljas mindre än 10 mm, därför att täcksiktet kan skadas av defekter orsakade av blåsbildning i betongytorna.

- Med hänsyn till den sprickbildning som kan uppstå parallellt med stängerna till följd av krympning och armeringsstängernas motstånd mot denna bör avståndet från armeringsstängerna till den betongyta som utsättes för en växelvis uttorkning - befuktning inte underskrida 15 mm (ex oskyddade tak).

#### 10.10.4 Rekommendationer till revidering av BBK 79

- Minimikrav på betongkvalitet och utförandeklass med hänsyn till armeringens korrosionsskydd

Miljö	Betongkvalitet	Tillverknings- och utförandeklass
Mycket armeringsaggressiv miljö	3L-betong med vct < 0,53 och krav på betongsammansättning	I
Måttlig armeringsaggressiv miljö	3L-betong med vct < 0,53 och krav på betongsammansättning	I
Obetydlig armeringsaggressiv miljö	All lättballastbetong med lättklinkerballast och tät struktur	I och II

- Samma krav på största acceptabla sprickbredd gäller som för normalbetong

- Minsta täckande betongskikt i mm med  
hänsyn till armeringskorrosion

Miljöklass	Föga korrosions- känslig armering	Korrosionsbe- nägen armering
Mycket arme- ringsaggressiv miljö	35	45
Måttlig arme- ringsaggressiv miljö	25	35
Obetydlig arme- ringsaggressiv miljö		
3L-betong med vct < 0,53 och krav på betong- sammansätt- ningen	10	20
All lättballast- betong med tät struktur och lättklinker- ballast	15	25

## 11 ÖVRIGA STUDERADE EGENSKAPER HOS 3L-BETONGEN

### 11.1 Formbarhet i hårdnat tillstånd

Ehuru någon sådan undersökning inte ingick i forskningsprogrammet gjordes ändå begränsade observationer. En oarmerad betongbalk sågades med stationär betongsåg upp i 20 mm tjocka betongskivor i längder om ca 1200 mm. Såghastigheten uppskattades till mellan 10 och 50 ggr snabbare än i normalbetong. Den var således inte helt jämförbar med sågning i trä men ändå snabb.

Noggrannheten hos de sågade ytorna var stor. Tjockleken varierade med 0,2 mm. Detta är noggrannare än man kan åstadkomma med trävirke och ytorna var fullt jämförbara med hyvlade träytor. Då betongens formändring vid uttorkning inte är mera än ca 1/10 av träets, förblir ytorna på längre sikt mera noggranna än motsvarande ytor i hyvlat trä. En viss krökning i längdriktningen kan man dock befara vid ojämn uttorkning.

För sågning av 3L-betong utan stationära sågar är elverktyg med diamanter eller tungstenskarbidskiva att föredra, med hänsyn till att man i många fall tvingas att skära av armeringsstänger.

Vid flera tillfällen har man använt yxa för att justera betongen. Detta låter sig enkelt göra.

Slipning av betongytor kan utföras med långt större hastighet än i normalbetong. Dammet kan emellertid vara besvärande. Man bör därför använda våtslipning eller dammsugare.

### 11.2 Infästningar i 3L-betong, anpassad sammanfogningsteknik

#### 11.2.1 Spikning

##### 11.2.1.1 Allmänt

3L-betong kan sammanfogas med andra byggnadsmaterial - i första hand trävirke - medelst spikning. Det är också möjligt att använda spik för infästning och upphängning av detaljer på väggarna.

I densitetsområdet 1000-1200 kg/m<sup>3</sup> kan man spika med vanlig handelsspik med hjälp av tryckluftsdreven spikpistol eller en vanlig hammare. Spikningen underlättas om man spikar genom ett annat spikbart material då detta kan fungera som styrning för spiken vid indrivningen. En möjlig övre gräns för spikning ligger vid 1300 kg/m<sup>3</sup>, över denna gräns kan man bara använda stålsplik.

Tryckluftsdrivna spikpistoler är avsedda för spikning i trä. Vid spikning i betong med densitet över  $1200 \text{ kg/m}^3$  kan ibland det rekommenderade lufttrycket för pistolerna vara för litet för att driva in spiken. Om man höjer lufttrycket något, går spiken lätt in i betongen. Emellertid kan detta i vissa pistoltyper tyvärr leda till att spiken inte matas fram automatiskt.

I rapport B 82:7 finns angivet vilka spik som visat sig lämpliga för spikning i 3L-betong. Allmänt gäller att skruvad eller kamgångad spik inte är bra, sannolikt därför att de smular sönder materialet längs spikytorna. Räckflad blank trådspik är bra, likaså varmförzinkad räckflad trådspik. Den senare har dock något mindre böjstyvhet och kröker sig därför lättare.

3L-betongen är så porös att det är möjligt att spika nära fria kanter utan att betongen spjälkas. Spik bör dock inte slås närmare kanten än ca 10 gånger den nominella spikdiametern  $d$ . Om spiken slås i rad parallellt med kanten ökar risken för att kanten spjälkas ut.

#### 11.2.1.2 Utdragshållfasthet för spiken

Allmänt är utdragskraftsförloppet för spik i 3L-betong snabbt sjunkande sedan utdragshållfastheten uppnåtts, förloppet kan karakteriseras som mera sprött än motsvarande för spik i trä.

Försöken visar att räckflad trådspik ger bäst utdragshållfasthet. Är spiken hartsad ökar detta utdragshållfastheten med nära 80%. Den karakteristiska utdragshållfastheten kan beräknas såsom

$$F_k = \tau_k d l_e$$

där  $l_e$  = effektiv förankringslängd enligt SBN 80 jfr tabell 2, rapport B 82:7  
 $d$  = nominell spikdiameter  
 $\tau_k$  = karakteristisk vidhäftningspåkänning

Det tillåtna värdet på vidhäftningspåkänningen

$$\tau_b = \frac{\tau_k}{\gamma}$$

varvid säkerhetsfaktorn  $\gamma$  enligt SBN 1977:1 är angivet till 3 och i SBN 1975:4 till 1,8 för primärt bärande konstruktioner vid vanligt lastfall.

Tabell 11.1 Tillåtna vidhäftningsspåkänningar  $\tau_b$  [MPa] för spik i 3L-betong vid korttidslast

Spik	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$		$\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$	
	$\gamma = 3,0$	$\gamma = 1,8$	$\gamma = 3,0$	$\gamma = 1,8$
Blank, varmförzinkad	0,30	0,50	0,55	0,90
Hartsad	0,50	0,85	0,95	1,60

För långtidsbelastning görs reduktion av den tillåtna vidhäftningshållfastheten i enlighet med SBN även om försöksunderlag fattas för den hartsade spikens del. För betongdensiteter över  $1100 \text{ kg/m}^3$  kan tills vidare de i tabell 11.2 angivna värdena för en  $1100 \text{ kg/m}^3$  betong ökas med 50% för varje  $100 \text{ kg/m}^3$  betongdensitet. Den förankrade utdragshållfastheten kan fullt utnyttjas bara om den förankrade spiklängden är större än 14d. I primärt bärande konstruktioner och i konstruktioner med risk för vibrationer bör dragkraftsupptagande spikförband inte användas.

Vid all islagning av spik - i såväl trä som 3L-betong - märker man mycket väl om en spik inte "drar" ordentligt. Vid spikning för hand är det möjligt att kassera sådana spik och därmed öka bärförmågan för spikförbandet.

#### 11.2.1.3 Tvärkraftshållfasthet

För tvärkraftsbelastad spik i 3L-betong bör man kunna påräkna ungefär samma hållfasthet som i trä, och detta torde bero på att det för träets del är den låga draghållfastheten och elasticitetsmodulen tvärs fiberriktningen som bestämmer dess tvärkraftshållfasthet. På liknande sätt som i träkonstruktioner är det osäkert vilka virkestjocklekar som utgör gränsen mellan de olika brottmekanismerna. Man kan utgå från att angivna värden och ekvationer i SBN 80 för trä även gäller för 3L-betong om spikens nr  $\leq 40$ . Fulla värden bör dock endast användas för spik inslagna i vardera sido- och mittstycke med minst 8d. Deformationerna i spikförbanden kan antagas i en  $1000 \text{ kg/m}^3$  betong vara ungefär 50% större än i trä, i en  $1100 \text{ kg/m}^3$  betong ungefär samma.

Spikförband bör tills vidare inte användas i primärt bärande och dynamiskt belastade konstruktioner utan att man vederbörligen har provat förbanden.



## 11.2.2 Skruv

Skruv utgör långt säkrare förbindningar mellan 3L-betong och andra material än spik och de krafter som man kan överföra - åtminstone i dragning - är av en annan storleksordning.

### 11.2.2.1 Fransk träskruv

Använd träskruv har i försöken varit av kvalitet 4.6 i skruvdimensionerna  $\phi = 6 - 10$  mm.

Förborring erfordras vanligen för fransk träskruv i såväl trä som i 3L-betong. I det senare materialet krävs en borrhål diameter  $d_b \geq$  kärndiametern och  $d_o \approx (2,5 + \phi/2)$  mm där  $\phi$  är nominell skruvdiameter om inskrivningen skall ske för hela den gängade skruvlängden. Om del av halsen skall skruvas ner i betongen måste det förborras minst med halsdiametern för motsvarande djup. En ökning av borrhål diameter utöver ovan angivna medför stark minskning av utdragshållfastheten, en minskning av borrhål diameter kan medföra att skruven skruvas av.

För enstaka skruv torde full dragförankring kunna påräknas för träskruv med nominell skruvdiameter mellan 6 och 10 mm med längd upp till 100 mm om centrumavståndet till närmaste fria kant är  $\geq 5\phi$ .

Utdragshållfastheten för enstaka skruv kan uppskattas till ca 40% av motsvarande i gran för betong med densitet  $1100 \text{ kg/m}^3$  och till 65% i en  $1300 \text{ kg/m}^3$  betong. Om skruven skruvas i och därefter skruvas ut sjunker utdragshållfastheten väsentligt vid förnyad iskrivning. Detsamma torde gälla om skruven slås in någon bit.

Vid skruvgrupper kan två brottmoder förekomma, antingen ren utdragning av skruven eller - om skruven placeras för nära varandra - en utdragen kon.

I skruvgrupper där ren utdragning förekommer föreslås med hänsyn till möjlig excentrisk lastinföring att utdragshållfastheten för gruppen  $F_u^n$  beräknas till

$$F_u^n = (n - 1) F_u$$

där  $n$  är antalet skruv och  $F_u$  den dimensionerande utdragshållfastheten för enskild skruv.

Med hänsyn till risken för utdragen kon måste

$$F_u^n \leq \pi R_2^2 f_{ct}$$

$$\text{där } R_2 = R_1 + 0,8(l_d - 1,5\phi)$$

där  $f_{ct}$  är betongens draghållfasthet och  $R_1$  visas i fig 11.2 samt  $l_d$  är skruvarnas gängade förankringslängd.

