



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.



LEIF BERTSSON
SATISH CHANDRA

Lättballastbetong för inomhus- konstruktioner

R13: 1994

Kompakt struktur
K25 – K40



BYGGFORSKNINGSRÅDET

R13:1994

**LÄTTBALLASTBETONG FÖR
INOMHUSKONSTRUKTIONER**

Kompakt struktur K25 - K40

**Leif Berntsson
Satish Chandra**

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 910105-5
från Byggeforskningsrådet och SBUF - Svenska Byggbranschens
Utvecklingsfond till Färdig Betong Göteborg AB.**

REFERAT

Rapporten behandlar ett utvecklingsprojekt för tillverkning och utprovning av lättballastbetong i hållfasthetsklasserna K25 - K40 med tillhörande densiteter i området 1500 - 188 kg/m³. Den färskas betongens egenskaper har särskilt anpassats till platsgjutning av bärande konstruktioner i inomhusmiljö. Resultaten som omfattar valda egenskaper hos färsk och hårdnad betong från ett 70-tal olika sammansättningar är redovisade på så sätt att de direkt skall kunna utnyttjas eller eventuellt vidarebearbetas för praktisk tillämpning. En proportionsmetod för konstruktionslättballastbetong med kompakt struktur har framtagits inom projektets ram och publicerats i en särskild skrift. Olika typer lättballast, såväl inhemska som utländska, har använts. Huvuddelen av försöksserierna är emellertid baserade på svenskt lättballastmaterial. Förutom sedvanliga densitets- och hållfasthetsprovningar på betongen vid olika åldrar har bestämts konsistensändring med tiden, effektiviteten av olika typer och kombinationer av plasticerare, elasticitetsmodul, krympning, kapillärtransportegenskaper, desorptionsisotermer, värmeledningsförmåga och nötningssmotstånd. Vidare har genomförts en akustisk värdering för användning av lättballastbetong i massiva väggar och brandprovning av en bjälklagsplatta. Från resultaten framgår att lättballastbetong har vissa fördelar framför vanlig betong i samma hållfasthetsklass. Därav kan bl a nämnas vad gäller hållfasthetsklassen K25 att 1-dygnshållfastheterna är minst dubbelt så stora för lättballastbetong och att självuttorkning är möjlig till följd av låga vattencementtal, vct ≈ 0,4, vilket minskar risken för fuktproblem vid korta byggtider.

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R13:1994

ISBN 91-540-5634-9
Byggeforskningsrådet, Stockholm

gotab 10792, Stockholm 1994

INNEHÅLL

FÖRORD

I

SAMMANFATTNING

II

1	INLEDNING.....	1
1.1	Allmänt om lättballastbetong.....	1
1.2	Projektets målsättning.....	2
1.3	Försöksprogram.....	3

FÖRSÖKSPROGRAM I

2	BETONGENS DELMATERIAL OCH DERAS EGENSKAPER	5
2.1	Cement.....	5
2.2	Silika.....	5
2.3	Flygaska.....	5
2.4	Slagg.....	5
2.5	Sand och gjutgrus.....	5
2.6	Tillsatsmedel.....	6
2.7	Lättballast.....	7
3	TILLVERKNING AV BETONG OCH PROVNING.....	11
3.1	Tillverkning.....	11
3.2	Speciella provningar.....	11
4	BAKGRUND OCH BESKRIVNING AV RESULTAT.....	12
4.1	Betongens skrymdensitet och hållfasthet.....	12
4.1.1	Allmänt.....	12
4.1.2	Några principer för betongens sammansättning.....	14
4.1.3	Resultat.....	17
4.2	Krympning, kapillaritet och desorptionsisotermer	25
4.2.1	Krympning.....	25
4.2.2	Kapillaritet.....	25
4.2.3	Desorptionsisotermer.....	27

FÖRSÖKSPROGRAM II

5	NYTTJANDEINRIKTADE UNDERSÖKNINGAR - EGENSKAPER.....	29
5.1	Separation av lättballast vid stavvibrering.....	30
5.2	Inverkan av volymen lättballast i betongen.....	32
5.3	Konsistensändring med tiden - åtgärder.....	34
5.4	Lättballastbetongens elasticitetsmodul.....	35
5.5	Värmekonduktivitet.....	36
5.6	Nötningsmotstånd.....	36
5.7	Akustiska egenskaper.....	40
5.8	Brandprovning av bjälklagsplatta.....	40
6	SLUTSATSER.....	41
7	LITTERATUR.....	43

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry, no matter how small, should be recorded to ensure the integrity of the financial statements. The text also highlights the need for regular audits and reconciliations to identify any discrepancies early on.

In addition, the document provides a detailed overview of the accounting cycle, from identifying transactions to preparing financial statements. It includes a list of common accounting errors and how to avoid them, as well as a section on the importance of ethical behavior in the accounting profession. The final part of the document offers some practical tips for managing a successful accounting practice, such as staying organized and keeping up-to-date with industry changes.

Overall, this document serves as a comprehensive guide for anyone looking to improve their accounting skills and ensure the accuracy of their financial records. It is a valuable resource for both students and professionals alike.

FÖRORD

På uppdrag av Färdig Betong AB, Göteborg, genomfördes vid Avdelningen för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, med början 1989-07-01 första delen av projektet "Konstruktionslättballastbetong med hög hållfasthet". Resultat från denna första del har betecknats i föreliggande rapport "Försöksprogram I". Projektet har en fortsättning och resultaten har redovisats under titeln "Försöksprogram II".

Enligt förutsättningarna i projektbeskrivningen skall målet vara att framställa lättballastbetong med hållfastheter inom området K25 - K40 och med skrym-densiteter från 1500 till 1800 kg/m³ för användning till inomhuskonstruktion-er. Lättballastbetongens egenskaper i färskt tillstånd, såsom sammanhållning, konsistens och arbetbarhet, har särskilt anpassas till platsgjutning.

I projektet har endast utnyttjats lättballastmaterial av såväl svensk som utländsk tillverkning samtliga för kommersiellt bruk.

Gjutning och provning av samtliga betongtyper har ägt rum i högskolans betonglaboratorium. Där så har varit möjligt har svenska normer och be-stämmelser använts vid val av provningsmetoder.

Vissa moment i projektet har utförts på annat håll utanför avdelningen. Värmekonduktivitet provades vid Avdelningen för husbyggnadsteknik, akustiska egenskaper beräknades vid Avdelningen för teknisk akustik och brandprovning av en bjälklagsplatta i lättballastbetong genomfördes vid SP i Borås. Dessförinnan hade betongplattan tillverkats av Färdig Betong AB i Göteborg. Utförliga redovisningar över dessa arbetsinsatser finns i bilagor till rapporten där även har bifogats en artikel som behandlar samband mellan mikrostruktur och hållfasthet hos lättballastbetong.

I planeringen av projektet har deltagit Bo Carlsson, Färdig Betong AB och Lennart Apleberger, NCC. För projektet har anslag erhållits från SBUF och BFR.

Göteborg i december 1993

Leif Berntsson Satish Chandra

SAMMANFATTNING

Ett projekt har utförts vid Avdelningen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola, och som omfattat tillverkning och provning av lättballastbetong i hållfasthetsklasserna K25 - K40 med skrymdensiteter i området 1500 - 1800 kg/m³. Den färskas betongens egenskaper har anpassats till platsgjutning, exempelvis av bärande konstruktioner för bruk i inomhusmiljö. Det har inte varit aktuellt att sammansätta betongen och att välja delmaterial med avseende på betongens beständighet.

Uppläggningsen av projektet har huvudsakligen inriktats på att resultaten skall kunna användas i praktiska tillämpningar. Framtagna resultat och vidarebearbetning av dessa kan vara till hjälp för bl a projektörer och betongtillverkare att tekniskt och ekonomiskt sammansätta optimala betongrecept. En proportioneringsmetod för skrymdensitet och tryckhållfasthet hos konstruktionslättballastbetong har presenterats med beräkningsexempel för praktiskt bruk i en särskild skrift.

Olika typer lättballastmaterial har använts. Dessa har varit svensk Leca, norsk Leca, Lytag och Liapor. Det sistnämnda ballastmaterialet förekom i tre densitetsklasser.

Användningen av ett lättballastmaterial är i praktiken begränsad av bl a ekonomiska faktorer. Lättballasten är avsevärt dyrare än vanlig ballast. Skall man framställa en lättballastbetong med låg vikt och som dessutom skall ha hög hållfasthet, måste den bärande matrisen, cementbruket i betongen, ha hög hållfasthet. Det största tillskottet till betongens hållfasthet kan tolkas härröra från bruket, som volymmässigt utgör den största andelen i betongen. Lättballastens densitet och volymandel svarar för den minskade betongdensiteten. Då volymandelen lättballast är begränsad uppåt av skäl som bestämmer reologiska och gjuttekniska egenskaper hos den färskas betongen, såsom konsistens, arbetbarhet, sammanhållning och stabilitet, är lättballastens densitet av stor allmän betydelse för lättballastbetongens egenskaper.

Numera kan man utan alltför stora svårigheter sammansätta bindemedel eller bruk med mycket höga hållfastheter för tillverkning av gjutbara betonger. Att välja sådana lösningar är vanligtvis inte ekonomiskt motiverat för vanliga slakarmerade betongkonstruktioner. Eftersom betongens hållfasthet inom projektets ramar är begränsad uppåt till K40, har sk höghållfasta bindemedelskompositioner utslutits. Vissa recept har emellertid provats där mineraliska tillsatser förekommer. Slagg och flygaska, som är aktiva tillsammans med portlandscement, kan normalt inte i första hand anses som särskilt attraktiva att använda i lättballastbetong. Hållfasthetstillväxten är långsam och det är svårt att nå de hållfastheter som normerna kräver vid 28 dygn även om man vet och kan hävda att hållfastheterna uppnås vid en något senare tidpunkt. Mikrosilika däremot är tillsatsmaterial som både gör det möjligt och underlättar att nå mycket höga betonghållfastheter.

Genom att tillverka betong av de olika lättballastmaterialen, som i förväg utvalts att ingå i projektet, har man kunnat fastställa vilka typer som lämpar sig för olika hållfasthetsklasser. En del av lättballastmaterialen har så höga partikeldensiteter att de är mer lämpade för ännu högre hållfastheter än vad som valts som högsta hållfasthetsvärde i projektet. Dessa lättballastmaterial är bl a norsk Leca, Liapor 8 och Lytag.

Många av betongens egenskaper generellt sett kan återföras till bindemedlets porositet eller förenklat uttryckt vattencementtalet. För vanlig betong är man van att medvetet koppla ihop hållfastheten med andra egenskaper. Liknande slutledningar är ännu mindre korrekta för lättballastbetong. För den vanliga hållfasthetsklassen K25 kommer vattencementtalet att motsvara en högkvalitativ vanlig betong. Göres liknande jämförelser kommer flera av lättballastbetongens egenskaper att vara överlägsna den vanliga betongens. Det bör därför finnas motiv för att kunna närmare analysera möjligheterna att öka och bredda användningen av lättballastbetong i praktiken.

En stor del av arbetet har ägnats åt att noggrant undersöka möjligheten att använda svensk lättklinker för tillverkning av konstruktionslättballastbetong. Svensk Leca är emellertid särskilt anpassad för tillverkning av murblock, sk Leca-block. Svensk Leca lämpar sig därför knappast för att framställa betong med krav på högre hållfasthet än K25, främst av ekonomiska skäl. Den direkta orsaken är materialets låga densitet och därmed låga partikelhållfasthet. De övriga lättballasttyperna har samtliga högre densiteter än svensk Leca. De har därför utnyttjats till att framställa lättballastbetong med hållfasthetsklasser upp till K40.

Hela projektarbetet har försiggått i laboratoriemiljö, och svenska provningsmetoder har tillämpats så långt det har varit möjligt. Betongen har provats i såväl färskt som hårdnat tillstånd. Tryckhållfastheter med tillhörande densiteter har provats vid 1, 7 och 28 dygn. Efter provningen har provkropparna uttorkats i ugn och 105 °C till viktjämvikt varefter den torra betongens skrymdensitet har bestämts.

Från de cirka 70-tal olika betongrecept som utprovats, utvaldes nio olika betongsammansättningar för ytterligare provning. Dessa bedömdes falla inom projektets område. Förutom sk standardprovningar, omfattande densitet och hållfasthet, utfördes bestämning av krympnings-, kapillaritets- och desorptionsegenskaper.

Av resultaten har framgått att lättballastbetong har några viktiga fördelar framför konventionell vanlig betong i samma hållfasthetsklass. Korttids-hållfastheten är avsevärt högre. Exempelvis så är 1-dygns-hållfastheten mer än dubbelt så stor för lättballastbetong. Detta har betydelse för att kunna förkorta avformningstiderna, främst vid gjutning av bjälklag. En annan fördel med lättballastbetong är att vattencementtalet eller vattenbindemedelstalet är lågt. Med några enkla åtgärder med avsikt att skydda den nygjutna betongen under det första dygnet finns det goda möjligheter att minska risken för fuktproblem till följd av byggfuktöverskott. Fri vattenabsorption under tiden från och med

andra till och med det femte dygnet har visat sig vara mindre än 1 viktsprocent. Detta värde skulle motsvara en ökning av vattencementtalet på högst 0,03.

Lättballastbetong K25 med svensk Leca har ett vattencementtal på ca 0,40, räknat på tillsatt vattenmängd. Tillkommer inget ytterligare vatten utom det vatten som lättballasten medfört vid betongens blandning, inställer sig så småningom till följd av sk självuttorkning en relativ fuktighet nedåt 90 % och t o m något under detta värde.

I fortsatta försök koncentrerades provningarna till att optimera betongsammansättningen med användning av svensk Leca och att bestämma vissa egenskaper som har bedömts vara av betydelse både vid tillverkning i fullskala och användning i huskonstruktioner. Följande kortfattade resultat och synpunkter som särskilt utmärker lättballastbetong med kompakt struktur är av vikt att framhållas.

Separation av lättballastpartiklar kan minimeras genom att inte välja alltför lösa betongkonsistenser, att sammansätta det totala ballastmaterialet så att partikelfördelningen får ett kontinuerligt förlopp och att begränsa maximala stenstorleken.

Förstyvning av betongkonsistensen med tiden kan lämpligen lösas genom att välja en sådan transportmetod som medger att plasticerande tillsatsmedel kan tillsättas före gjutningstillfället. Betydelsen av lättballastens vattenabsorption kan minskas genom att inte välja alltför korta blandningstider eller att på något sätt minska vattenuppsugningen i lättballasten.

Nötningmotståndet med avseende på roterande och hasande hjul tycks inte vara sämre hos lättballastbetong än normalbetong med samma hållfasthetsklass.

Massiva lättballastbetongväggar med tjockleken 18 cm har beräkningsmässigt visats vara tillfredsställande med avseende på ljudisolering för betongdensiteten 1660 kg/m³ och elasticitetsmodulen 9,5 Gpa.

Brandprovningen av en bjälklagsplatta var mindre lyckosamt. Betongytan spjälkades på ett tidigt stadium och provet måste avbrytas på tidigt stadium. Trolig orsak var för stort vatteninnehåll i betongen vid provningen i kombination med täta cementpasta i betongen.¹⁾

Projektet har visat att det är fullt teknisk möjligt att tillverka konstruktionslättballastbetong i hållfasthetsklasser från K25 t o m med lättballastmaterial avsett för värmeisolerande ändamål. Väljes lättballasttyper med högre hållfastheter och som är särskilt anpassade till konstruktionsbetonger, kan betong med tryckhållfastheter på minst 70 Mpa tillverkas för praktisk användning. I projektet har visats att tryckhållfastheter på något över 50 Mpa har uppnåtts även om detta inte ingick i programmet.

¹⁾Justering med lufttillsatser i cementpastan är troligen en möjlig lösning. Ej påtald i denna rapport.

1 INLEDNING

1.1 Allmänt om lättballast och lättballastbetong

Framställning och användning av lättballastbetong är inte något nytt inom betongtekniken. Man kan utan större svårighet i litteraturen hitta uppgifter som beskriver användning av lättballastbetong åtminstone 2000 år tillbaka i tiden. Än idag finns byggnader kvar som uppfördes under romartiden och i vilka någon typ av lättballast förekommer. En av de mest kända byggnaderna som fortfarande står intakt efter 1900 år är Pantheon i Rom. Denna byggnad har ända in i vår tid varit oöverträffad vad beträffar kupolens spännvidd. I kupolens översta delar förekommer pimpstensbetong med kompakt eller tät struktur. Allt längre ned mot anfangen skiftas till betongtyper med successivt ökande densitet hos ballasten.

Pimpsten som är en vulkanisk och i allmänhet mycket lätt bergart, nyttjas än idag för tillverkning av olika typer lättballastbetong. Förekomst av pimpsten är begränsad till områden med nuvarande vulkanism eller vulkanisk verksamhet i sen geologisk tid. I dessa områden finns det därför förutsättningar att utnyttja pimpsten som byggnadsmaterial, det kan vara såväl i- som u-länder. Utvinningen begränsas bl a av möjligheten att ekonomiskt lösa de transporttekniska problemen. Ofta förekommer pimpstensfyndigheter i svårtillgänglig terräng. Pimpsten till framförallt murblockstillverkning eller andra byggelement transporteras långa vägar till platser där annan lättballast eller lämplig lättballast saknas. Exempel på detta är pimpstensleveranser från Grekland till USA:s östkust eller från Island till England. I Rhenområdet, där pimpsten utvunnits alltsedan romarrikets tid, finns idag en betydande industri för tillverkning av allehanda byggprodukter.

Industriellt tillverkat lättballastmaterial är bl a de typer som härrör från expanderbara skiffrar eller lerskiffrar samt från brända expanderande leror och flygaskor. Gemensamt för dessa är att de är mineraliska och expanderade i temperaturer omkring 1000 °C. Tillverkningen är energikrävande och produktionskostnaden kan därför bli stor i jämförelse med naturlig lättballast. Även naturlig lättballast såsom pimpsten är behäftad med processkostnader såsom krossning, fraktionering genom siktning och tvättning. Då det kan vara stora avstånd mellan utvinningställen för lättballast och tillverkningsplatser, kan transportkostnaderna bli en betydande del av ballastkostnaden.

En annan typ av lättballast kan produceras av icke avsvalnad masugnsslagg. Exempel på sådan ballast är pelletiserad slagg och slagg som fått stor porositet vid någon form av behandling under stelandet. Även andra typer av slagmaterial har använts.

Den för närvarande mest använda lättballasttypen för tillverkning av skonstruktionsbetong är tillverkad av bränd expanderad lera eller flygaska. Exempel på sådana produkter är Leca (förkortning för Light Expanded Clay Aggregate), Liapor, Keramsit och Lytag. Den sist nämnda produkten är

exempelvis tillverkad av flygaska.

En något ovanlig användning av konstruktionslättballastbetong är inom skeppsbyggeriet. Ett exempel på denna användning är ett ofta omskrivet fartyg med namnet Selma. Hon byggdes under första världskriget i USA. Fartyget var 123,3 m långt och till skrovet åtgick 23,6 ton lättballastbetong. Betongen hade en skrymdensitet på 1905 kg/m³ och en tryckhållfasthet på 38,5 Mpa vid 28 dygn. Selma förliste och har nu legat på havsbotten i nära ett trekvartssekel. En inspektion genomfördes efter 34 år och det visade sig att betongkonstruktionen motstått nedbrytning förvånansvärt väl vad beträffar såväl själva betongen som armeringen. Mer om detta något märkliga fartyg kan läsas i "Concrete ship resists sea water 34 years" /1/. I detta sammanhang kan nämnas att man har använt lättklinker i betong för flytande konstruktioner i Mulberry Harbours under andra världskriget.

Lättklinker, expanderad bränd lera från Tyskland, Liapor, och från Leca från Norge, har använts för att framställa konstruktionslättballastbetong med särskilt höga tryckhållfastheter. Betongen betecknas höghållfast lättballastbetong. Tryckhållfastheter på 55 - 60 Mpa har redovisats vid användning av norsk Leca /2/. Målet med utvecklingen har varit att reducera betongens egenvikt utan att hållfastheterna behöver minskas. Andra betongegenskaper kommer även att ändras. Man bör särskilt uppmärksamma egenskaper såsom elasticitetsmodul, draghållfasthet och krympning.

Användning av lättballastbetong med höga hållfastheter ökade särskilt i samband med uppförande av havskonstruktioner för oljeutvinning i Nordsjön. Norge ligger långt framme såväl i utveckling som användning av höghållfast lättballastbetong. Betong med tillsats av mikrosilika och vattenbindemedelstal på 0,45 uppnådde tryckhållfastheter på omkring 65 Mpa vid en skrymdensitet på 1900 kg/m³. Ett vetenskapligt arbete över mikrostrukturen och egenskaper hos höghållfast lättballastbetong har utgivits från Norges tekniske høgskole, Institutt for byggningsmateriallære, Trondheim, /3/.

För att lättballastbetong skall kunna uppnå höga tryckhållfastheter är det nödvändigt att lättballasten även har hög hållfasthet. Sambandet mellan betonghållfastheter och lättballastens densitet framgår av Spitzners redovisning /4/. De resultat som där har visats är särskilt värdefulla, då samma typ av lättklinkermaterial, Liapor, med olika densitet har använts i projektet.

Även tryckhållfastheter på över 70 Mpa med tillhörande skrymdensitet på högst 1900 kg/m³ har av en av författarna uppnåtts vid förprovning av lättballastbetong till en spännarmerad bro i Norge år 1989.

1.2 Projektets målsättning

Syftet med föreliggande arbete enligt förutsättningarna i projektbeskrivningen har varit att tillverka och utprova "konstruktionslättballastbetong med hög hållfasthet" för platsgjutna konstruktioner. Betongens hållfasthetsklass skall

ligga i området K25 till K40 och med skrymdensiteter mellan 1500 och 1800 kg/m³ för användning i inomhuskonstruktioner. Betongen skall kunna levereras till byggplatsen som fabriksbetong eller blandas in situ. Konsistensen bör vara sådan att den motsvarar normalbetong med lättflytande till trögflytande konsistens. I projektet ingick även bestämning av vissa relevanta betongegenskaper med avseende på betongens användning i bärande konstruktioner.

1.3 Försöksprogram

Arbetet har indelats i följande två försöksprogram:

Försöksprogram I

Användning av olika typer lättballastmaterial tillgängliga på svenska marknaden, tillverkning av betong med kompakt struktur med olika bindemedelskombinationer och sammansättningar samt bestämning av viss egenskaper i färskt och hårdnat tillstånd.

a) Inverkan av några vanliga dispergerande tillsatsmedel på konsistensen med och utan mikrosilikatillsats.

De dispergerande tillsatsmedlen kan principiellt benämnas på flera olika sätt, exempelvis vattenreducerare och plasticerare. Dispergerande tillsatsmedel, som kan tillsättas i stor mängd utan att särskilt förlänga bindetiden eller införa luftporer, kallas vanligen för flytmedel.

b) Val av några kommersiella, passande lättballasttyper tillverkade antingen i Sverige eller utomlands.

De viktigaste egenskaperna hos respektive lättballasttyper och fraktioner bestämdes innan de användes för framställning av betong.

c) Tillverkning av lättballastbetong på konventionellt sätt.