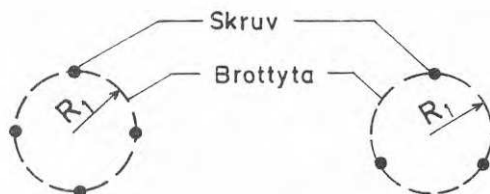


Fig 11.2 Schematisk skiss av möjliga utdragna koner vid fyra respektive tre skruvar

En tvärkraftsbelastad skruv i 3L-betong kan förväntas ha en hållfasthet motsvarande 90% av en i trä om betongdensiteten är ca  $1150 \text{ kg/m}^3$ . För densiteter över  $1200 \text{ kg/m}^3$  kan räknas med samma värden som i trä, för densiteter vid  $1000 \text{ kg/m}^3$  kan man på basis av erfarenheterna med tvärbelastad spik tills försöksunderlag föreligger antaga att hållfastheten är runt 40% av den i trä. För att erhålla två flytleder i skruven krävs en förankrad längd av skruven  $8\phi$ . För värden mellan  $5\phi$  och  $8\phi$  kan bärförmågan proportioneras i förhållande till förankringslängderna.

#### 11.2.2.2 Spånskiveskruv

En skruv avsedd för 22 mm spånskivor provades. Den kunde anbringas utan förborrning, men vid betongdensiteter över  $1200 \text{ kg/m}^3$  torde det vara svårt att skruva den helt in utan att skruvspåret skadas.

Utdragshållfastheten kan antagas vara samma som i trä för alla betongdensiteter över  $1150 \text{ kg/m}^3$ . För en  $1000 \text{ kg/m}^3$  betong erhöles värden som var ca  $1/2$  av de i trä.

#### 11.2.2.3 Expanderbult, kemiska ankare

Dessa typer av förbindningar användes ofta i normalbetong och fordrar förborrning. I 3L-betong kan borring utföras på bara  $1/3$  till  $1/5$  av motsvarande tid i normalbetong och i betong med densitet under  $1200 \text{ kg/m}^3$  kan borringen även utföras utan slagborrtröstning. En nackdel är det dock att hållfastheten vid utdragning är något lägre och att vid små avstånd till kant kan expanderbulten vid

idragning spräcka betongen. Några undersökningar med dessa typer av förankringar har inte utförts inom projektet.

### 11.3 Ljudisolering

#### 11.3.1 Luftljudsdämpning

Dämpning av luftljud i homogena väggar och golv beror i första hand på konstruktionens massa och i detta avseende följer 3L-betongen väl teorierna visar de studier som utförts vid Akustikinstitutionen vid CTH, rapport B 81:2. Medan en 160 mm tjock homogen normalbetongvägg eller platta uppfyller SBN's krav på minsta tillåtna luftljudisolering 53 dB för lägenhetsskiljande vägg eller golv, behövs en 200 mm tjock konstruktion om denna skall utföras i en  $1100 \text{ kg/m}^3$  3L-betong. Tabeller som visar luftljudisoleringen för olika konstruktioner i armerad 3L-betong av varierande densitet har utarbetats av Byggnadsfysik AB, och försök vid Bofors Nobel Kemi AB's nybygge verifierar dessa tabeller.

#### 11.3.2 Stegljudsdämpning

3L-betongens arbetskurva uppvisar inom det elastiska området ett nära rätlinjigt förlopp och detta indikerar att dämpningen i materialet är liten. Mätning av stegljudsdämpningen i en homogen 3L-betongplatta visar att denna indikation är rätt och att den i detta avseende är något sämre än ett utförande i normalbetong. Båda betongtyperna erfordrar dock vanligen tilläggskonstruktioner t ex mjuka mattor, undertak för att uppfylla SBN's krav.

#### 11.3.3 Slutsatser

Syftet med att använda 3L-betong i många konstruktioner är att reducera egentyngden. Då delmaterialkostnaderna ännu är relativt höga kommer man att söka materialsnåla konstruktioner som ytterligare kan reducera egentyngdsbelastningen. För tunna konstruktioner kommer därför ljudisolerande skikt att behövas, dvs att man söker en konstruktiv lösning för att kompensera den otillräckliga akustiska dämpningen. Det blir då de ljudisolerande materialens egenskaper och konstruktionens utformning som kommer att bestämma dämpningen och bara i ringa mån 3L-betongens ljudisolerande egenskaper.

### 11.4 Värmeledningstal

I försök utförda vid Byggnadsteknik, CTH, rapport B 82:6 - har konstaterats att 3L-betongens värmeledningstal överensstämmer med det provningstekniska

underlaget för de värmeledningstal som anges i SBN 80 för lättklinkerbetong.

Det låga  $\lambda$ -värdet hos 3L-betongen är inte tillräckligt lågt för att man skall kunna tänka sig homogena 3L-betongväggar med nämnvärd värmeisolerande förmåga. De höga värmeisoleringskraven de senare åren har dock resulterat i att köldbryggor får allt större effekt i normalbetongkonstruktionerna. Användning av 3L-betong innebär en avsevärd minskning av denna inverkan och kan leda till förenklade konstruktioner.

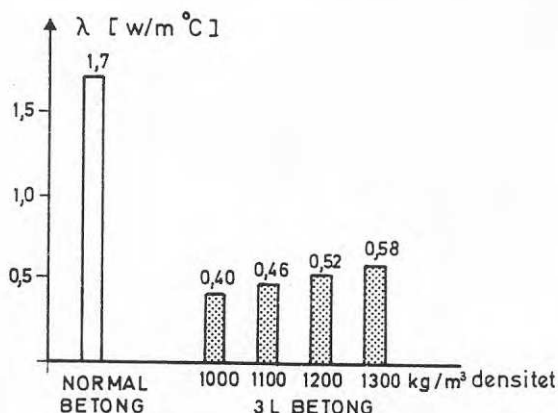


Fig 11.4 Praktiskt tillämpbara värmeledningstal för 3L-betong med olika densitet och normalbetong

Man bör även uppmärksamma det låga  $\lambda$ -värdet för betongen ur en annan synvinkel. Vid stationära temperaturförhållanden i en sammansatt konstruktion kommer temperaturfallet att vara större i 3L-betongskikten än i motsvarande i normalbetong. Det är en betydelsefull faktor för fukttransporten i dessa konstruktioner och bör beaktas t ex vid uttorkning av byggfukt.

#### 11.5 Värmekapaciteten

Enligt bl a Mannonen 1982 kan värmekapaciteten för all betong sättas till 0,28 Wh/kgK. Detta innebär att vid samma betongdimensioner kommer värmekapaciteten att vara proportionell med betongdensiteten. Till följd av det lägre  $\lambda$ -värdet kommer 3L-betongens fulla värmekapacitet vid tjocka konstruktioner inte att kunna utnyttjas. Å andra sidan känns 3L-betongen långt mindre kall vid vanliga rumstemperaturer än normalbetong.

## 11.6 Limning

3L-betongens består av ungefär samma beståndsdelar som normalbetong. Därför kan samma betonglim som idag finns på marknaden även användas på 3L-betong. 3L-betongen besitter mindre lös film i ytorna, dess struktur är mera porös och man kan därför förmoda att den rena vidhäftningen mellan lim och betong är bättre. Betonglimmen är emellertid utvecklade så att dragbrott inte skall förekomma mellan lim och betong. Då 3L-betongens draghållfasthet är lägre än normalbetongens kan den ökade vidhäftningen inte utnyttjas i praktiken. I gjutöverytorna besitter 3L-betongen ingen lös cementhud då den i det färska tillståndet inte blöder. Å andra sidan är koncentrationen av ballastkorn något större än i den övriga delen av betongen. De skjuv- och dragkrafter man kan överföra i en sådan limfog begränsas därför helt av 3L-betongens draghållfasthet.

För allt lim i kontakt med betong gäller att limmen successivt bryts ned i den alkaliska miljön som betongen utgör. Denna nedbrytning accelereras i en fuktig miljö. Det är därför viktigt att limfogen inte utgör en spärr för eventuella fukttransporter, vilket kan leda till hög fukthalt och ett ångtryck som på sikt leder till att vidhäftningen mellan lim och betong upphör.

Ovanstående resonemang bekräftas av preliminära, ej publicerade försök utförda av B Hedberg, CTH 1980.

## 11.7 Målning

Några grundläggande skillnader mellan 3L-betong och normalbetong med avseende på målning föreligger inte. Samma färger som visat sig vara bra för normalbetong kan således användas på 3L-betong. Man kan förmoda att vidhäftningen kan vara något bättre för 3L-betongens del med hänsyn till att de polymera mikropartiklarna har en benägenhet att koncentreras i ytorna. Man måste även vara uppmärksam på att 3L-betongen är mera diffusionsöppen än vanlig betong. Detta har ingen betydelse vid de första 2-3 strykningarna, men vid en upprepad målning av betongen kan ett inre ångtryck lättare leda till skador.

Koncentrationen av mikropartiklar i ytan reducerar vattensugningen och därmed färgförtjockningen vid appliceringen av den första strykningen. Detta minskar färgåtgången något och målningsarbetet går lättare.

Exempel på utförda målningsarbeten på 3L-betong är Gottåsas industribyggnader, Thermonites väggelement till Legalätts Energihus i Kungälv och CTH:s betongkanot, se bild.

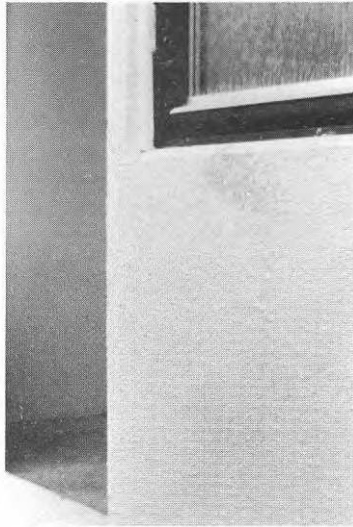


Bild 11.5 Målad fasadväggsyta tillverkad av Brännerona Cementgjuteri AB

#### 11.8 Kalkutfällningar

Indikerande försök visar att i detta avseende skiljer sig 3L-betongen inte från normalbetongen.

#### 11.9 Radongasutveckling

Beräkning baserad på Kriegers 1981 grunddata visar att 3L-betongen på grund av sin sammansättning och stora porositet är mindre radioaktiv än andra betongmaterial. Radioaktiviteten i vanlig betong är två till fem gånger större. Med hänsyn till att 3L-betongen kommer att utnyttjas i relativt tunna konstruktioner kommer radonutstrålningen i 3L-betongbostäder att vara liten. Man måste emellertid påpeka att så täta konstruktioner som 3L-betongen möjliggör, fordrar ventilation. Saknas sådan kan radonhalten av andra skäl komma att ligga på en för hög nivå.



## 12.1 Bakgrund

Avsikten med industrideltagande i en referensgrupp anknuten till projektet var bl a att forsknings- och utvecklingsresultaten snabbt skulle leda till produktutveckling på företagen. Därigenom skulle man genom företagens produktutveckling konfronteras med produktions- och konstruktionstekniska problem och samtidigt få underlag för kostnadskalkyler. Aktiviteterna har emellertid inte varit tillräckliga för att man här skall kunna ge någon allmängiltig teknisk-ekonomisk analys av 3L-betongens möjligheter.

Cementa AB utförde på uppdrag av projektledningen en marknadsanalys i vilken jämförelsen i huvudsak gjordes med normalbetong i hus- och industribyggnadssektorn, rapport B 82:12.

I denna analys studeras olika användningsområden för 3L-betongen: som stommaterial i husbyggnader, i platta på mark, i fasadelement och bjälklagselement i bostäder samt som material i byggskivor.

Analysen visar att 3L-betongen idag som stommaterial endast är ekonomiskt konkurrenskraftig med normalbetongen vid objekt då 3L-betongens låga egenvikt medför betydande reduktion av grundläggningskostnaderna. Som bärande del i fasadelement hänvisas till AB Gottåsas Cementgjuteris erfarenheter från tillverkning av industrifasader. I detta avseende har erfarenheterna med Thermonite House Building System senare visat att 3L-betongfasadelement är markant mera ekonomiska än motsvarande element i normalbetong.