Som bindemedel användes genomgående svensk standard portlandscement. Vidare utnyttjades flygaska och mikrosilika som puzzolaner. Mald granulerad masugnsslagg ersatte viss andel av portlandscementet.

d) Sammansättning av olika betongblandningar med avsikt att uppnå förutbestämda egenskaper, såsom densitet och hållfasthet.

Betongproportionering av konstruktionslättballastbetong med kompakt struktur har utarbetats och finns redovisad i en särskild publikation inom projektet /5/.

e) Bestämning av betongegenskaper:

- I färskt stadium, konsistens och färskdensitet.

- I hårdnat stadium har följande bestämts:

Skrymdensitet vid 1, 7 och 28 dygn i samband med tryckprovning och efter uttorkning i 105 °C

Vattenabsorption vid vattenlagring f o m andra t o m femte dygnet

Tryckhållfasthet vid 1, 7 och 28 dygn

Krympning

Kapillärtransportegenskaper

Desorptionsegenskaper

(De tre sistnämnda egenskaperna har provats på några utvalda betongsammansättningar.)

Försöksprogram II

Baserat på försöksprogram I ovan utvidgades försöken bl a i praktisk riktning med anknytning till såväl tillverkning som användning av lättballastbetong i konstruktioner. Följande moment ingick:

Optimering av betongsammansättningen för att höja tryckhållfastheten till 30 Mpa med beaktande av att enbart inhemsk lättballast skall användas, att cementmängden högst skall vara 425 kg/m³, att inga tillsatsmaterial (mineral tillsatser) skall användas, att sättmåttet skall vara i området 80 - 100 mm och att densiteten skall vara ca 1650 kg/m³.

Kontroll av lättballastseparation vid stavvibrering av betong i form.

Fastställande av konsistensändring med tiden - åtgärder.

Bestämning av elasticitetsmodul.

Bestämning av värmeledningsförmåga, λ -värde.

Nötningsmotstånd av övre gjutytan hos lättballastbetong jämfört med normalbetongs.

Bedömning av akustiska egenskaper vid användning av lättballastbetong i massiva väggar.

Lättballastbetongens egenskaper vid brandbelastning.

FÖRSÖKSPROGRAM I

2 BETONGENS DELMATERIAL OCH DERAS EGENSKAPER

2.1 Cement

Till samtliga betongblandningar användes standard portlandscement från Slite.

2.2 Silika

Silikamaterialet var av typen kompakterad silika från Elkem (nr 971), Norge, dvs silika har tillsatts betongen i form av pulver. Kompaktdensiteten var 2220 kg/m³.

2.3 Flygaska

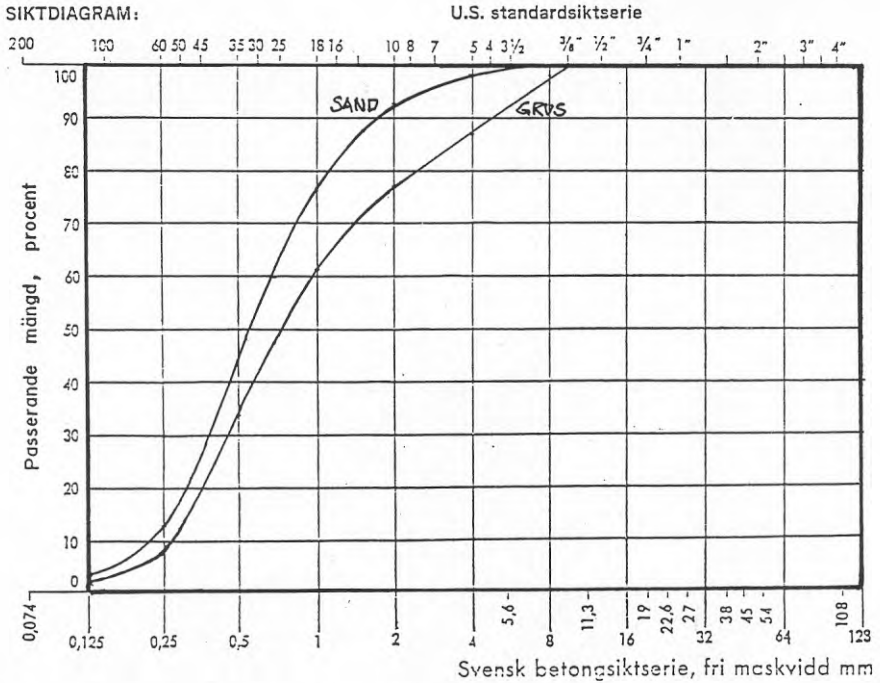
Flygaskan har levererats från Cementa och är avsedd för betongtillverkning. Kompaktdensiteten var 2410 kg/m³.

2.4 Slagg

Slaggen var mald granulerad masugnsslagg från Merox. Kompaktdensiteten var ca 2700 kg/m³.

2.5 Sand och gjutgrus

Såväl sand som gjutgruset var naturmaterial för bruk och betong. Kompaktdensiteten var för båda 2620 kg/m³. Finhetsmodulen för sanden var 2,27 och för gjutgruset 2,85. Siktkurvor framgår av figur 2.5.



Figur 2.5 Siktcurvor för sand och gjutgrus. Båda materialen är naturliga material

2.6 Tillsatsmedel

Följande dispergerande tillsatsmedel har använts:

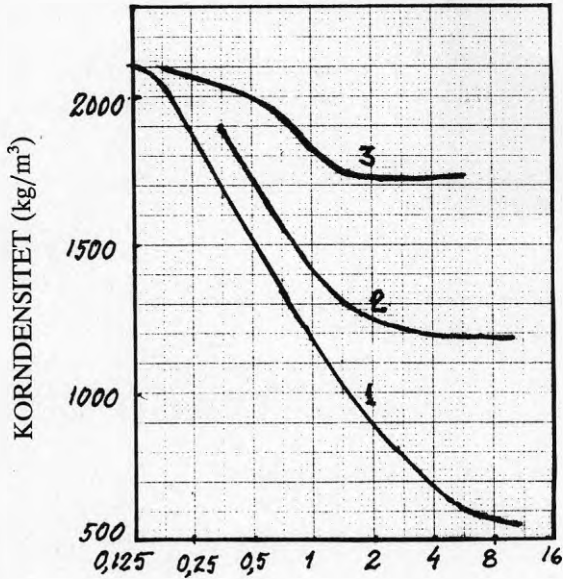
- Lignosulfonattyp: 1. S/P-A 40
 2. R/R-P
- Melamintyp: 3. C/V 33
 4. S/S-FF 40
- Naftalentyp: 5. S/S

2.7 Lättballast

Lättballast från fyra olika tillverkare har nyttjats, nämligen:

Svensk Leca AB (Svensk Leca), Lias-Franken Leichtbaustoffe GmbH & Co. KG (Liapor), A/S Norsk Leca (Norsk Leca) och Boral Lytag (Lytag).

Partikeldensiteterna varierar för lättballastmaterialen med partikelstorleken. Ju mindre partiklarna är, desto större är deras densitet. Detta är signifikativt för svensk och norsk Leca och även för Lytag med partikelstorlek är mindre än 2 mm. I figur 2.7.1 visas partikeldensiteter för olika partikelstorlekar för svensk och norsk Leca och Lytag. Liapor uppvisar liten inverkan av partikeldensiteten inom samma densitetkvalitet. Detta kan förklaras av att Liapor framställs på helt annat sätt än de övriga lättballasttyperna. Liapor med partikelstorlek under 1 mm förekommer inte i projektet.



Figur 2.7.1 Partikeldensitetens variation med partikelstorlek för svensk Leca (1), norsk Leca (2) och Lytag (3).

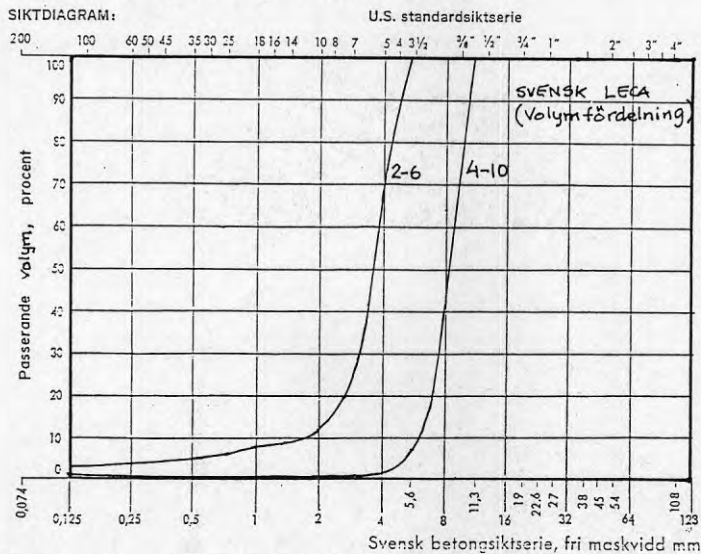
Vid leveransen har bl a de egenskaper bestämts som redovisas i nadanstående tabell 2.7.

Tabell 2.7 Sammanställning av materialegenskaper provade vid leverans på använt lättballastmaterial. Inom parentes anges värden för uttorkat material.

Material Typ/Fraktion	Skrymdensitet kg/m ³	Korndensitet kg/m ³	Fuktkvot %
Svensk Leca			
2-6 mm	477 (457)	875 (838)	4,4
4-10 mm	327 (318)	600 (584)	2,8
Liapor 5			
1-4 mm	514 (511)	973 (968)	0,5
4-8 mm	503 (497)	908 (897)	1,2
Liapor 6			
4-8 mm	606 (606)	1052 (1052)	0,03
Liapor 8			
4-8 mm	931 (835)	1633 (1465)	11,5
Norsk Leca			
0-4 mm	845 (765)	1392 (1261)	10,4
4-8 mm	804 (690)	1393 (1196)	16,5
8-12 mm	786 (709)	1319 (1189)	10,9
Lyttag			
0-4 mm	940 (798)	1908 (1620)	17,8
4-8 mm	901 (889)	1757 (1733)	1,4

Svensk Leca

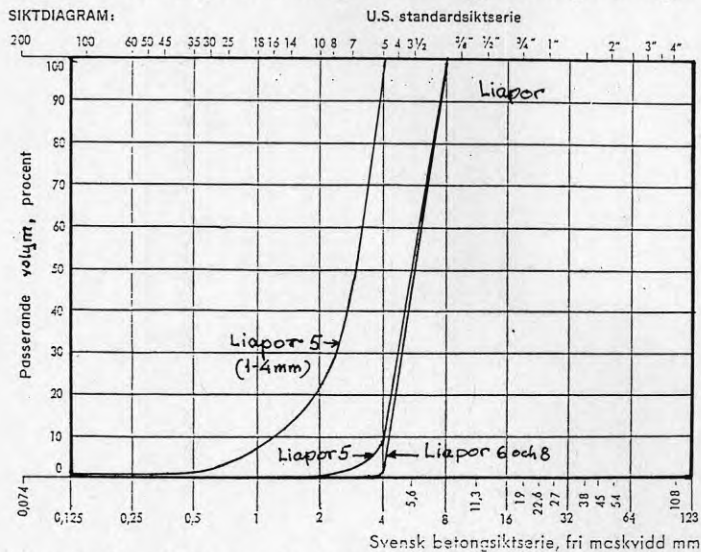
Siktkurvor framgår av figur 2.7.2



Figur 2.7.2 Siktkurvor (volymfördelning) för svensk Leca för fraktionerna 2-6 och 4-10 mm.

Liapor

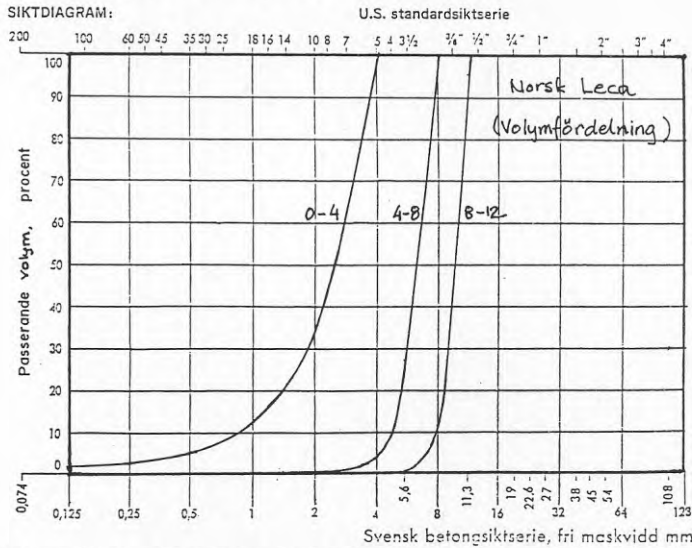
Siktkurvor för Liapor av samtliga använda typer framgår av figur 2.7.3.



Figur 2.7.3 Siktkurvor (volymfördelning) för Liapor 5, 6 och 8. I fraktionen 1-4 mm förekommer endast Liapor 5.

Norsk Leca (tung typ)

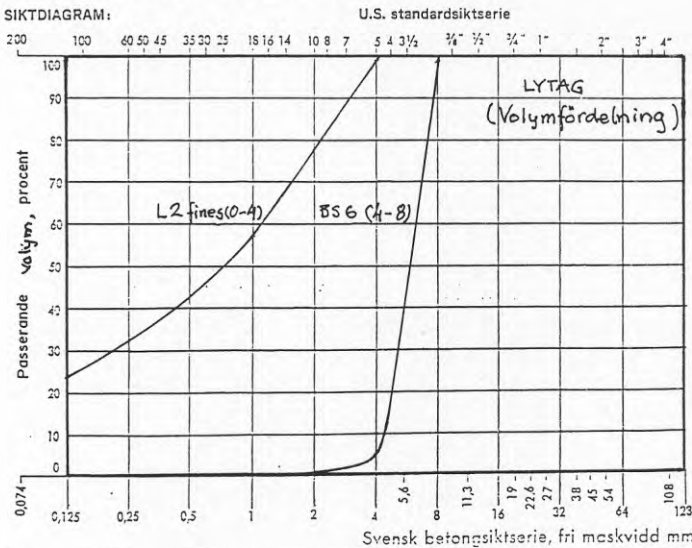
Siktkurvor framgår av figur 2.7.4.



Figur 2.7.4 Siktkurvor (volymfördelning) för norsk Leca (sk tung typ) i fraktionerna 0-4, 4-8 och 8-12 mm.

Lyttag

Siktkurvor framgår av figur 2.7.5.



Figur 2.7.5 Siktkurvor (volymfördelning) för Lyttag i fraktionerna 0-4 och 4-8 mm.

3 TILLVERKNING AV BETONG OCH PROVNING

3.1 Tillverkning

Samtliga av betongens delmaterial vägdes. Lättballastmaterialens skrymvolym mättes dessutom, dels för extra säkerhet med avseende på doseringen, dels för statistisk värdering på skrymdensiteten.

Betongen blandades i en tvångsblandare. Satsvolymen var 35 liter. Blandningsproceduren var följande:

I första momentet blandades bruket till betongen som bestod av delmaterialen sand (grus), cement med eventuella mineraltillsatser och vatten. Till bruket räknades i detta fall delmaterial med partikelstorleken från 2 mm och nedåt. Hos vissa lättballasttyper kunde inte delningen konsekvent ligga på 2 mm. S k lättballastsand, i det här fallet Liapor 5/1-4 mm, norsk Leca/0-4 mm och Lytag L2/0-4 mm, samtliga med partiklar upptill 4 mm, räknades till bruket. Vatten tillsattes i sådan mängd till bruket att konsistensen bedömdes motsvara trögflytande. För de flesta blandningar var vattentillsatsen i storleksordning 70 - 80 % av total beräknad vattenmängd. Vattenreducerande tillsatsmedel ingick i bruket.

Efter det att bruket hade färdigblandats, tillsattes lättballastmaterialen och återstoden av vattnet. Sammanlagda blandningstiden uppgick i storleksordning till 4-5 minuter.

Ca 2 minuter efter blandnings slut, bestämdes konsistensen med sättmått enligt SS 13 71 21 och densiteten enligt SS 13 71 25.

Provkuber göts, härdades och provades enligt SS 13 71 10. Betongytorna täcktes med tunn plastfolie tills kuberna avformades efter 1 dygns lufthärdning.

3.2 Speciella provningar

Efter avformningen bestämdes skrymdensiteten för samtliga kuber. De som inte provades m a p 1-dygnshållfasthet, lagrades under vatten fram till 5 dygns ålder, allt enligt standarden. Därefter bestämdes skrymdensiteten på nytt och vattenabsorptionen under 4 dygns vattenlagring erhöles.

De tryckprovade kuberna vägdes, torkades i torkskåp med inställd temperatur på 105 °C tills jämvikt inträtt, därefter vägdes kuberna på nytt. Den torra betongens skrymdensitet beräknades.

4 BAKGRUND OCH BESKRIVNING AV RESULTAT

Betongblandningarnas individuella sammansättning och resultat av provningar redovisas i detalj i en tabellsamling i slutet av rapporten. Vissa resultat är översiktligt bättre lämpade att redovisa i diagramform, såsom inverkan av lättballastvolymen på betongens tryckhållfasthet och fukttinnehållet i betongen som funktion av relativa luftfuktigheten vid uttorkning, dvs desorptionisotermer.

Från huvudserierna, redovisade i tabellserien Tabell 1 - Tabell 8, utvaldes några betongtyper för bestämning av andra egenskaper än densitet och tryckhållfasthet. Sådana egenskaper är exempelvis krympning, kapillärsugning och desorptionsegenskaper. Som lättballastmaterial i dessa utvalda serier förekom lättballastmaterialen svensk Leca, Liapor 5, 6 och 8.

4.1 Betongens skrymdensitet och tryckhållfasthet

4.1.1 Allmänt

Konstruktionslättballastbetong har här valts att betraktas som ett kompositmaterial som är sammansatt av de två huvudkomponenterna, bruk och lättballast. Bruket är den kontinuerliga och föränderliga fasen och lättballasten är partikelfasen med huvudsakligen stabila egenskaper.

Betongens egenskaper beror av dessa komponenters egenskaper och deras respektive volymandel i betongen. För konstruktionslättballastbetong inverkar lättballasten på ett annat sätt på betongens egenskaper än ballastmaterialet i vanlig betong. Lättballastpartiklarna har exempelvis mindre hållfasthet än omgivande bruk och har avsevärt mindre elasticitetsmodul än vanlig ballast. Genom att förenkla bilden av betongen är det möjligt att lättare förstå uppförandet av lättballastbetong i olika situationer och sambandet mellan skilda egenskaper.

Då vanliga ballastpartiklarnas hållfasthet är större än brukets, kommer betongens hållfasthet att bestämmas av brukets hållfasthet. Brottbilderna i en sådan betong visar bl a att brottyterna är samlade utanför partiklarna och längs deras yttre ytor mot pastan. Betongens hållfasthet är i mindre grad beroende av ballastkornens egenhållfasthet och deras volymandel i betongen. Avgörande för betongens hållfasthet och deformationsegenskaper kan tillskrivas bindemedlet eller cementpastan. Cementpastans mekaniska egenskaper bestäms av vattencementtalet, hydratationsgraden, cementtypen mm.

I de fall då ballastpartiklarnas hållfasthet är mindre än matrisens, som hos lättballastbetong, kommer betongens hållfasthet att bestämmas av såväl partiklarnas styrka som av deras volymandel i betongen. Sprickbildningen vid brott i betongen går då även genom lättballastpartiklarna. Vidare är hållfastheten för partiklar större än för bruk med samma densitet, se figur 4.1.2.

Man skulle kunna tänka sig den situationen att brukets och lättballastkornens hållfasthet är lika stora. Då bör betongens hållfasthet i stort sett bli oberoende av volymen lättballast. I verkligheten är inte detta fallet utan att partikelhållfastheten är mindre än brukets hållfasthet. Som exempel kan nämnas att då lättballastens egenhållfasthet är hälften av brukets, blir betongens hållfasthet cirka 3/4 av brukets hållfasthet. Vidare blir betongens hållfasthet ungefär hälften av brukets hållfasthet, då lättballastens egenhållfasthet är 1/4 av brukets hållfasthet. Förklaringen till detta grundas på att tillskottet till betongens hållfasthet från lättballasten och bruket erhålles genom att addera volymandelarna av de två delmaterialen multiplicerade med logaritmen för deras respektive hållfastheter, se vidare /5/. Principiellt liknande samband används för att beräkna betongens densitet, nämligen att betongens densitet är summan av volymandelarna av vardera delmaterialen multiplicerade med deras densiteter dvs ett linjärt blandningsförhållande råder.

Lättballastmaterial finns enbart tillgängligt för vissa densiteter och storleken av partiklarnas densitet bestämmer bl a deras hållfasthet. Det är således uppenbart att lättballastmaterial är bäst lämpat för ett begränsat densitet-hållfasthetsområde för betongen. Det betyder att lättballast med låg densitet är bäst lämpat för betong då låga betongdensiteter skall uppnås. Skall man däremot tillverka lättballastbetong med höga hållfastheter skall man välja lättballastmaterial med hög partikeldensitet och därmed hög hållfasthet. Tekniskt och ekonomiskt optimala betongblandningar bör i första hand eftersträvas, då lättballastmaterialet normalt är kostsammare än vanlig tung bergartsballast.

Om man exempelvis skulle vilja höja hållfastheten hos lättballastbetong utan att samtidigt höja betongens densitet eller att sänka densiteten utan att ändra hållfastheten kan detta åstadkommas genom att höja brukets eller bindemedlets hållfasthet. Höjningen av hållfastheten erhålles genom att minska vattencementtalet eller vattenbindemedelstalet. Vid minskning av vattencementtalet får den färskas betongen styvare konsistens. Konsistensen kan därefter återställas genom att tillsätta något lämpligt dispergerande tillsatsmedel. Sådana tillsatsmedel brukar även kallas plasticerande eller vattenreducerande. Vissa av dessa tillsatsmedel användes som flytmedel.

Till skillnad mot vanlig betong är lättballastbetongens skrymdensitet en betydelsefull parameter. Då betong innehåller mer eller mindre mängd uttorkningsbart vatten, är det viktigt att definiera det tillstånd hos betongen vid vilket skrymdensiteten har bestämts. Några vanliga tillstånd vid vilka lättballastbetongens skrymdensitet är bestämda är följande:

- Skrymdensitet i färskt tillstånd
- " efter normenlig lagring vid 28 dygn
- " efter uttorkning till jämvikt i 105 °C

Skrymdensiteten är således beroende på hur mycket vatten betongen innehåller såväl kemiskt bundet som sk fritt vatten. Lättballastkornen kan innehålla olika mängder vatten vilket gör lättballastbetongen mer komplicerad att använda än vanlig betong. Vanlig ballast innehåller obetydliga mängder fritt vatten.

Vid jämvikt med omgivningens relativa fuktighet kommer vatteninnehållet i betongen, den hygroskopiska fukten, huvudsakligen att bestämmas av cementmängd, vattencementtal och hydratiseringsgrad. Skillnaden mellan lättballastbetongs och vanlig betongs fuktisotermer är obetydlig. Mängden vatten som förmår bindas i lättballastpartiklarnas porsystem inom det hygroskopiska området är liten. Den övervägande mängden vatten även i lättballastbetong binds i cementpastan eller i bindemedlet.