I övrigt studerade appliceringar framgår av analysen att 3L-betongen knappast kan konkurrera med normalbetongen därför att materialpriset är för högt.

Emellertid har erfarenheterna från arbetena med Kungsbacka Stadshus visat att många av konsekvenserna av 3L-betong i konstruktioner inte har beaktats i rapport B 82:12. Här har framkommit att om man utnyttjar 3L-betongens speciella egenskaper kan den vara ett konkurrenskraftigt alternativ till normalbetongen i långt fler konstruktioner än sådana med svåra grundläggningsförhållanden. De samlade teknisk/ekonomiska erfarenheterna från "Kungsbacka Stadshus" kommer att publiceras under hösten 1982.

3L-betongen utgör ett intressant alternativ till andra byggnadsmaterial. Det kan vara en fördel ur såväl teknisk som ekonomisk synpunkt att ersätta trä och plåt med 3L-betong i olika väggkonstruktioner. Murade väggar i lättklinker- och gasbetongblock kan det vara intressant att ersätta med prefabricerade sandwichelement, därför att detta kan visa sig vara

en snabbare, billigare och tekniskt bättre konstruktion. Sådana jämförelser saknas i Cementas analys.

## 12.2 Grundläggande förutsättningar för en teknisk/ekonomisk jämförelse

Även med tillgång till det tekniska underlaget från Kungsbacka Stadshus kommer det att vara svårt att göra en allmängiltig teknisk/ ekonomisk bedömning av 3L-betongen. De ekonomiska förutsättningarna varierar från konstruktion till konstruktion och beror även på den tekniska utrustningen hos företagen.

En grundläggande förutsättning för en teknisk/ekonomisk bedömning av 3L-betongen är att denna utförs på ett för 3L-betongen lämpligt objekt. Syftet med 3L-betongen är inte att ersätta normalbetong - eller andra byggnadsmaterial - i alla lägen, men att utgöra ett komplement till eller ersättning av dessa om deras egenskaper inte är tillfyllest. Det objekt man väljer för bedömning skall alltså vara ett i vilket 3L-betongen kan innebära fördelar. Vidare förutsätter en rättvis bedömning att man verkligen utnyttjar 3L-betongens annorlunda egenskaper såväl för den konstruktiva utformningen som i produktionstekniken. Detta förutsätter förstås att man besitter tillräckliga kunskaper om betongen eller på annat sätt kan få tillgång till dessa.

Exempel på en konstruktion där 3L-betongens egenskaper till fullo har utnyttjats är Thermonite Vägg- och Takelement, och erfarenheterna visar nu att den tekniska kvaliteten är hög och priset för färdig vägg eller tak betydligt lägre än motsvarande konstruktioner i normalbetong. Preliminär utvärdering från projektet "Kungsbacka Stadshus" visar att med en genomtänkt planering från början i vilken man tagit konsekvenserna av 3L-betongen i alla produktions- och konstruktionsavseenden märkbart påverkar kostnadsbilden för 3L-betongen i positiv riktning.

Ett avskräckande exempel på hur man inte bör gå tillväga utgör det försök ett svenskt företag utförde för att studera 3L-betongens möjligheter. Referensobjektet som valdes var en platsgjuten källarvägg i vilken knappast några av 3Lbetongens speciella egenskaper utnyttjades varken i konstruktionsutförande och i produktionsavseende. Att den teknisk/ekonomiska bedömningen inte utföll till 3L-betongens fördel kunde man förutsäga utan försök. Tyvärr är risken stor att man härav drar slutsatsen att 3L-betongen inte kan konkurrera ens i andra sammanhang.

12.3 Egenskaper av betydelse för bedömning i jämförelse med normalbetong

12.3.1 Materialpriset

Materialpriset för 3L-betongen beror på följande faktorer:

- Lättballastens pris

För närvarande finns bara ett ballastfabrikat på den svenska marknaden. Denna ballast betingar en kostnad av ca 200 kr/m<sup>3</sup> betong och är till en stor del oljeprisberoende, vilket gör prognoser om den framtida kostnadsutvecklingen osäkra. Genom det utvecklingsarbete av mikropartikeltekniken som bedrivs inom Delcon-gruppen kan man redan idag förutspå en sänkning av lättballastkostnaden för sekundärkonstruktioner med ca 50 kr/m<sup>3</sup>.

- Priset på polymera mikropartiklar

Kostnaden för Cemos kan uppskattas till 60-70 kr/m<sup>3</sup> betong. Även detta pris är oljeprisberoende. Genom ett ökat användande och genom utvecklingsarbete är det realistiskt att räkna med en framtida sänkning även av denna kostnad.

- Cementpriset

Då mängden cement i 3L-betongen är högre än i vanlig betong inverkar kostnadsökningar för cementet mera för 3L-betongens del. Emellertid är dessa ofta betingade av desamma faktorer som övriga kostnader vid betonghantering varför detta knappast på ett avgörande sätt kommer att förrycka konkurrensbilden.

- Produktionsbetingelserna

Under ett inledningsskede kommer betongstationer som "ligger i malpåse" att användas för produktion av 3L-betong. Produktionen kommer att äga rum på deltid, vilket höjer 3L-betongkostnaden. Om man inte har tillgång till volymdosering av ballasten ökar kostnaderna för kontroll av betongkvaliteten. Fraktioneringen av lättballasten i 2-4, 4-9, 9-12 mm kommer att leda till viss sänkning av produktionskostnaderna och en reduktion av betongkontrollen. Vid en förbättring av produktionsbetingelserna kan priset på den färdiga betongen sänkas med 30-40 kr/m<sup>3</sup>.

- Det geografiska läget

Fraktkostnaderna för lättballasten beror på avståndet från fabrik. För södra Sverige kan detta innebära variationer i fraktkostnaderna motsvarande 30 kr/m<sup>3</sup>.

I Göteborgs-området är idag priset för 3L-betong levererad på arbetsplats ca 530 kr/m<sup>3</sup> medan normalbetong betingar ett pris av ca 280 kr/m<sup>3</sup>. Det är emellertid möjligt att prisskillnaden 250 kr/m<sup>3</sup> inom några år kan sänkas till 150-170 kr/m<sup>3</sup> under förutsättning att oljepriset förblir stabilt, vilket märkbart kan ändra konkurrenssituationen för 3L-betongen.

### 12.3.2 Egentyngden

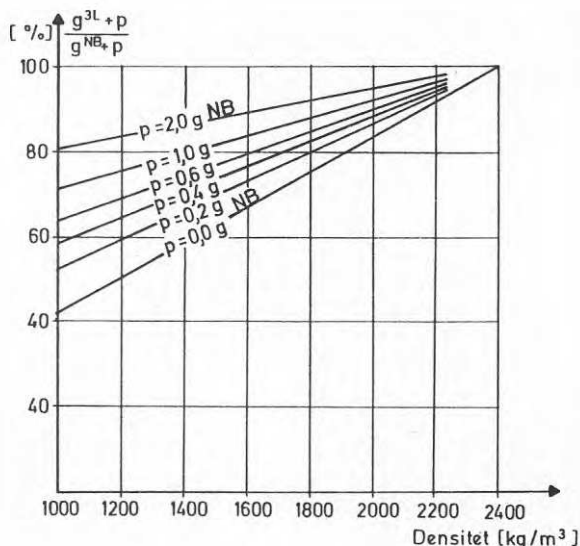


Fig 12.1 Belastning på en konstruktion av lättballastbetong med olika densitet och med varierande nyttolastandel  $p$ , i jämförelse med belastningen på en konstruktion i samma utförande av normalbetong.  $g$  = egenviktsbelastning

#### - Konstruktionstekniska besparingar

Belastningsreduktionen kan uppskattas till 30-40% i konstruktioner där nyttolastandelen är låg. Detta innebär en reduktion av armeringskostnader i storleksordningen 80-100 kr/m<sup>3</sup>.

Grundläggingskostnaderna reduceras betydligt i synnerhet om kohesionspålning erfordras. För Kungsbacka Stadshus kunde denna besparing uppskattas till 160 kr/m<sup>3</sup> betong. I fall då kompensationsgrundläggning kan ersätta pålning eller vid utnyttjande av flytpålar är kostnadsreduktionen ännu större.

Vid om- och tillbyggnader kan 3L-betongen möjliggöra användning av betong i stället för andra kanske mindre lämpliga byggnadsmaterial. Exempel:

På Hotell Europa, Göteborg, kunde påbyggas två våningar i stället för en. Bjälklagskonstruktionen utgjordes av 3L-betong gjuten på profilerad plåt som förlorad form. Byggindustrin 19/1982.

- Produktionstekniska besparingar vid elementtillverkning

Elementen kan utföras mer än 2 gånger större än i normalbetong. Transportvolymen kan mer än fördubblas. Färre element innebär snabbare montage, färre fogar och mindre fognings- och sammanbindningsmaterial. Armeringen kan reduceras i förhållande till den totala belastningsreduktionen. Transportarmeringen kan halveras.

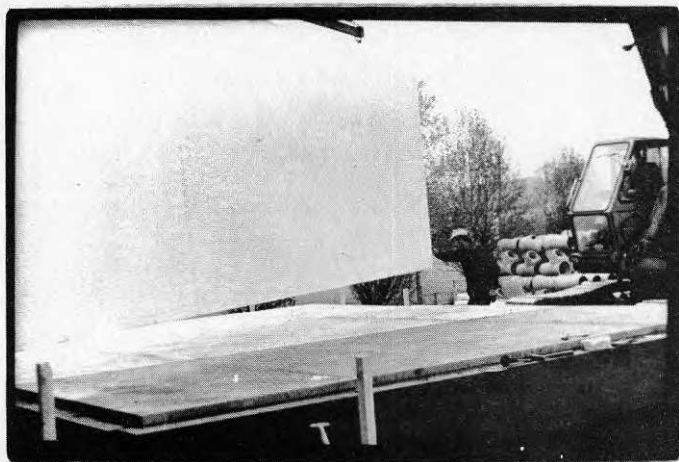


Bild 12.2 Kombinationen låg densitet och tunna betongdimensioner medför att 3L-betongelementen kan göras stora

- Produktionstekniska besparingar vid platsgjutningar

Transportvolymen kan fördubblas i alla led. Vid horisontella gjutningar innebär den lägre egen tyngdsbelastningen färre antal balkar och stämp, vid vägggjutningar större stighastighet och enklare formutrustning.

### 12.3.3 Bra beständighet

Bra frostbeständighet och bra skydd mot armeringskorrosion innebär att 3L-betong kan användas i de flesta miljöer där man fordrar normalbetong av hög kvalitet (hållfasthet). I sådana miljöer skall man prismässigt inte jämföra 3L-betongen med standardbetongen K25 men med en K40 till 50.

Den förbättrade brandbeständigheten och värmeisoleringsegenskaperna vid höga temperaturer betyder att man i olika konstruktioner kan reducera betongdimensioner om man använder 3L-betong.

#### 12.3.4 Hållfasthetstillväxt

Denna är betydligt snabbare än i vanlig betong vilket bör utnyttjas. Detta fordrar dock att man har tillgång till tillförlitliga provningsmetoder så att en säker avformningstidpunkt kan väljas. Den ekonomiska vinsten varierar med konstruktionstyp och -del. Några riktlinjer för hur stor denna kan vara är därför svårt att ange på basis av de begränsade appliceringarna som finns.

#### 12.3.5 Formbarhet i hårdnat tillstånd

Ursparingar kan sågas eller borraras ut. Forminlägg kan slopas, formarna skadas mindre. Slipningar av ytor är flera gånger snabbare än med normalbetong.

#### 12.3.6 Sammanfogningar, infästningar

Tiden för applicering av varje infästning utgör bara en tredjedel till en femtedel av motsvarande med en normalbetong. I de flesta fall medger 3L-betongen att man kan övergå från en komplicerad typ av infästning till en enklare och billigare. I några fall kan tidsåtgången för varje infästning reduceras betydligt.

#### 12.3.7 Målning

Färgåtgången vid första strykningen är avsevärt mindre än för normalbetongens del.

#### 12.4 Egenskaper av betydelse för bedömningen i jämförelse med trä

Materialpriset innan gjutning torde ligga mellan 1/3 till 1/2 av träets.

Egentyngden är ungefär den dubbla.

Beständigheten är betydligt bättre i många miljöer.

Trä är starkt vattenabsorberande. Det ruttnar i fuktig miljö och det finns risk för mögel och svampangrepp. Trä brinner lätt. Trä fuktdeformeras 10 till 50 gånger mer.

Ersättning av trä (även tryckimpregnerad) i olika konstruktionsdetaljer kan minska risken för skador och starkt reducera underhållskostnaderna.

Formbarheten i färska tillståndet är överlägset träets. Man är inte så dimensionsberoende.

Formbarheten i hårdnade tillståndet är något sämre dock jämförbar med träets.



Bärförmågan vid samma dimensioner är ungefär samma.

Hållfasthets- och deformationsegenskaperna är i trä beroende av fiberriktningen.

Dämpningen i 3L-betong är något mindre än träets.

Baserat på sju års forskning och erfarenheter med 3L-betongen i laboratorier och praktiska appliceringar kan följande slutsatser uppställas:

- Polymera mikropartiklar - Cemos 110 - stabiliserar luftporer i den färska betongen, ökar sammanhållningen i betongen så att även lätta ballastmaterial såsom LECA kan användas utan att ballasten segregerar.
- Enligt samma fysikaliska lagar som för den vanliga betongen måste krav ställas på ballastens fraktionering så att man erhåller goda gjutegenskaper och en strukturell tät betong.
- Allmänna riktlinjer för proportionering av 3L-betongen har uppställts.
- Cemos minskar ballastens vattenabsorption och därmed ändras den färska betongens konsistens bara obetydligt vid transport och gjutning. Av denna anledning är en fuktig eller förvattnad ballast varken nödvändig eller önskvärd.
- Vid tillverkning, transport och gjutning av den färska 3L-betongen bör man ta hänsyn till 3L-betongens tixotropi och låga vikt. Transportvolymererna kan ökas markant.
- Hållfasthetstillväxten är betydligt snabbare än den vanliga betongens.
- I armerade konstruktioner med relativt liten nyttolastandel är 3L-betongens hållfasthets- och deformationsegenskaper så bra att den är tekniskt jämförbar med normalbetong.
- Projektet har givit underlag till förslag till revidering av vissa materialkaraktistika och beräkningsmodeller i BBK 79, se kap 9.
- Mikropartiklarna bildar en beständig, polymer film på 3L-betongens por- och kapillärväggar, ger betongen en optimal struktur och ändrar därmed dess attityd gentemot fukt och vatten.
- 3L-betongens frost-, brand- och kemiska beständighet samt dess skydd mot armeringskorrosion är lika bra eller bättre än normalbetong av hög kvalitet.
- En klassificering av 3L-betongen för olika miljöklasser i BBK 79 med avseende på armeringens korrosionsbeständighet och krav på täckskikt föreslås.
- 3L-betongens bearbetbarhet i det hårdnade stadiet påminner om träets.

- Sammanbindningsteknik känd från träkonstruktioner t ex spikning, skruvning, limning kan användas, dock tills vidare med viss försiktighet.
- 3L-betongen är mindre ljudabsorberande, och för lägenhetsskiljande konstruktioner behövs vanligen tilläggskonstruktioner.
- Dess nötningsmotstånd är sämre än normalbetongens och bör därför inte användas i hårt trafikerade områden utan förstärkningsåtgärder i form av slitlager.
- Även om delmaterialens kostnad är betydligt högre än normalbetongs kan totalkostnaderna för ett bygge vara lägre om man tar hänsyn till 3L-betongens alla speciella egenskaper.

## LITTERATUR

Anderberg, Y, 1976, Fire Exposed Hyperstatic Concrete Structures - An Experimental and Theoretical Study. Tekniska högskolan i Lund, avd Byggnadsstatik, Bulletin 55.

Berge, O, 1978, Hydrofob 3L-betong, ett attraktivt nytt byggnadsmaterial. Nordisk Betong 6/1978, Stockholm.

Berge, O, Berntsson, L, Hedberg, B, Losberg, A, 1978, Användning av extremlätt hydrofob betong. Chalmers tekniska högskola, avd Betongbyggnad, Göteborg, Rapport 78:1.

Berge, O, Losberg, A, 1978, Partially Prestressed 3L-Concrete. Chalmers tekniska högskola, avd Betongbyggnad, Göteborg, Publikation 78:4.

Berge, O, 1980, 3L-betongen - Det nya byggnads- materialet. Betongprodukter 2/1980, Oslo, juni 1980.

Berge, O, 1981, Armerade konstruktioner i lättballastbetong. Chalmers tekniska högskola, avd Betongbyggnad, Publikation 81:3.

Bernander, K-G, 1955, Något om samverkan mellan högvärdig armering och betong. Chalmers tekniska högskola, Inst för Byggnadsteknik, Göteborg.

Berntsson, L, 1979, 3L-betong. Råd och anvisningar för betongtillverkning. Concrete Development DELCON AB, V Frölunda, 1979.

Berntsson, L, 1981, 3L-betongen - Den nya lättballastbetongen. Byggmästaren, sept 1981.

Berntsson, L, 1982, Proportionering av 3L-betong. Chalmers tekniska högskola, avd Byggnadsmaterial, Göteborg, Rapport 82:15.

Chandra, S, Berntsson, L, Anderberg, Y, 1980, Some effects of polymer addition on the fire resistance of concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 10, 1980.

Chandra, S, Flodin, P, 1980, Discussion of the papers "The effect of dicalcium silicate and tricalcium silicate on the thermal stability of vinyl type polymer concrete" and "Hydrothermal stability of vinyl type polymer concrete containing tricalcium silicate" by Sugama, T and Kukacka, K E. Cement and Concrete Research, Vol. 10, 1980.

Fagerlund, G, 1980, Frost Resistance of Concrete with Porous Aggregates. Cement- och Betonginstitutets rapport nr Fo 7712, Stockholm.

Fagerlund, G, 1980, Golv på mark utan fuktskador, BPA Byggproduktion AB - Svenska Riksbyggen, Stockholm, Handling nr 32, 1980.

Hedberg, B, Berntsson, L, Berge, O, 1979, The Hydrophobe 3L-Concrete. A State-of-artreport. Paper presented at the FIP Commission on Lightweight Concrete Meeting, Rio de Janeiro, Oct 1979. Chalmers tekniska högskola, avd Betongbyggnad, Göteborg, Rapport 79:2.

Jaegermann, C H, Karl, S, Weigler, H, 1976, Konstruktionsleichtbeton mit abgeminderter Rohdichte - Möglichkeiten und Eigenschaften. Betonwerk+Fertigteiltechnik, Heft 11/ und 12/1976.

Karl, S, Weigler, H, 1978, Konstruktionsleichtbeton mit abgeminderter Rohdichte. Leichtzuschlag-Schaumbeton. Betonwerk+Fertigteiltechnik, Heft 9 und 10/1978.

Krieger, R, 1981, Radioaktivität von Baustoffen. Betonwerk+Fertigteiltechnik, Heft 8/81.

Mannonen, M, 1982, Thermal Insulation of Lightweight Concrete. Proceedings of The 9th International Congress of the FIP, Stockholm 1982.

Schulze, W, Günzler, J, 1968, Korrosionsschutz der Bewehrung im Leichtbeton. Betonsteinzeitung, Heft 5/1968.

Skarendahl, A, 1973, Lättballast och lättballastbetong. Cement- och Betonginstitutet, Stockholm, Publ nr 47, 1973.

Tepfers, R, 1973, A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars. Chalmers tekniska högskola, avd Betongbyggnad, Publikation 73:2.

Tuutti, K, 1981, Armeringskorrosion. Föredrag vid Cement- och Betonginstitutets informationsdag 1981.

Öberg, S, Losberg, A, 1978, Ej publicerad analys av försöksresultat avsedd som underlag för BBK 79, 1978.

Öberg, S, 1980, Gränslastmetodens användning för armerade betongbalkar på oeftergivliga stöd, Chalmers tekniska högskola, avd Betongbyggnad, Göteborg, Rapport 80:3.

Östlund, L, 1963, Inverkan av bockningsradier och täckande betongskikt hos kamstål på spjälkningsrisken för armerade betongkonstruktioner. (Stencil). Kgl Tekniska Högskolan, Stockholm.

Johansson, S, 1982, 3L - morgondagens betong. Byggindustrin 19/1982, Stockholm.

Bestämmelser och handböcker

BBK 79, 1979, Bestämmelser för betongkonstruktioner, Band 1

Konstruktion, Band 2 Material, utförande, kontroll. Statens Betongkommitté.

B5, 1968, Bestämmelser för betongkonstruktioner, Material och utförande, Betong. Statens Betongkommitté.

SBN 1980, Svensk Byggnorm 1980. Statens Planverks författningssamling.

Betonghandboken-Konstruktion, Betonghandboken-Material, 1980, Svensk Byggtjänst.

DIN 1045, Beton- und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung, Deutscher Normenausschuss.

DIN 4226, Blatt 1, Zuschlag für Beton, Zuschlag mit dichtem Gefüge, Blatt 2, Zuschlag für Beton, Zuschlag mit porigem Gefüge, Begriffe, Bezeichnung, Anforderungen und Überraschung.

CEB/FIP, 1978, Model Code for Concrete Structures. Committé Euro-International du Béton.

CEB/FIP, 1977, Manual of Lightweight Aggregate Concrete. Committé Euro-International du Béton.



Rapporter inom projektet "Hydrofob 3L-betong"  
utgivna av Betongbyggnad, CTH

- B 81:2 Mätningar av ljudisoleringen hos 3L-betongen utförda av Byggnadsfysik AB inom projektet "Konstruktioner i hydrofob 3L-betong."
- B 82:1 Berge, O, Sobko, W, Slakarmerade 3L-betongbalkar.
- B 82:2 Berge, O, Tomaszewicz, A, Sobko, W, Partiellt förespända balkar i 3L-betong. Långtidsförsök.
- B 82:3 Berge, O, 3L-betongens arbetskurva vid fri och förhindrad tvärutvidgning.
- B 82:4 Öberg, S, Tryckzonskaraktäristika bestämda på balkar i hydrofob 3L-betong.
- B 82:5 Öberg, S, Böjförök på balkar i hydrofob 3L-betong.
- B 82:6 Aavik, J, Berge, O, Bestämning av 3L-betongens värmeledningsförmåga.
- B 82:7 Öberg, S, Infästningar i 3L-betong.
- B 82:10 Olsson, P-Å, Förankring av kamstångs-armering i lättballastbetong.
- B 82:12 Watz, U, Marknadsanalys för 3L-betong. Denna rapport utgör en del i Cementa AB:s åtaganden inom projektet "Konstruktioner i hydrofob 3L-betong".
- B 82:13 Byfors, J, Vattenabsorption med 3L-betong. Bestämning av ångdiffusionstal för 3L-betong. Jämförande frysförsök med 3L-betong och vanlig betong.
- B 82:14 Anderberg, Y, Brandprovning av tunna betongelement. Risk för explosiv spjälkning. Brandprovning av förspända T-balkar i 3L-betong och vanlig betong. Risk för explosiv spjälkning.
- B 82:15 Olsson, P-Å, Förankring och skarvning av svetsat armeringsnät i 3L-betong.
- B 82:16 Chandra, S, Berge, O, Värmeledningsförmågan i 3L-betong vid höga temperaturer.
- B 82:17 Sobko, W, Olsson, P-Å, Jämförande fuktförsök i lättballastbetong och normalbetong. Uttorkning, sprickutveckling, infuktning.