4.1.2 Några principer för lättballastbetongens sammansättning

Ett allmänt problem som förekommer hos konstruktionslättballastbetong är separation av lättballastpartiklar i det färska betongmassan under såväl transport som gjutningprocess. Lättballastpartiklar som har mindre densitet än den omgivande matrisen, pastan eller bruket, strävar att röra sig upp mot ytan. Separerande betong får inhomogen struktur. Låga hållfastheter återfinns då på grund av hög lättballastvolym i betongens övre partier där t o m hålrumstruktur kan uppstå. Några inverkanse faktorer som styr ballastpartiklarnas separation är bl a följande:

Skillnaden i densitet mellan lättballastpartiklar och bruk.

Ju större skillnaden i densitet är desto fortare sker separationen.

Partiklarnas storlek och form.

Partiklarnas rörelsehastighet vid separation är proportionell mot kvadraten på partikelstorleken. Stora och sfäriska partiklar rör sig därför snabbare än små och kantiga.

Brukets reologiska egenskaper.

Låg viskositet eller lös konsistens hos bruket underlättar separationen.

Dessa tre faktorer ingår i Stokes' formel som uttrycker en fri partikels rörelsehastighet i ett visköst medium under gravitationens verkan. För att minska separationen av ballastpartiklar i betong bör man därför minimera skillnaden i densitet mellan ballastpartiklar och omgivande mediet, undvika stora ballastpartiklar och lösa konsistenser.

Stokes' formel är följande:

$$v = g \cdot (\rho_0 - \rho_k) \cdot r^2 / K \cdot \eta$$

där v är partikelns rörelsehastighet

ρ_0 är kontinuerliga fasens densitet

ρ_k är partikelns densitet

η är den kontinuerliga fasens viskositet

r är ekvivalent partikelradie och K är en faktor (för sfärer är $K = 4,5$)

Man kan ytterligare reducera ballastseparationen genom att välja en kontinuerlig partikelfördelningskurva hos ballasten, olika kornstorlekar hindrar varandra att röra sig fritt. Denna effekt framgår inte av Stokes' formel som enbart beskriver rörelsehastigheten för en enda helt fri partikel.

I föreliggande undersökning har "maximal stenstorlek" med avsikt begränsats till 12 mm. För svensk Leca som har låg densitet, är exempelvis partikelstorleken maximerad till 10 mm.

Egenskaper hos lättballast av expanderad lera beror bl a av tillverkningsmetoden. Med den metod som används vid bränning av Leca erhålles olika partikeldensiteter för olika partikelstorlekar, små partiklar får större densitet än stora partiklar, se figur 2.7.1. Detta resulterar i att ett sådant ballastmaterial får stor separationsvillighet i betong. Densitetsfördelningen efter partikelstorleken borde egentligen vara omvänd, nämligen att små partiklar borde ha mindre densitet än stora. Detta är ett av skälen till att maximala partikelstorleken hos lättballasten har begränsats till 8 à 12 mm.

För att kunna bedöma separationskänsligheten hos lättballastbetongblandningar har man även hjälp av siktcurvan för det totala ballastmaterialet. Siktcurvan skall återge partikelfördelningen efter partikelvolym. Det har visat sig att storleksfördelningen av ballast bör vara kontinuerlig utan markanta partikelsprång. Vid proportioneringen sammansätter man därför ballastcurvan genom att söka nå en kontinuerlig partikelfördelning. I praktiska fall med de ballastmaterial som står till förfogande kan det vara svårt att åstadkomma den önskade ballastcurvan. Förfarandet beskrivs närmare i /5/.

Med ovannämnda riktlinjer kommer volymandelen av lättballastmaterial med fraktionsstorlek 2 - 10 mm att ligga i området 32 - 40 % av den totala betongvolymen. Ersättes sanden, partiklar < 2 mm, helt eller delvis av lättballast, ökar den totala lättballastvolymen i betong.

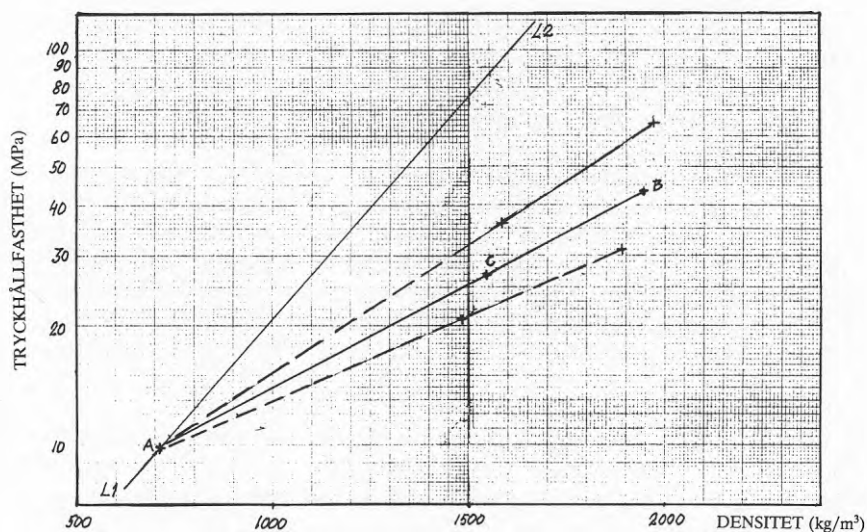
Användning av lättballastsand har både för- och nackdelar. Fördelen är att densiteten hos lättballastbetongen reduceras utan att hållfastheten behöver minska. Nackdelarna är att lättballastsand är vattenabsorberande och tillför extra vatten till betongen och att partikelfördelningen varierar kraftigt. Lättballastsand består ofta till stor del av krossmaterial. Resultatet kan bli en större spridning i densitets- och hållfasthetsresultaten. Man måste därför införa tätare provning av lättballasten med avseende på densitet och fuktkvot.

Vid användning av sk "tung lättballast" med partikeldensiteter över exempelvis 1500 kg/m^3 kan volymandelen lättballast överstiga 50 % av betongvolymen. I sådana fall kan maximal stenstorlek höjas till 16 mm. Sanden kan lämpligen helt eller till stor del bestå av lättballastsand.

När man skall sammansätta lättballastbetong med tät eller kompakt struktur, kan man lämpligen arbeta med följande tre huvudparametrar:

- tryckhållfasthet hos lättballast
- volymandelen lättballast
- tryckhållfasthet hos bruket

I föregående avsnitt 4.1.1 omnämndes inverkan av delkomponenterna lättballast och bruk på betongens densitet och hållfasthet. Översiktsmässigt kan sambandet principiellt åskådliggöras i ett diagram med betongens tryckhållfasthet som funktion av densiteten, se figur 4.1.2. Ekvivalent medeltryckhållfasthet för grovfractionen lättballastpartiklar i betong beskrivs med linjen L1 - L2. Till grovfractionen räknas här partiklar > 2 mm. Sambandet mellan lättballastens medeldensitet och medelhållfasthet är empiriskt och har erhållits från analys av ett stort antal betongprov med varierande lättballasttyper och betongsammansättningar. Om inget annat anges avser densiteten torkat material. Innehåller lättballasten fukt förskjuts linjen L1 - L2 åt höger i diagrammet. Punkten A på linjen representerar medelvärdet för lättballastens densitet och tryckhållfasthet. Punkten B:s läge i diagrammet beskriver brukets densitet och hållfasthet. Punkterna A och B sammanbinds med en rät linje. Lättballastbetongens densitet och tryckhållfasthet ligger på denna linje i punkten C. Läget för C bestäms genom förhållandet $AC : CB = (1 - n)/n$, där n är volymandelen lättballast med kornstorlek större än 2 mm i betongen. Linjen över resp. under A - B avser att visa resultatet då bruket i betongen ändras. För proportionering av lättballastbetong med kompakt struktur hänvisas till /5/.



Figur 4.1.2 Principiellt grafiskt förfarande för bestämning av en lättballastbetongs densitet och tryckhållfasthet. Punkten A representerar lättballastmaterialet, punkten B bruket och punkten C betongen.

4.1.3 Resultat (Bilaga 1a och 1b)

SVENSK LECA

Bilaga (Tabeller 1A:1, 1A:2, 1B:1 och 1B:2)

Figur 4.1.3.1

Detta lättballastmaterial har låg korndensitet, 838 kg/m³ för fraktionen 2-6 mm och 584 kg/m³ för 4-10 mm. Ballasten är exempelvis väl lämpad för tillverkning av murblock i hålrumsbetong då goda värmeisoleringsegenskaper är önskvärdt och mindre anpassad för lättballastbetong med höga hållfastheter. Eftersom det existerar ett samband mellan partikeldensiteten och partikelhållfastheten, se Figur 4.1.2, måste man skapa en hållfasthetshöjning hos bruket om högre betonghållfastheter skall åstadkommas. Andra möjligheter kan vara att minska volymen lättballast vilket dock ger högre densitet hos betongen eller byta ut lättballasten mot ett tyngre och mer hållfastare material.

Den sk egenhållfastheten för Leca-blandning av båda fraktionerna med hälften av vardera blir 9,5 Mpa ($\rho = 711 \text{ kg/m}^3$), se Figur 4.1.2. Om man som ett exempel väljer Liapor 8 vars partikeldensitet för 4-8 mm är 1465 kg/m³, blir partikeldensiteten cirka dubbelt så stor som för Leca-blandningen men med en egenhållfasthet för Liapor som är mer än 7 gånger så stor som för Leca (68 MPa). Hållfastheten hos lättballastmaterial kan beräknas med nedanstående uttryck. Liapor 8 är ett lättballastmaterial med vilket man kan nå höga betonghållfastheter, exempelvis upp till 70 Mpa och med en skrymdensitet på högst 1900 kg/m³. Detta visar att densiteten för lättballast har stor betydelse för betongens hållfasthet. I samtliga uppskattningar framgent i föreliggande redogörelse har antagits ett samband mellan lättballastmaterialets egenhållfasthet (f_b) och porositet (p) enligt följande uttryck:

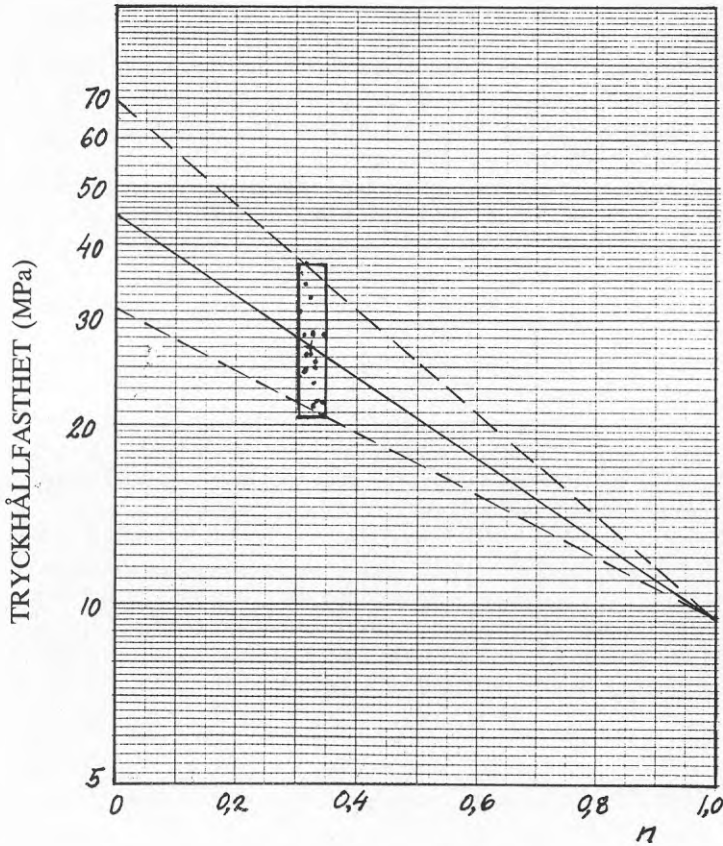
$$f_b = 1,488 \cdot 10^{2,95(1-p)}$$

Exponenten kan även uttryckas med korndensitet (ρ) och uttrycket blir då:

$$f_b = 1,488 \cdot 10^{1,135 \cdot 0,001 \cdot \rho}$$

I Bilaga, Tabell 1A, återges betongblandningarnas sammansättning och den färska betongens egenskaper och i Tabell 1B de egenskaper som erhållits vid provning av hårdnad betong.