Rapporter och publikationer inom projektet "Hydrofob 3L-betong" utgivna av Byggnadsmaterial, CTH

- M 82:1 Aavik, J, Berge, O, Hållfasthets- och deformationsegenskaper hos hydrofob 3L-betong med filmbildande mikropartiklar.
- M 82:2 Chandra, S, Some aspects of freeze-thaw resistance test.
- M 82:3 Chandra, S, Frost resistance and other properties of cement mortar with and without admixtures.
- M 82:4 Chandra, S, Freeze-thaw resistance of 3L-concrete and normal concrete with microparticles.
- M 82:5 Aavik, J, Chandra, S, Outdoor freeze-thaw resistance test of lightweight aggregate concrete with polymer microparticles.
- M 82:6 Chandra, S, Bertnsson, L, Chemical durability of lightweight aggregate concrete with polymer microparticles (3L-concrete).
- M 82:7 Aavik, J, Berge, O, Ångdiffusionstalet för 3L-betongen.
- M 82:8 Chandra, S, Hedberg, B, Berntsson, L, Berge, O, Brandövningsplatta i Östersund.
- M 82:9 Berge, O, Aavik, J, Berntsson, L, Karbonatiseringsdjup i 3L-betong och normalbetong.
- M 82:10 Hedberg, B, Korrosion i armeringsstål ingjutna i sprucken 3L- och normalbetong.
- M 82:11 Berge, O, Aavik, J, Korrosionsskydd av areringen vid varierande täcksiktstjocklekar i 3L-betong och normalbetong av olika kvalitet.
- P 82:2 Berge, O, Hedberg, B, Berntsson, A, Losberg, A, Polymer admixture for stabilizing structure of lightweight aggregate concrete. Presenterad av Roman Malinowski vid ACI Committee 213 "Lightweight Aggregate Concrete" möte i Houston 1978.
- Chandra, S, Berntsson, L, Anderberg, Y, Some effects of polymer addition on the fire resistance of concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 10, 1980.
- Berntsson, L, 3L-betongen - Den nya lättballastbetongen, Byggmästaren nr 6, 1980.

APPENDIX

EXEMPEL PÅ PROPORTIONERING AV 3L-BETONG



I det följande avsnittet skall genomföras tre exempel på proportionering, nämligen i hållfasthetsklasserna K8, K12 och K16. Proportioneringsmetoden finns beskriven i "Proportionering av 3L-betong" av Leif Berntsson.

I exemplen har antagits egenskaper hos betongens delmaterial som kan avvika från dem som finns på marknaden. Dock har i största möjliga omfattning utnyttjats verkliga uppmätta egenskaper såväl från praktiken som vid laboratorieförsök.

Avsikten med exemplen är att de skall kunna vara till någon hjälp vid framtida proportionering av 3L-betong.

Skulle det vid proportioneringen visa sig att vissa krav inte kan uppfyllas skall man kunna ha frihet till kompromisser. I första hand kan man vara tvingad att ändra på gränsen för skrymdensitet och utbredningsmått. Andra möjligheter kan vara att utbyta ett delmaterial mot ett annat.

#### A.1 Proportionering av K8

##### A.1.1 Krav

Tryckhållfasthet: Första serien 12 MPa, efterföljande serier 11 MPa.

Skrymdensitet: 1100 kg/m<sup>3</sup> vid normaltidsålder

Utbredningsmått: 38 ± 1 cm

##### A.1.2 Cement

Standard portlandcement skall användas.

##### A.1.3 Sand

Sanden, som betecknas 0-2 mm, har följande sammansättning:

0	-0,125 mm	10%
0,125	-0,25 mm	20%
0,25	-0,5 mm	36%
0,5	-1 mm	22%
1	-2 mm	12%

Korn > 2 mm saknas.

Korndensiteten antas till 2650 kg/m<sup>3</sup>

Fuktkvot = 6%

#### A.1.4 Lättballast

Följande sammansättning av lättballasten skall uppnås:

2- 4 mm	40 volymprocent
4- 8 mm	33 volymprocent
8-16 mm	27 volymprocent

Tillgängliga lättballastmaterial:

Fraktion: 2- 4 mm	$\rho_{\text{korn}} = 640 \text{ kg/m}^3$	(torrt material)
4- 8 mm	$\rho_{\text{korn}} = 570 \text{ kg/m}^3$	( - " - )
8-16 mm	$\rho_{\text{korn}} = 570 \text{ kg/m}^3$	( - " - )

Dessa fraktioner skall blandas så att man erhåller den förut angivna volymfördelningen.

Ballastens fuktkvot antas till 5%.

Medelkorndensiteten för fuktigt material:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{korn}} &= 0,40 \cdot 1,05 \cdot 640 + 0,33 \cdot 1,05 \cdot 570 + 0,27 \cdot 1,05 \cdot 570 = \\ &= 628 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

#### Betongens sammansättning

Antag att  $\gamma_{\text{färsk}} = 1100 \text{ kg/m}^3$

Sandmängd:

Förhållande sand till cement för  $\gamma_{28} = 1100 \text{ kg/m}^3$ .

$$n_f = 0,28 \quad C = 315 \text{ kg/m}^3 \text{ (figur 5)}$$

Finbruksvolym =  $0,495 \cdot 0,99 = 0,490$  (figur 4 och tabell 1)

$$\begin{aligned}\text{Sandmängd } n &= \frac{S}{C} = 0,90 \text{ (figur 5)} \quad 0,90 \cdot 315 = 284 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Volym} &= 0,107 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Lättballastens tryckhållfasthet i betongen:

Beräkning enligt (formel 9)

$$\begin{aligned}\log f_{1a} &= 1,14 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\rho_{1a} h}{1+h} + 0,174 = 1,14 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{628}{1,05} + 0,174 = \\ &= 0,85583\end{aligned}$$

$$f_{1a} = 7,2 \text{ MPa}$$

Brukets skrymdensitet och tryckhållfasthet i betongen:

$$\gamma_{gb} = \frac{\gamma_{btg} \cdot \rho_{1a}}{\nu_{gb}} + \rho_{1a} = \frac{1100 - 628}{0,490} + 628 = 1591 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{btg} = 0,490 \cdot 1591 + 0,510 \cdot 628 = 1100 \text{ kg/m}^3$$



(Formel 6) Välj betongens tryckhållfasthet,  $f_{btg} = 13 \text{ MPa}$

$$\log f_{gb} = \frac{1}{v_{gb}} (\log f_{btg} - \log f_{la}) + \log f_{la} = \frac{1}{0,49} (\log 13 - \log 7,2) +$$

$$+ \log 7,2 = 1,3810 \quad f_{gb} = 24,0 \text{ MPa}$$

Vattencementtal och vattenluftcementtal:

(Formel 10)

$$vlct = 2,503 - \frac{\log f_{gb}}{0,8645} = 2,503 - \frac{\log 24,0}{0,8645} = 2,503 - 1,597 = 0,906$$

$$\text{Lufthalten} = 1,0 \cdot 0,205 \cdot 0,49 = 0,100$$

$$vct = 0,906 - \frac{0,100 \cdot 10^3}{315} = 0,906 - 0,317 = 0,589$$

$$\text{Vattenhalt} = 0,589 \cdot 315 = 186 \text{ kg/m}^3$$

Konsistens och erforderlig vattenhalt:

$$\text{Ballastvolymen} = \frac{0,90 \cdot 315}{2650} + 0,510 = 0,617 \text{ m}^3$$

$$\text{Sand: } \frac{0,107}{0,617} = 0,173$$

$$2-4 \text{ mm: } \frac{0,510 \cdot 0,40}{0,617} = 0,331$$

$$4-8 \text{ mm: } \frac{0,510 \cdot 0,33}{0,617} = 0,273$$

$$8-16 \text{ mm: } \frac{0,510 \cdot 0,27}{0,617} = 0,223$$

Delkomponenternas vattenbehov

Fraktion	Sand	2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
0-0,25 mm	$0,173 \cdot 0,30 \cdot 0,58 = 0,0301$			
0,25-0,5 mm	$0,173 \cdot 0,36 \cdot 0,27 = 0,0168$			
0,5-1 mm	$0,173 \cdot 0,22 \cdot 0,17 = 0,0065$			
1-2 mm	$0,173 \cdot 0,12 \cdot 0,12 = 0,0025$			
2-4 mm		0,0331		
4-8 mm			0,0216	
8-16 mm				0,0132
		0,0559	0,0331	0,0216
				0,0132
				$A_b = 0,1238$

(Formel 21)

$$k_c = 1,20 - \frac{\gamma_{btg}}{5,375(u^2-400)} = 1,20 - \frac{1100}{5,375(38^2-400)} =$$
$$= 1,20 - 0,196 = 1,004$$

(Formel 20)

$$v_w = k_c \cdot \frac{v_c(0,80-A_b) + v_c(0,32-A_b) + A_b - 0,0064}{1 + A_b} =$$
$$= 1,004 \cdot \frac{\frac{315}{3150}(0,80-0,1238) + 0,103(0,32-0,1238) + 0,1238 - 0,0064}{1,1238} =$$
$$= 0,183 \text{ m}^3$$

		<u>Volym</u>
Cement	315 kg/m <sup>3</sup>	0,100
Sand	284 -"-	0,107
2-4 mm	137 -"-	0,204
4-8 mm	101 -"-	0,168
8-16 mm	82 -"-	0,138
Vatten	183 -"-	0,183
Luft		0,100
	1102 -"-	1,000

Tillsats av Cemos inräknas i vattenvolymen.

$$3 \cdot 10^{-2} \cdot 315 = 9,5 \text{ kg} \approx 10 \text{ l, vari ingår 7 l vatten.}$$

Vattenabsorptionen i lättballasten (Formel 24 och 25)

$$v_{abs} = h \cdot m_{lb} \cdot 10^{-3} = 0,4(0,15 - 0,05) \cdot 320 = 12,8 \text{ kg}$$

$$\text{Vatten i sanden} = 0,06 \cdot 284 = 17,0 \text{ kg}$$

Blandningsrecept:

Cement	315 kg/m <sup>3</sup>	<u>Skrymvolym (m<sup>3</sup>)</u>
Sand	300 -"-	
2-4 mm	137 -"-	137/(672·0,58) = 0,350
4-8 mm	101 -"-	101/(599·0,56) = 0,300
8-16 mm	82 -"-	82/(599·0,55) = <u>0,250</u>
Vatten 183-10+12,8-17=	169 -"-	0,900
Cemos	10 -"-	

Den färiska betongens skrymdensitet bör vara omkring 1100 kg/m<sup>3</sup>.

## A.2 Proportionering av K12

### A.2.1 Krav

Tryckhållfasthet: Första serien 16 MPa, efterföljande serier 15 MPa.

Skrymdensitet: < 1250 kg/m<sup>3</sup> vid normaltidsålder.

Utbredningsmått: 38 ± 1 cm

### A.2.2 Cement

Standard portlandcement skall användas.

### A.2.3 Sand

Sanden, som betecknas 0-4 mm, har följande sammansättning:

0	-0,125 mm	14%
0,125-0,25	mm	15%
0,25-0,5	mm	21%
0,5-1	mm	23%
1-2	mm	15%
2-4	mm	9%
4-8	mm	3%

Innehåll av korn > 2 mm är 12%.

Korndensiteten antas till 2650 kg/m<sup>3</sup>.

Fuktkvot = 4%.

### A.2.4 Lättballast

Lättballast på marknaden kan erhållas i området 2-12 mm. Det har visat sig att detta fraktionsområde är lämpligt att använda för 3L-betong i allmänhet. Den sammansatta lättballasten bör ha följande sammansättning:

2- 4 mm	45	volymprocent
4- 8 mm	38	"-
8-12 mm	17	"-

Följande fraktioner finns med nedan angivna egenskaper. (Siffrorna anger viktprocent, korndensiteten gäller för torrt material.)

Kornstorlek	Fraktion (2-4 mm)	Fraktion (4-12 mm)	Korndensitet (kg/m <sup>3</sup> )
0 - 0,25 mm	1	1	1500
0,25- 0,5 mm	-	-	-
0,5 - 1 mm	-	-	-
1 - 2 mm	-	-	-
2 - 4 mm	95	1	840
4 - 8 mm	4	40	780
8 -12 mm	-	56	700
12 -16 mm	-	2	650

Det är uppenbart att man inte kan blanda dessa två fraktioner (2-4) och (4-12) så att man ens kommer i närheten av den önskade sammansättningen. För den skull har man anskaffat ett annat material med kornstorleken 4-8 mm och korndensiteten 620 kg/m<sup>3</sup>. Uppgiften blir nu att välja andelar av de tre tillgängliga materialen så att man får en sammansatt lättballast som så nära som möjligt blir den önskade.

Fuktkvoten för materialen:

2- 4 mm	7%
4- 8 mm	8%
4-12 mm	10%

Volymsammansättning:

Kornstorlek	Fraktion (2-4 mm)	Fraktion (4-8 mm)	Fraktion (4-12 mm)
0 - 0,25 mm	0,6		0,5
0,25- 0,5 mm	-		-
0,5 - 1 mm	-		-
1 - 2 mm	-		-
2 - 4 mm	94,9		0,9
4 - 8 mm	4,5	100	37,6
8 -12 mm	-		58,7
12 -16 mm	-		2,3

$$\text{Andel av 2-4 mm: } \frac{45}{94,9} = 0,474$$

Antag X = andel av fraktion 4-8 mm

$$0,38 - 0,045 \cdot 0,474 - 0,376(1 - 0,474 - X) = X$$

$$X = 0,258$$

Andel av 4-12 mm: 0,268

	(2-4)	(4-8)	(4-12)	$\Sigma$
0 - 0,25	0,3	-	0,1	0,4
0,25- 0,5	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-
1 - 2	-	-	-	-
2 - 4	45,0	-	0,2	45,2
4 - 8	2,1	25,8	10,1	38,0
8 -12	-	-	15,7	15,7
12 -16	-	-	0,6	0,6
	47,4	25,8	26,7	
$\rho_{\text{torr}} =$	842	620	733	
$\rho_{\text{fukt}} =$	901	670	806	

$$\rho_{\text{korn}} = 0,004 \cdot 1500 + 0,452 \cdot 840 + 0,122 \cdot 780 + 0,258 \cdot 620 + 0,157 \cdot 700 + 0,006 \cdot 650 = 754,6 \approx 755 \text{ kg/m}^3$$

Korndensitet för fuktigt material:

$$842 \cdot 1,07 \cdot 0,474 + 620 \cdot 1,08 \cdot 0,258 + 733 \cdot 1,10 \cdot 0,267 = 815 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Medelfuktkvot } \frac{815-755}{755} = 7,9\%$$

#### Bestämning av betongens sammansättning

Vid normallagring minskar betongens skrymdensitet i medeltal med  $40 \text{ kg/m}^3$ . Provkropparna, som är standardkuber, förvaras i  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  och 40-80% relativ fuktighet efter avformning.

$$\text{Antag att } \gamma_{\text{färsk}} = 1250 \text{ kg/m}^3$$

Sandmängd.

I sanden finns 12% korn med  $d > 2 \text{ mm}$ .

Förhållande sand till cement är för  $\gamma_{28} = 1210 \text{ kg/m}^3$ .

$$n = 0,92 \quad C = 325 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Figur 5})$$

$$\text{Finbruksvolym} = 0,50 \quad (\text{Figur 4})$$

$$\text{Sand } > 2 \text{ mm: } \frac{0,92 \cdot 325}{1-0,12} - 0,92 \cdot 325 = 41 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volym} = \frac{41}{2650} = 0,015 \text{ m}^3$$

$$\text{Total sandmängd} = 299 + 41 = 340 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Grovbrukets volym} = 0,50 + 0,015 = 0,515 \text{ m}^3$$

Lättballastens tryckhållfasthet i betongen.

Beräkning enl. (formel 9).

$$\log f_{1a} = 1,14 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_{1ah}}{1+h} + 0,174 = 1,14 \cdot 10^{-3} \frac{815}{1,079} + 0,174 =$$
$$= 1,03508$$

$$f_{1a} = 10,8 \text{ MPa}$$

Grovbrukets skrymdensitet och tryckhållfasthet i betongen.

$$\gamma_{gb} = \frac{\gamma_{btg} - \rho_{1a}}{v_{gb}} + \rho_{1a} = \frac{1250 - 815}{0,515} + 815 = 1659 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{btg} = 0,515 \cdot 1659 + 0,485 \cdot 815 = 1250 \text{ kg/m}^3$$

(Formel 6)

$$\log f_{gb} = \frac{1}{v_{gb}} (\log f_{btg} - \log f_{1a}) + \log f_{1a} =$$
$$= \frac{1}{0,515} (\log 17 - \log 10,8) + \log 10,8 =$$
$$= 1,4160 \quad f_{gb} = 26,1 \text{ MPa}$$

Vattencementtal och vattenluftcementtal.

(Formel 10)

$$vlct = 2,503 - \frac{\log f_{gb}}{0,8645} = 2,503 - \frac{\log 26,1}{0,8645} = 0,865$$

$$\text{Lufthalten} = 1,0 \cdot 0,19 \cdot 0,50 = 0,095$$

(Formel 11)

$$vct = 0,865 - \frac{0,095}{325} \cdot 10^3 = 0,57$$

$$\text{Vattenhalt} = 0,57 \cdot 325 = 185 \text{ kg/m}^3$$

Konsistens och erforderlig vattenhalt:

$$\text{Ballastvolymen är } \frac{0,92 \cdot 325 + 41}{2650} + 0,485 = 0,613$$



$$\begin{aligned} \text{Sand:} & \quad \frac{0,128}{0,613} = 0,209 \\ 2-4 \text{ mm:} & \quad \frac{0,485 \cdot 0,474}{0,613} = 0,375 \\ 4-8 \text{ mm:} & \quad \frac{0,485 \cdot 0,258}{0,613} = 0,204 \\ 4-12 \text{ mm:} & \quad \frac{0,485 \cdot 0,267}{0,613} = 0,212 \end{aligned}$$

Delkomponenternas vattenbehov

Fraktion	Sand	2-4 mm	4-8 mm	4-12 mm
0-0,25 mm	$0,209 \cdot 0,29 \cdot 0,58 = 0,0352$	0,0013		0,0006
0,25-0,5 mm	$0,209 \cdot 0,21 \cdot 0,27 = 0,0119$	-		-
0,5-1 mm	$0,209 \cdot 0,23 \cdot 0,17 = 0,0082$	-		-
1-2 mm	$0,209 \cdot 0,15 \cdot 0,12 = 0,0038$	-		-
2-4 mm	$0,209 \cdot 0,09 \cdot 0,10 = 0,0019$	0,0356		0,0002
4-8 mm	$0,209 \cdot 0,03 \cdot 0,079 = 0,0005$	0,0013	0,0161	0,0063
8-12 mm		-		0,0080
12-16 mm		-		0,0003
	0,0615	0,0382	0,0161	0,0154
			$\Sigma = A_b = 0,1312$	

(Formel 21)

$$\begin{aligned} k_c &= 1,20 - \frac{\gamma_{btg}}{5,375(u^2 - 400)} = 1,20 - \frac{1250}{5,375(38^2 - 400)} = \\ &= 1,20 - 0,223 = 0,977 \end{aligned}$$

(Formel 20)

$$\begin{aligned} v_w &= 0,977 \frac{\frac{325}{3150}(0,80 - 0,1312) + 0,095(0,32 - 0,1312) + 0,1312 - 0,0064}{1 + 0,1312} = \\ &= 0,183 \end{aligned}$$

Välj vattenmängden:  $184 \text{ l/m}^3$

			Korrigerat:	
Cement	325	0,103	327	0,104
Sand	340	0,128	342	0,129
2-4 mm	207	0,230	208	0,231
4-8 mm	84	0,125	84	0,126
4-12 mm	104	0,130	104	0,129
Vatten	184	0,184	185	0,185
		<u>0,095</u>	-	<u>0,096</u>
	1244	0,995	1250	1,000

$$\frac{1244}{0,995} = 1250 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{\text{bruk}} = \frac{854}{0,514} = 1661$$

Tillsatsmedlet Cemos 110 inberäknas i vattenvolymen.

$$3 \cdot 10^{-2} \cdot 325 = 9,75 \text{ kg} \approx 10 \text{ l, vari vatten} = 7 \text{ l}$$

Vattenabsorption i lättballasten.

$$v_{\text{abs}} = h \cdot m_{1b} \cdot 10^{-3} = 0,4(0,15 - 0,079) \cdot 396 = 11,2 \text{ l}$$

$$\text{Vatten i sanden} = 0,04 \cdot 340 = 13,6 \text{ kg}$$

Blandningsrecept:

		<u>Skrymvolym (<math>\text{m}^3</math>)</u>
Cement	327 $\text{kg/m}^3$	
Sand	356 -"-	
2-4 mm	208 -"-	$\frac{208}{901 \cdot 0,58} = 0,398$
4-8 mm	84 -"-	$= 0,224$
4-12 mm	104 -"-	$\frac{104}{806 \cdot 0,55} = \underline{0,235}$
Vatten	171 -"-	$0,857$
Cemos	10 -"-	

$$\gamma_f = 1250 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{28} = 1210 \text{ -"-}$$

### A.3 Proportionering av K16

#### A.3.1 Krav

Tryckhållfasthet: Första serien 20 MPa, efterföljande serier 19 MPa.

Skrymdensitet: 1300 kg/m<sup>3</sup> vid normaltidsålder

Utbredningsmått: 40 ± 1 cm

#### A.3.2 Cement

Standard portlandcement skall användas.

#### A.3.3 Sand

Sanden som betecknas 0-4 har följande sammansättning.