För ren portlandscementbetong uppnåddes en högsta hållfasthet på 37,2 MPa ($\gamma = 1662 \text{ kg/m}^3$) och en lägsta på 24,1 MPa ($\gamma = 1544 \text{ kg/m}^3$). Vid tillsats av slagg och puzzolaner (mikrosilika och flygaska) kommer bindemedlets hållfasthetsegenskaper att förändras. Särskilt för slagg kommer hydratiseringshastigheten att minska, vilket framgår av 1-dygshållfastheterna. Mikrosilikatillsats är känd för att öka bindemedlets hållfasthet utan att korttidshållfastheten minskas. En viktig regel är att alltid tillsätta någon typ av dispergerande tillsats till betongen där silika förekommer. Plasticiserande tillsatsmedel av exempelvis lignosulfonatyp kan vara lämpligt.



Figur 4.1.3.1 Tryckhållfasthet vid 28 dygn hos lättballastbetong med svensk Leca som funktion av volymandelen lättballast i betongen.
 n = volymandel lättballast.

Följande recept har framtagits för lättballastbetong K25 med svensk Leca som lättballastmaterial:

Standard portlandscement	425 kg/m ³
Vatten	170 "
Gjutgrus, FM = 3,2	850 "
Svensk Leca, 2-6 mm	310 l (skrymvolym)
" 4-10 mm	310 " "
Sikament 100	1,2 % av cementvikten

Egenskaperna blev följande:

Konsistens		100 mm sättmått
Skrymdensitet		$1660 \pm 25 \text{ kg/m}^3$
Kubhållfasthet vid 28 dygn		27,5 Mpa ($\sigma=1,2 \text{ Mpa}$)
"	1 "	16,7 "
"	7 "	24,5 "
		($\sigma = \text{standardavvikelse}$)

Erforderlig medeltryckhållfasthet för K25 skall minst vara 26,7 Mpa enligt BBK 79.

Korttidshållfastheter vid normenligt lagrade kuber kan uppskattas såsom nedan anges:

Portlandscement: 1 dygn $0,6 \cdot f_{28}$
 7 " $0,9 \cdot f_{28}$

Slaggcement (30 % slagg): 1 dygn $0,3 \cdot f_{28}$
 7 " $0,7 \cdot f_{28}$

För slaggcement kommer 1- och 7-dygnshållfastheterna att ungefär motsvara de som man erhåller för vanlig betong.

För lättballastbetong med enbart portlandscement eller portlandcement med silikainblandning blir den sk korttidshållfastheten dubbelt så stor vid 1 dygn som man erhåller för vanlig betong. Man kan förvänta sig att uppnå 70 % av 28-dygnshållfastheten efter 2 till 3 dygns härdning i rumstemperatur.

Eftersom lättballastkorn är porösa och i vissa fall kan innehålla betydande halter vatten, kommer vatteninnehållet att påverka betongens densitet. De värden som här anges, gäller enbart för en fuktkvot hos lättballasten före gjutning på 3-5 %. Betongkuberna har vidare lagrats enligt bestämmelserna.

Under vattenlagring från 1 dygn till 5 dygns ålder, dvs 4 dygns vattenlagring, ökar densiteten i storleksordningen 1-3 %. Betong med slagg tillsats tycks ha en tendens att absorbera mer vatten än betong med såväl enbart portlandscement som portlandscement med silika.

Den uttorkningsbara vattenmängden vid 28 dygn har i medeltal visat sig ligga omkring 110 kg/m^3 . Detta motsvarar 6,6 % av densiteten vid 28 dygn eller en fuktkvot på 7,1 %. Sker uttorkningen vid 28 dygn har erhållits en uttorkningsbar vattenmängd på cirka 125 kg/m^3 räknat från betongens densitet vid ett dygn.

LIAPOR

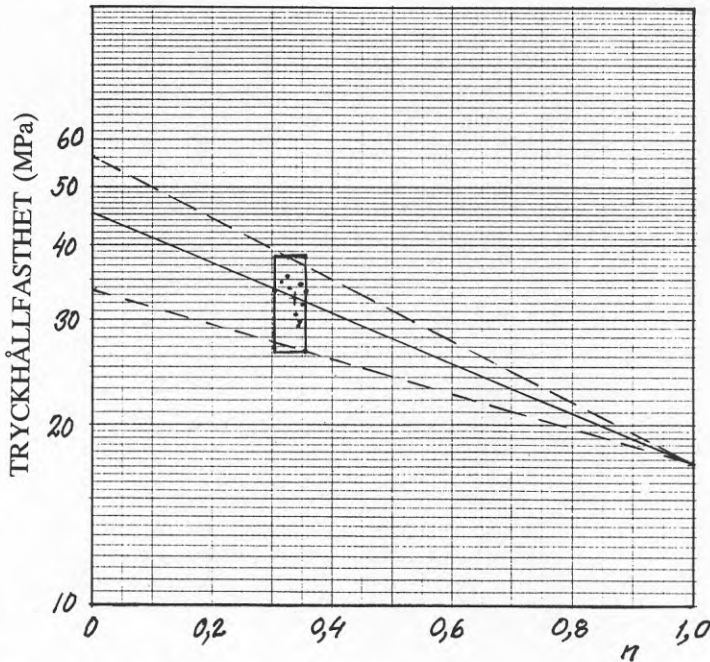
Lättballastmaterialet Liapor är uppdelat efter densitetstorlek. Efter produkt-namnet Liapor förkommer en siffra som har anknytning till ballastens skrym-densitet. Liapor 5 betyder exempelvis att skrymdensiteten är $500 \pm 25 \text{ kg/m}^3$. I samtliga betongblandningar med Liapor har Liapor 5 i fraktionen 1 - 4 mm använts oberoende av grövre densitetstyp. Beträffande fraktionen 4 - 8 mm förekommer de tre lättballasttyperna Liapor 5, Liapor 6 och Liapor 8.

Liapor 5/5, Bilaga (Tabell 2A och 2B)

Figur 4.1.3.2

Ballastblandningen Liapor 5/5 har en partikeldensitet i medeltal på ca 930 kg/m^3 , som ger en partikelhållfasthet på $17,5 \text{ Mpa}$. Med i stort sett samma hållfasthet på bruket, 45 Mpa som för betong men svensk Leca, blir hållfast-heten hos betongen $32,5 \text{ Mpa}$ ($\gamma_{28} \approx 1690 \text{ kg/m}^3$). Hållfasthetshöjningen är ca 5 Mpa och densitetshöjningen är i området $30 - 45 \text{ kg/m}^3$.

Med portlandcementmängd på $385 - 390 \text{ kg/m}^3$ eller 330 kg/m^3 och med 10% mikrosilika uppnås hållfasthetsklassen K30. Resultat av tryckhåll-fasthetsprovningen vid 28 dygn visas i Figur 4.1.3.2 nedan.

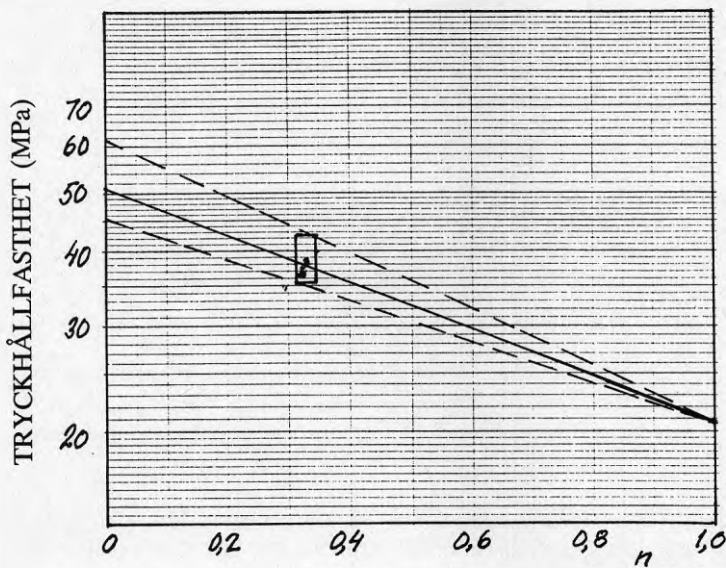


Figur 4.1.3.2 Tryckhållfasthet vid 28 dygn hos lättballastbetong med Liapor 5 som funktion av volymandelen lättballast i betongen.
 n = volymandel lättballast.

Liapor 5/6, Bilaga (Tabell 3A och 3B)
Figur 4.1.3.3

Lättballastblandningen Liapor 5/6 betyder här att i denna blandning ingår Liapor 5 med fraktionen 1 - 4 mm och Liapor 6 med fraktionen 4 - 8 mm. Blandningen har partikeldensiteten 1010 kg/m^3 i medelvärde vilket beräkningsmässigt ger en partikelhållfasthet på 21 Mpa. Även om man höjer hållfastheten på bruket till 50 Mpa kan man inte påräkna att med tillräcklig marginal uppnå hållfasthetsklassen K35 som då skulle vara en hållfasthetsklass högre än vid användning av Liapor 5/5. Tryckhållfastheten ligger just på gränsen. Med en höjning av cementhalten upp till 400 kg/m^3 och sänkning av vattencementtalet till något mindre än 0,5 bör det normalt inte vara problem med att uppnå K35. Betongens skrymdensitet vid 28 dygn kommer att något överstiga 1700 kg/m^3 .

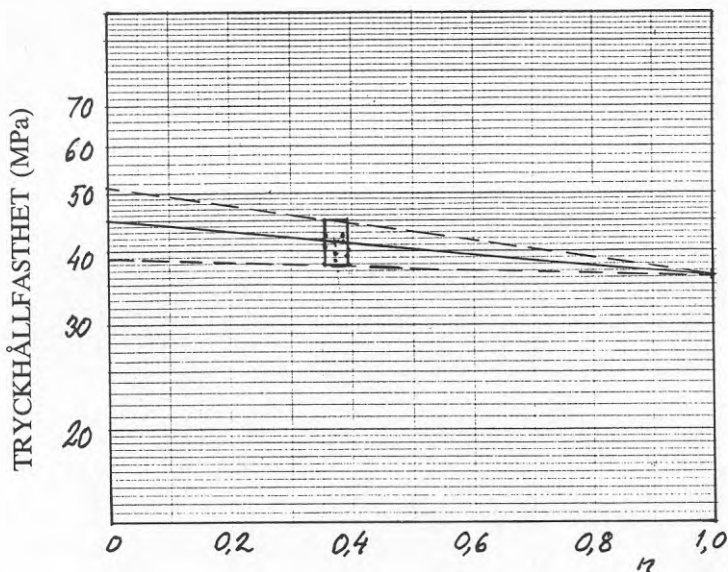
Tryckhållfastheter vid 28 dygn visas i Figur 4.1.3.3 nedan.



Figur 4.1.3.3 Tryckhållfasthet vid 28 dygn hos lättballastbetong med Liapor som funktion av volymandelen lättballast i betongen. Liapor 5 (1-4 mm) och Liapor 6 (4-8 mm). n = volymandel lättballast.

Liapor 5/8, Bilaga (Tabell 4A och 4B)
Figur 4.1.3.4

Ballastblandningen Liapor 5/8 (Liapor 5 i fraktionen 1 - 4 mm och Liapor 8 i fraktionen 4 - 8 mm) har medelpartikeldensiteten 1215 kg/m³. Partikelhållfasthet uppskattas till 36 MPa. För att nå hållfasthetsklassen K40 skall brukets tryckhållfasthet minst vara 50 MPa. Betongens densitet vid 28 dygn bör ligga inom 1750 - 1780 kg/m³. Uttorkad betong kommer att ligga från 1650 kg/m³ och uppåt. Resultat av tryckhållfasthetsprovningsen vid 28 dygn framgår av Figur 4.1.3.4 nedan.



Figur 4.1.3.4 Tryckhållfasthet vid 28 dygn hos lättballastbetong med Liapor som funktion av volymandelen lättballast i betongen. Liapor 5 (1-4 mm) och Liapor 8 (4-8 mm). n = volymandel lättballast.

I och med att betongens hållfasthet höjes, främst orsakat av ökning av lättballastens partikeldensitet och partikelhållfasthet höjes, blir korttidshållfastheterna i förhållande till 28-dygnshållfastheterna procentuellt mindre än hos lättballastbetong med mindre hållfastheter. För korttidshållfastheter såsom 1-dygnshållfastheter har typen plasticerande tillsatsmedel betydelse. Exempelvis är lignosulfonatbaserade tillsatsmedel hållfasthetsretarderande.

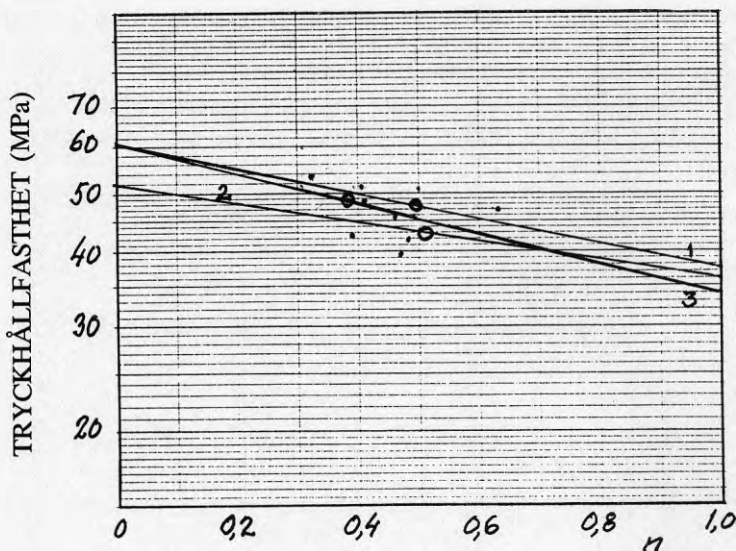
För portlandscement har tryckhållfasthet på $0,45 \cdot f_{28}$ erhållits vid 1 dygn och $0,85 \cdot f_{28}$ vid 7 dygn. Slagg kan tillsättas som cementersättning. Då erhålles lägre korttidshållfastheter än med användning av enbart portlandscement. Vid 1 dygn blev hållfastheten mindre än 20 % av 28-dygnshållfastheten vid 30 % slaggtillsats räknat på bindemedelsmängden.

NORSK LECA

Bilaga (Tabell 5A och 5B)

Figur 4.1.3.5

"Tung" norsk Leca förekommer i tre olika storleksfraktioner, nämligen 0 - 4, 4 - 8 och 8 - 12 mm. Partikeldensiteten för de två grövsta fraktionerna är ungefär lika stor, 1190 - 1200 kg/m³. Den beräknade partikelhållfastheten blir ca 33 Mpa. Eftersom lättballastblandningen Liapor 5/8 har medelpartikel-densiteten 1215 kg/m³ kan denna betraktas som ganska likvärdig med norskt Leca-material. Hos detta lättballastmaterial förekommer även lättballastsand. Den vanliga sanden eller gruset kan därför helt eller delvis ersättas av Leca-sand. Hur stor andel av finballasten som skall ersättas är avhängigt av flera faktorer och bör avgöras från fall till fall. Väljes Leca-sand kommer brukets hållfasthet att minska för de låga vattencementtalen, men det gör även betongens densitet och i ännu större grad. För att nå höga hållfastheter hos bindemedlet kan man lämpligen tillsätta mikrosilika. Här har valts 10 % av cementmängden. Hållfasthetsklassen K45 har uppnåtts vilket skall motsvara en medelkubhållfasthet på omkring 50 MPa. Betongens densitet för uttorkad material ligger på omkring 1650 kg/m³ och efter normenlig lagring vid 28 dygn på 1780 kg/m³.



Figur 4.1.3.5 Tryckhållfasthet vid 28 dygn hos lättballastbetong med norsk Leca som funktion av volymandelen lättballast i betongen. Lättballasten var uppdelad i tre olika fraktioner, nämligen 0-4, 4-8 och 8-12 mm. Linje 1 gäller för betong med lättballast 0-8 mm, linje 2 för lättballast 0-12 mm och linje 3 för lättballast 4-12 mm.

SPECIALBLANDNINGAR

Bilaga (Tabell 6A och 6B)

I en del betongblandningar har olika lättballasttyper kombinerats med varandra, såsom norsk och svensk Leca, norsk Leca med hög densitet och svensk Leca med låg. För att minska risken för separation av lättballasten väljes grovballasten på så sätt att fraktionen med de största partiklarna skall ha den största densiteten, m a o i fraktionen 2 - 4 mm väljes svensk Leca och i fraktionen 4 - 8 mm norsk Leca. I andra blandningar har vissa lättballastfraktioner utelämnats. Inga överraskande resultat har uppnåtts som speciellt behöver kommenteras.

LYTAG

Bilaga (Tabell 7A och 7B)

Lytag har levererats i två fraktioner, nämligen 0 - 4 mm med medelpartikel-densiteten på ca 1620 kg/m^3 och fraktionen 4 - 8 mm med partikeldensiteten 1730 kg/m^3 . Uppskattningsvis bör partikelhållfastheten minst vara 100 MPa. Det ligger därför nära till hands att anta att betong med detta lättballastmaterial kan sammansättas på samma sätt som vanlig betong vid proportionering med avseende på hållfasthet. För normala hållfasthetsområden kan man anse att betongens hållfasthet är ungefär lika stor som brukets. Detta kan man tillåta sig då ballastens hållfasthet är minst dubbelt så stor som brukets hållfasthet. Med de båda fraktionerna av Lytag kan man uppnå hållfasthetsklasserna K50 och K55 med densitet vid 28 dygn på omkring 1750 kg/m^3 .

4.2 Krympning, kapillaritet och desorptionsisotermer

För bestämning av krympning, kapillärsugnings- och desorptionsegenskaper har valts ett begränsat antal typer lättballastbetong utvalda bland de som tidigare beskrivits. Således provades tre olika betongsammansättningar med svensk Leca respektive Liapor 5/5, två med Liapor 5/6 och en med Liapor 5/8. Sammansättning, densitet, hållfasthet mm framgår av Bilaga, Tabell 8.

4.2.1 Krympning

Krympningen bestämdes enligt SS 13 72 15.

Från uppmätta värden för de nio betongsammansättningarna redovisade i Bilaga 1a, Tabell 8, har erhållits följande samband genom att använda minsta kvadratmetoden mellan krympningen (ϵ) och kubhållfastheten för betongen vid 28 dygn (f_{28}):

$$\epsilon_{\text{krympn}} = 0,83 - 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot f_{28} \quad (\text{‰}) \quad (\pm 0,07 \text{ ‰})$$

Uttrycket gäller då betongens tryckhållfasthet ligger inom området från ca 25 till 45 Mpa varvid krympningen blir i storleksordning 0,6 - 0,8 ‰.

För svensk Leca och hållfasthetsklassen K25 blir krympningen 0,73 ‰.

4.2.2 Kapillaritet

Tre provkroppar av vardera av de nio betongblandningarna uttogs för provning, se Bilaga Tab. 8. Provkropparna utsågades från gjutna kuber så att sugriktningen blev vinkelrätt mot gjutningsriktningen och att sugytan blev den yta som legat mot betongformen. Sugytan var ca 50x50 mm och höjden 40 mm. Före provningen hade provkropparna torkats till jämvikt i 50 °C och därefter konditionerats till 20 °C i exsikator. Mätförfarandet och bearbetning av mätvärdena finns beskrivna i Betonghandboken /6/. Resultatet framgår av Tabell 4.2.2, där det finns redovisat motståndstal (m), kapillaritetstal (k) och storleken av den porositet som deltar i kapillärtransporten (P_k).

Den porositet som deltar i kapillärtransporten av vatten motsvarar i stort sett densamma som erhålles vid motsvarande provning av vanlig betong. Som jämförelse kan nämnas värden för vanlig betong:

Cementhalt 350 kg/m³ med vct=0,4 ger $P_k=0,044$

Cementhalt 400 kg/m³ med vct=0,46 ger $P_k=0,084$

Medelvärdet för samtliga provade lättballastbetonger ger $P_k=0,057$ som skulle motsvara en vanlig betong med cementhalten 440 kg/m³ och vct=0,4, dvs en sammansättning som nära överensstämmer med den sammansättning som angetts för K25 med svensk Leca, se avsnitt 4.1.3 svensk Leca. Det finns således inte några tecken som tyder på negativ påverkan av att den porösa lättballasten skulle öka kapillärtransporten av vatten i betongen.

För samma hållfasthetsklass har lättballastbetongen betydligt mindre kapillär vattentransport än normalbetong. Dess hållfasthet skall ungefär fördubblas för att få samma kapillära transportegenskaper.

Bindemedlets kapillärporvolym är huvudsakligen den parameter som är bestämmande för de kapillära transportegenskaperna hos såväl lättballastbetong som vanlig betong.

Tabell 4.2.2 Sammanställning av resultat som uppnåtts vid provning av kapillär vattensugning.

Prov	Tryckhållf. (MPa)	Kapillaritetstal (kgm ² ↓ s)	Motståndstal (s/m ² · 10 ⁶)	Porositet (P _k %)
SL-4R	31,0	0,016	13,5	6,3
SL-5R	27,0	0,011	31,1	6,1
SL-7R ¹⁾	40,7	0,011	17,4	4,5
L5-1R	36,3	0,013	13,0	4,7
L5-5R ²⁾	40,7	0,015	0,3	4,8
L5-9R ³⁾	36,1	0,016	8,6	4,7
L6-2R ²⁾	40,0	0,016	27,6	8,4
L6-3R	39,6	0,014	10,0	4,4
L8-1R	44,5	0,016	22,0	7,5

1) 5 % silika på cementvikten

2) 10 % "

3) 30 % av bindemedlet består av slagg

4.2.3 Desorptionsisotermer

Mätningarna utfördes på utsågade skivor från betongprismor gjutna i storleken 100x100x200 mm. Skivornas mått blev ca 100x100x5 mm. De förvarades under vatten tills provningen startades. Provskivorna, 3 st för varje lättbetongmaterial, placerades i täta boxar som i sin tur förvarades i konstant temperatur av $20 \pm 0,3$ °C. Relativa luftfuktigheten hölls konstant med olika mättade saltlösningar inuti boxarna.