0	-0,125	mm	5%
0,125	-0,25	mm	14%
0,25	-0,5	mm	20%
0,5	- 1	mm	24%
1	- 2	mm	19%
2	- 4	mm	10%
4	- 8	mm	7%
8	-12	mm	1%

Innehåll av korn > 2 mm är 12%.

Korndensiteten antas till 2650 kg/m<sup>3</sup>.

Fuktkvot = 4%.

#### A.3.4 Lättballast

Lättballast på marknaden kan erhållas i kornstorleksområdet 2-12 mm. Detta fraktionsområde har visat sig vara lämpligt för 3L-betong. Den sammansatta lättballasten bör ha följande sammansättning:

2- 4 mm	45	volymprocent
4- 8 mm	38	- " -
8-12 mm	17	- " -

Följande fraktioner antas kunna användas. Sammansättningen är baserad på verkliga material. Värdena anger viktprocent och korndensiteten gäller för torra korn.

Kornstorlek	Fraktion 2-4 mm	Fraktion 4-8 mm	Fraktion 4-12 mm	Korndensitet (kg/m <sup>3</sup> )
0 - 0,25	1	-	1	1500
0,25- 0,5	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-
1 - 2	-	-	-	-
2 - 4	95	-	1	840
4 - 8	4	100	40	780
8 -12	-	-	56	700
12 -16	-	-	2	650

Det är uppenbart att man inte kan blanda fraktionerna (2-4) och (4-12) så att man kan få fram den önskade sammansättningen. För den skull har man varit tvingad att tillsätta annat material, nämligen (4-8) som fyller ut luckan i detta område. Uppgiften blir nu att räkna fram andelarna av de tre tillgängliga materialen så att man får en sammansatt lättballast som så nära som möjligt sammanfaller med den önskade.

Fuktkvoten för materialen är:

2- 4 mm	7%
4- 8 mm	8%
4-12 mm	10%

Beräkning av volymsammansättning:

	(2-4)	(4-8)	(4-12)
0 - 0,25 mm	0,6	-	0,5
0,25- 0,5 mm	-	-	-
0,5 - 1 mm	-	-	-
1 - 2 mm	-	-	-
2 - 4 mm	94,9	-	0,9
4 - 8 mm	4,5	100	37,6
8 -12 mm	-	-	58,7
12 -16 mm	-	-	2,3

$$\text{Andel av 2-4 mm: } \frac{45}{94,9} = 0,474$$

Antag att andel av fraktion 4-8 mm är X.

$$0,38 - 0,045 \cdot 0,474 - 0,376(1 - 0,474 - X) = X$$

$$X = 0,258$$

$$\text{Andel av 4-12 mm} = 1 - 0,474 - 0,258 = 0,268.$$

Kornstorlek (mm)	(2-4)	(4-8)	(4-12)	$\Sigma$
0 - 0,25	0,3	-	0,1	0,4
0,25- 0,5	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-
1 - 2	-	-	-	-
2 - 4	45,0	-	0,2	45,2
4 - 8	2,1	25,8	10,1	38,0
8 -12	-	-	15,8	15,8
12 -16	-	-	0,6	0,6
	47,4	25,8	26,8	100,0
$\rho_{\text{torr}} =$	842	780	733	
$\rho_{\text{fukt}} =$	901	842	806	

$$\rho_{\text{korn}} = 0,004 \cdot 1500 + 0,452 \cdot 840 + 0,38 \cdot 780 + 0,158 \cdot 700 + 0,006 \cdot 650 = 797 \text{ kg/m}^3$$

Korndensitet för fuktigt material:

$$1,07 \cdot 842 \cdot 0,474 + 1,08 \cdot 780 \cdot 0,258 + 1,10 \cdot 733 \cdot 0,268 = 860 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Medelfuktkvot: } \frac{860 - 797}{797} = 0,079 \text{ (7,9\%)}$$

#### Bestämning av betongens sammansättning:

Vid normallagring minskar betongens skrymdensitet i medeltal med  $40 \text{ kg/m}^3$ . Provkropparna, som är standardkuber, förvaras i  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  och 40-80% relativ fuktighet efter avformning. Antag att  $\gamma_{\text{färsk}} = 1340 \text{ kg/m}^3$ .

Sandmängd.

I sanden finns 12% korn med  $d > 2 \text{ mm}$ .

Förhållande sand till cement är för  $\gamma_{28} = 1300 \text{ kg/m}^3$ .

$n = 0,98$   $C = 347 \text{ kg/m}^3$  (Figur 5)

Finbruksvolymen = 0,512 (Figur 4)

$$\text{Sand } > 2 \text{ mm: } \frac{0,98 \cdot 347}{1 - 0,12} - 0,98 \cdot 347 = 46 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volym} = \frac{46}{2650} = 0,017 \text{ m}^3$$

Total sandmängd:  $340 + 46 = 386 \text{ kg/m}^3$

Grovbrukets volym =  $0,512 + 0,017 = 0,529 \text{ m}^3$ , lättballast-volymen =  $0,471 \text{ m}^3$ .

Lättballastens tryckhållfasthet i betongen:

(Formel 9)

$$\log f_{1a} = 1,14 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_{1a} h}{1+h} + 0,174 = 1,14 \cdot 10^{-3} \frac{860}{1,079} + 0,174 =$$
$$= 1,08262$$

$$f_{1a} = 12,1 \text{ MPa}$$

Grovbrukets skrymdensitet och tryckhållfasthet i betongen:

$$\gamma_{gb} = \frac{\gamma_{btg} - \rho_{1a}}{v_{gb}} + \rho_{1a} = \frac{1340 - 860}{0,529} + 860 = 1767 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{btg} = 0,529 \cdot 1767 + 0,471 \cdot 860 = 1340 \text{ kg/m}^3$$

(Formel 6)

$$\log f_{gb} = \frac{1}{v_{gb}} (\log f_{btg} - \log f_{1a}) + \log f_{1a} =$$
$$= \frac{1}{0,529} (\log 20 - \log 12,1) + \log 12,1 =$$
$$= 1,49535 \quad f_{gb} = 31,3 \text{ MPa}$$

Vattencementtal och vattenluftcementtal

(Formel 10)

$$vlct = 2,503 - \frac{\log f_{gb}}{0,8645} = 2,503 - \frac{\log 31,3}{0,8645} = 0,773$$

$$\text{Lufthalten: } 1,0 \cdot 0,165 \cdot 0,512 = 0,085 \quad (\text{Figur 6 och 7})$$

(Formel 11)

$$vct = 0,773 - \frac{0,085}{347} \cdot 10^3 = 0,528$$

$$\text{Vattenmängd: } 0,528 \cdot 347 = 183 \text{ kg/m}^3$$

Konsistens och erforderlig vattenmängd

$$\text{Ballastvolymen är } \frac{0,98 \cdot 347 + 46}{2650} + 0,471 = 0,146 + 0,471 =$$
$$= 0,617$$



$$\begin{aligned} \text{Sand: } & \frac{0,146}{0,617} = 0,237 \\ 2-4 \text{ mm: } & \frac{0,471 \cdot 0,474}{0,617} = 0,362 \\ 4-8 \text{ mm: } & \frac{0,471 \cdot 0,258}{0,617} = 0,197 \\ 4-12 \text{ mm: } & \frac{0,471 \cdot 0,267}{0,617} = 0,204 \end{aligned}$$

Delkomponenternas vattenbehov:

Kornstorlek (mm)	Sand	2-4 mm	4-8 mm	4-12 mm
0 - 0,25	$0,237 \cdot 0,19 \cdot 0,58 = 0,0261$	0,0013	-	0,0006
0,25 - 0,5	$0,237 \cdot 0,20 \cdot 0,77 = 0,0128$	-	-	-
0,5 - 1	$0,237 \cdot 0,24 \cdot 0,17 = 0,0097$	-	-	-
1 - 2	$0,237 \cdot 0,19 \cdot 0,12 = 0,0054$	-	-	-
2 - 4	$0,237 \cdot 0,10 \cdot 0,10 = 0,0024$	0,0344	-	0,0002
4 - 8	$0,237 \cdot 0,07 \cdot 0,079 = 0,0013$	0,0013	0,0156	0,0061
8 - 12	$0,237 \cdot 0,01 \cdot 0,064 = 0,0002$	-	-	0,0077
12 - 16		-	-	0,0003
	0,0579	0,0357	0,0156	0,0149
			$\Sigma = A_D = 0,1241$	

(Formel 21)

$$\begin{aligned} k_c &= 1,20 - \frac{\gamma_{btg}}{5,375(u^2 - 400)} = 1,20 - \frac{1340}{5,375(40^2 - 400)} = \\ &= 1,20 - 0,208 = 0,992 \end{aligned}$$

(Formel 20)

$$\begin{aligned} v_w &= 0,992 \cdot \frac{347}{3150} (0,80 - 0,1241) + 0,085 (0,32 - 0,1241) + 0,1241 - 0,0064 = \\ &= 0,184 \end{aligned}$$

Välj vattenhalten till  $184 \text{ l/m}^3$        $v_{ct} = \frac{184}{344} = 0,530$

Grovbrukets volym:  $0,529 = \frac{C}{3150} + 0,184 + 0,146 + 0,085$

$$0,529 = \frac{C}{3150} + \frac{0,53 \cdot C}{1000} + \frac{0,98 \cdot C}{0,88 \cdot 2650} + 0,085$$

$$C = \frac{0,529 - 0,085}{\frac{1}{3150} + \frac{0,53}{1000} + \frac{0,98}{0,88 \cdot 2650}} = \frac{0,444}{1,2677 \cdot 10^{-3}} = 350 \text{ kg/m}^3$$

Cement	350 kg/m <sup>3</sup>	0,111	
Sand	390 -"-	0,147	
2-4 mm	201 -"-	0,223	$\gamma_{\text{bruk}} = \frac{926}{0,529} =$
4-8 mm	102 -"-	0,121	
4-12 mm	102 -"-	0,126	
Vatten	186 -"-	0,186	
Luft	-	0,085	

Tillsatsmedlet Cemos 110 inberäknas i vattenvolymen  
 $3 \cdot 10^{-2} \cdot 350 = 10,5 \text{ l} \approx 11 \text{ l}$ , vari 7,7 l vatten

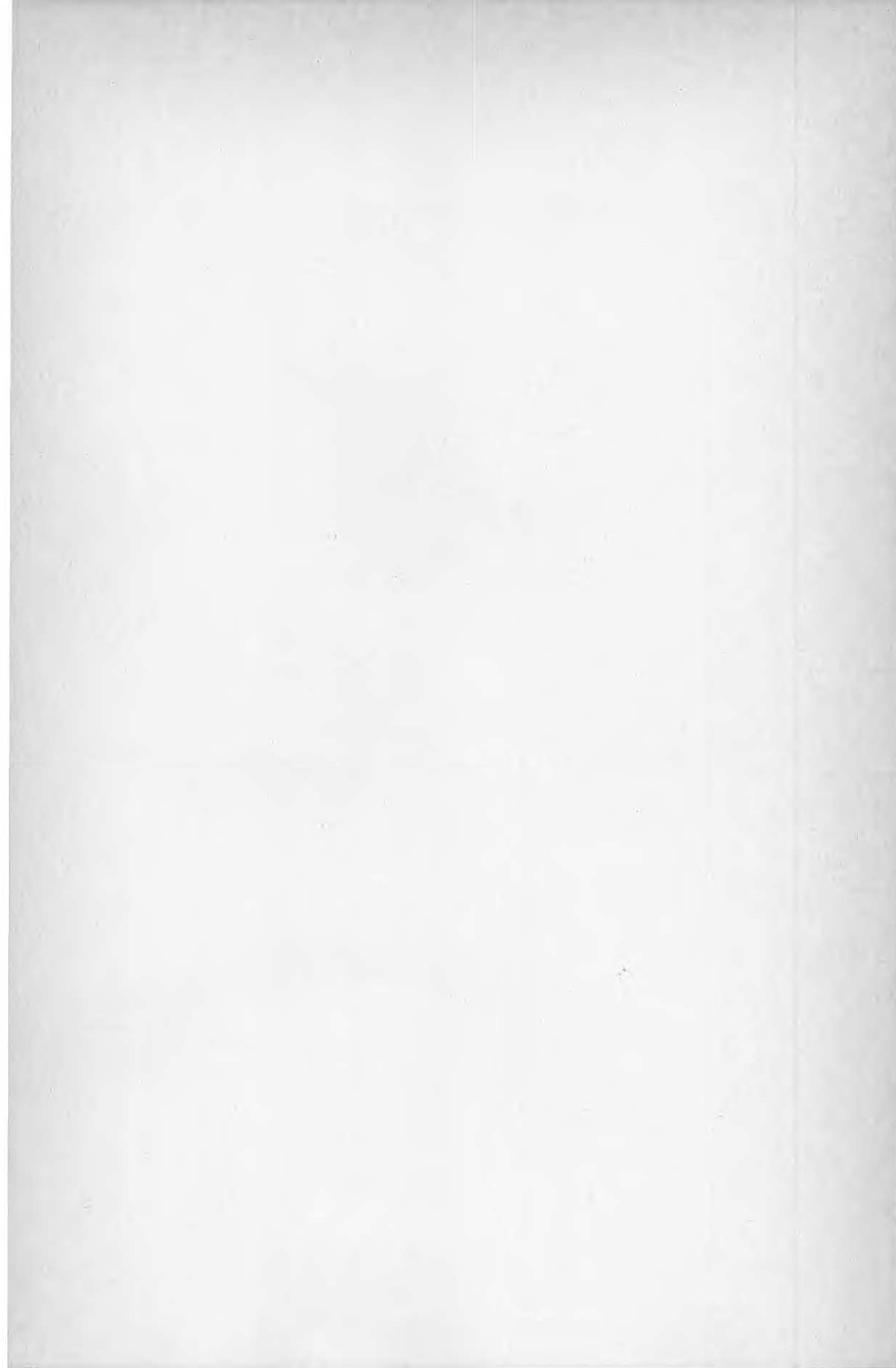
Vattenabsorption i lättballasten (Formel 24 och 25)

$$v_{\text{abs}} = h \cdot m_{\text{lb}} \cdot 10^{-3} = 0,4(0,15 - 0,079) \cdot 405 = 11,5 \text{ l}$$

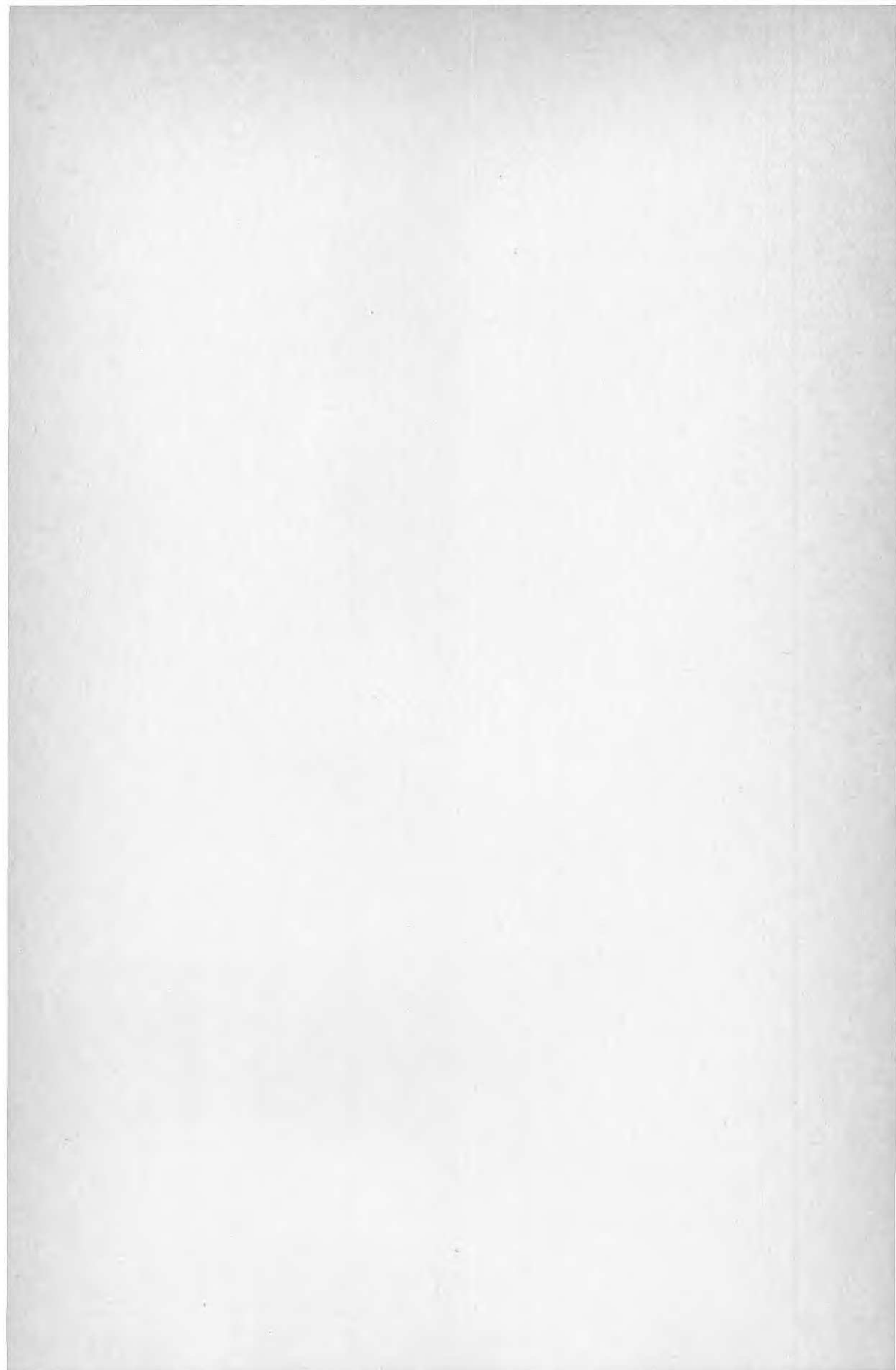
Vatten i sanden:  $390 \cdot 0,04 = 15,6 \text{ l}$

Blandningsrecept:

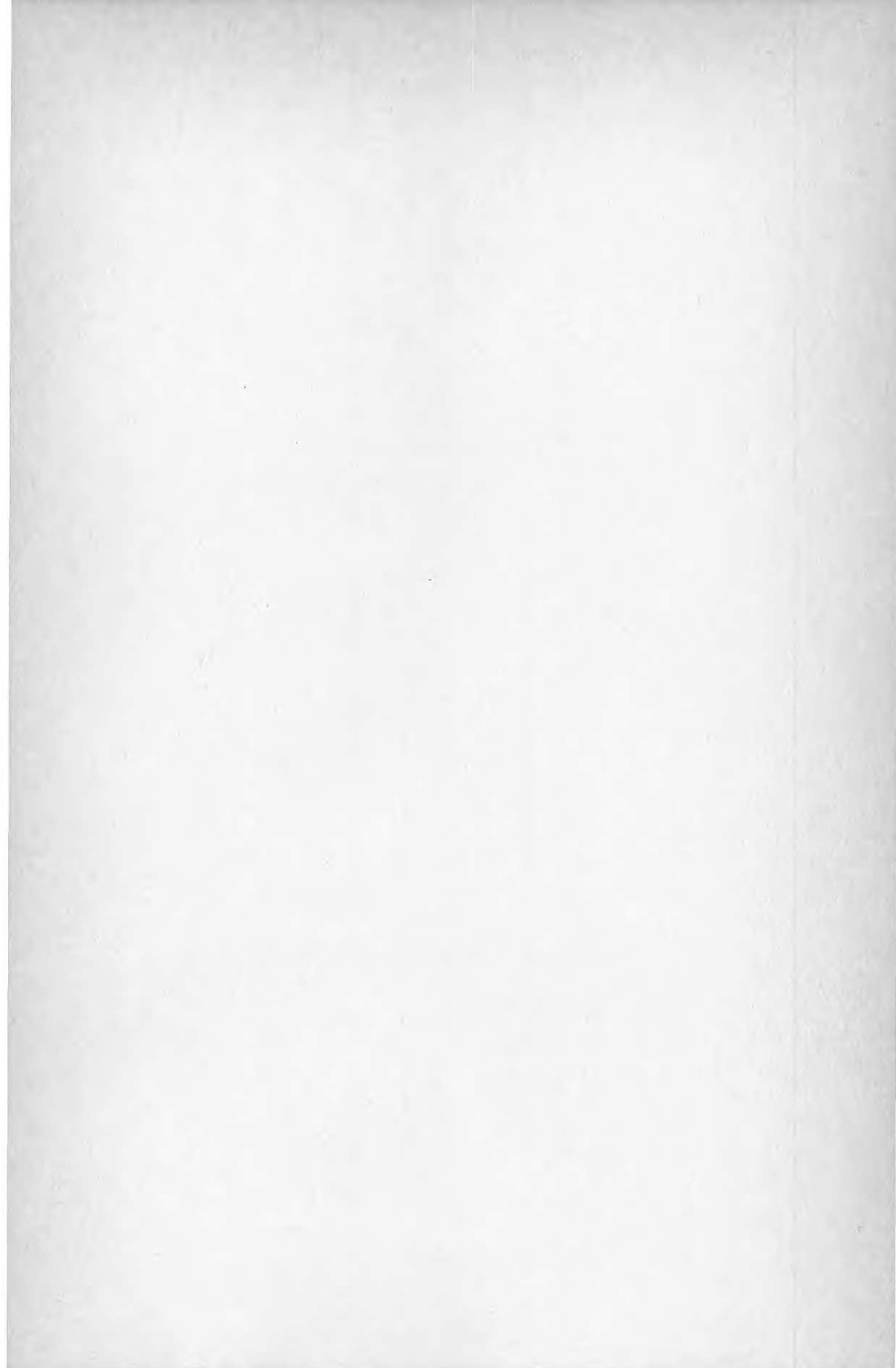
		Skrymvolym (m <sup>3</sup> )
Cement	350 kg/m <sup>3</sup>	
Sand	406 -"-	
2-4 mm	201 -"-	$201 / (901 \cdot 0,58) = 0,385$
4-8 mm	102 -"-	$102 / (842 \cdot 0,56) = 0,216$
4-12 mm	102 -"-	$102 / (806 \cdot 0,55) = 0,230$
Vatten	174 -"-	
Cemos	11 -"-	<hr/> 0,831















**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
780350-2 från Statens råd för byggnadsforskning,  
anslag 78-3754 från Styrelsen för teknisk utveckling  
till avd Betongbyggnad och avd Byggnadsmaterial,  
CTH, Göteborg.**

**R77: 1983**

**ISBN 91-540-3968-1**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6700777**

**Abonnemangsgrupp:  
Z. Konstruktioner och material**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 7853  
103 99 Stockholm**

**Cirka pris: 35 kr exkl moms**