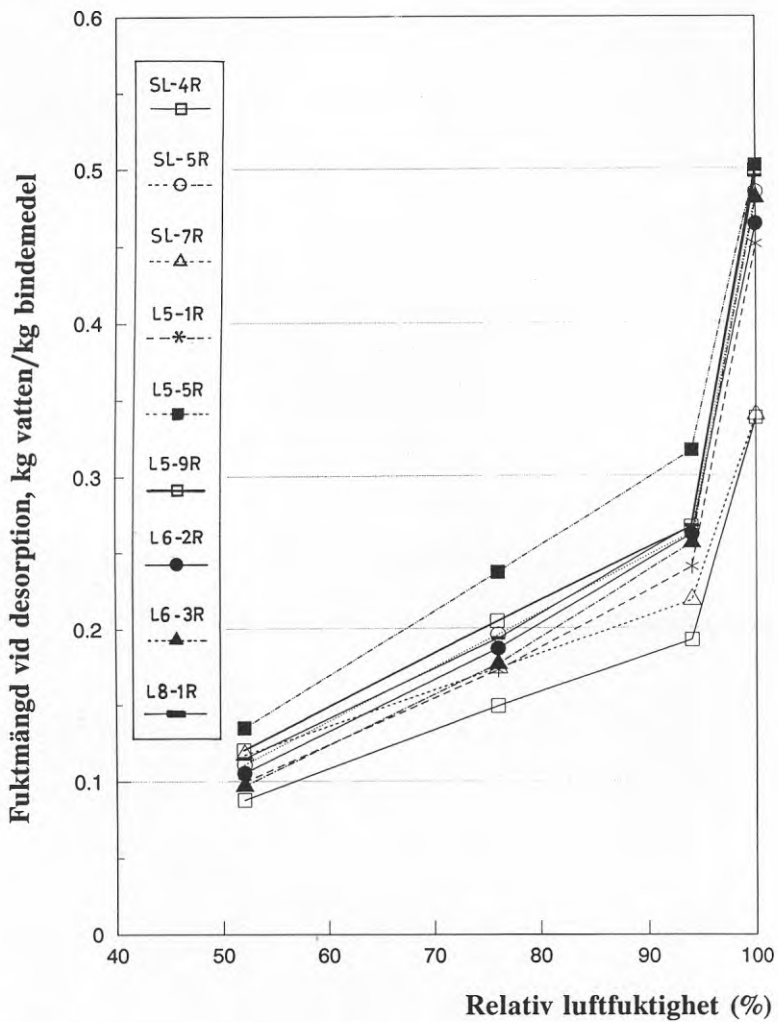
Följande salter användes:

$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, NaCl och KNO_3 . Mättade lösningar av dessa gav i tur och ordning relativa luftfuktigheter på $54,4 \pm 0,2$ %, $75,5 \pm 0,1$ % och $94,6 \pm 0,7$ %, allt enligt angivelse i handböcker.

Provkropparna förvarades i varje klimat under så lång tid tills man bedömde att man var så nära jämvikt som praktiskt var möjligt. Resultatet visas i diagramform i Figur 4.2.3. Räta linjer har dragits mellan uppmätta värden. Desorptionsisotermer i området från cirka 50 till 95 % relativ fuktighet kan användas för uppskattning av jämviktsfuktkvoter för olika betongblandningar.

Mängden fukt som fixeras i lättballastkornen inom det hygroskopiska området, är liten i förhållande till det vatten som fixeras i pastan dvs i bindemedelsfasen. I lättballastpartiklarna bindes i storleksordning mindre än 1,5 % av den fukt som bindes i pastan.

Förloppet av desorptionsisotermerna förändras obetydligt i närvaro av lättballasten i betongen. Vid 54 % relativ luftfuktighet uppgår det kapillärbundna vattnet till 45 ± 6 kg och vid 94 % relativ luftfuktighet till 105 ± 9 kg räknat per m^3 betong. För relativa luftfuktigheter mellan nämnda värden bör kunna interpoleras rätlinjigt.



Figur 4.2.3 Desorptionsisotemer för lättballastbetong med svensk Leca (SL) och Liapor (L). Vatteninnehållet anges i viktsdelar av bindemedelsmängden.

FÖRSÖKSPROGRAM II

5 NYTTJANDEINRIKTADE UNDERSÖKNINGAR - EGENSKAPER

Som beskrivits i inledningen, avsnitt 1.3, fortsattes och utvidgades undersökningarna i praktisk riktning med anknytning till såväl tillverkning som användning av lättballastbetong i bärande huskonstruktioner. Efter att i "Försöksprogram I" ha utprovat flera olika lättballasttyper och bindemedelskombinationer med avseende på densitet, konsistens och tryckhållfasthet, har fortsatta försök baserats på ett begränsat antal varierande betongsammansättningar. Svensk Leca har valts som lättballastmaterial, bindemedlet var enbart standard portlands cement, dock med några blandningar i vilka ingick 5 % silika. Däremot varierades typ och mängd av flytmedel i större omfattning än i "Försöksprogram I". Avsikten har bl a varit att söka höja tryckhållfastheten vid 28 dygn från 27,5 Mpa hos lättballastbetongen med svensk Leca som ballast och med användning av enbart standard portlands cement genom optimering av betongsammansättning. Därvid har särskilt utprovats olika typer, kombinationer och tillsatsmängder plasticerare.

Följande olika plasticerande tillsatsmedel har använts:

Beteckning	Varunamn	Tillverkningsbas
P	Peramin	Melaminformaldehyd
M	Mighty	Naftalenformaldehyd
R-HP	Rescon HP	Naftalenformaldehyd
R-P	Rescon P	Lignosulfonat

Betongsammansättning och resultat framgår av tabellerna Tabell 1A - II, Tabell 1B - II, Tabell 2A - II och Tabell 2B - II i Bilaga 1b.

I ovanstående tabell utnyttjas beteckningen för symboler för olika tillsatsmedel till "prov nr" i kolumn 1, se tabellbilagan. Siffran anger nummer för betongsammansättning. I Tabell 1 betecknar M före siffran Mighty och P avser Peramin. R efter siffran betyder repetition och S betyder silikatillsats. I betongblandningarna som förekommer i Tabell 2 har nyttjats enbart tillsatsmedel R. Det bör observeras att två olika tillsatsmedel kan förekomma i en och samma betongblandning.

Av resultaten i ovan nämnda tabeller kan utläsas att det visat sig vara möjligt att höja betongens tryckhållfasthet över det tidigare nämnda värdet 27,5 Mpa samtidigt som betongens densitet ligger kring 1650 kg/m³. Hållfastheter inom området 29 - 34 Mpa erhålles genom låga vattencementtal och lämplig typ och mängd plasticerande tillsatsmedel. Naftalenbaserade plasticerare tillsammans med en liten mängd silika, 5 vikt-% på cementen, tycks vara en lämplig kom-

bination såväl med avseende på den färska betongens reologiska egenskaper som betongens hållfasthet.

I samband med användning av Mighty tillämpades följande blandningsprocedur:

- Torrblanda cement och sand
- Tillsätt hälften av vattnet under blandning
- Mighty löses i återstoden av vattnet
- Tillsätt ungefär hälften av lösningen vatten och Mighty
- Tillsätt lättballasten och resten av vattenlösningen
- Bestäm konsistens och densitet

Blandningsproceduren var även lämplig för andra plasticerare. Ingen större påverkan på konsistensen kunde märkas om tillsatsmedlet blandades med blandningsvattnet redan från början.

5.1 Separation av lättballast vid stavvibrering

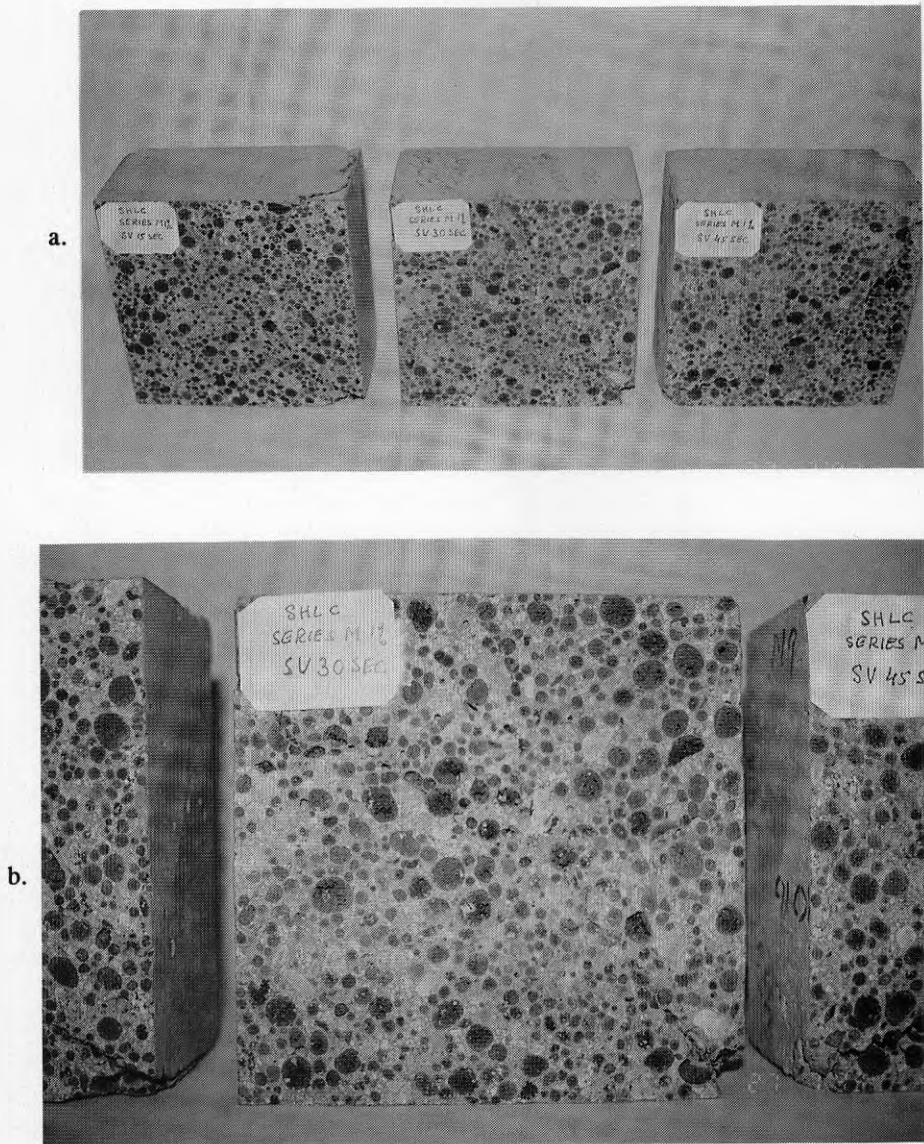
Provingen utfördes på så sätt att lättballastbetong packades med stavvibrator i samband med gjutning av betong i kubformar med 15 cm sida. Vibreringstiderna var 15, 30 och 45 sekunder. Efter bestämning av densitet och tryckhållfasthet delades kuberna på mitten varefter tvärsnittet kunde bedömas med avseende på lättballastpartiklarnas fördelning i gjutningsriktningen dvs i höjddled. Betongen som användes till proven betecknas M9, se Tabell 1A - II och Tabell 1B - II. Resultatet återges på nytt i nedanstående Tabell 5.1.

Tabell 5.1 Densitet och tryckhållfasthet vid olika vibreringstider.

Vibreringstid (s)	Densitet (kg/m ³)		Tryckhållfasthet (Mpa)	
	1 dygn	28 dygn	1 dygn	28 dygn
15	1648	1630	25,0	30,5
30	1665	1641	26,4	32,8
45	1675	1650	27,2	33,9

Genom att öka vibreringstiden brukar detta resultera i en förbättrad kompaktering av betong. Såväl densitet som tryckhållfastheten kommer att öka efter utdrivning av innesluten luft. Detta tycks ha skett vid försöken med stavvibrering.

Betongtvärsnittet har fotograferats och bilderna visas i Figur 5.1 a och b. Ingen separation av lättballastpartiklar är möjlig att upptäcka.



Figur 5.1 Bilder på tvärsnitt genom spräckta betongkuber. Överytan är riktad åt vänster.
 a. Från vänster räknat vibreringstid 15, 30 och 45 sekunder.
 b. Uppförstorad bild av prov avseende vibreringstid 30 resp 45 sekunder.

5.2 Inverkan av volymen lättballast i betongen

Försöken avsåg att bestämma inverkan av volymen lättballast i betong på konsistens, densitet och tryckhållfasthet. Betongens sammansättning följde ungefär den som har beteckningen M1 enligt Tabell 1A - II. Sammansättningen var följande:

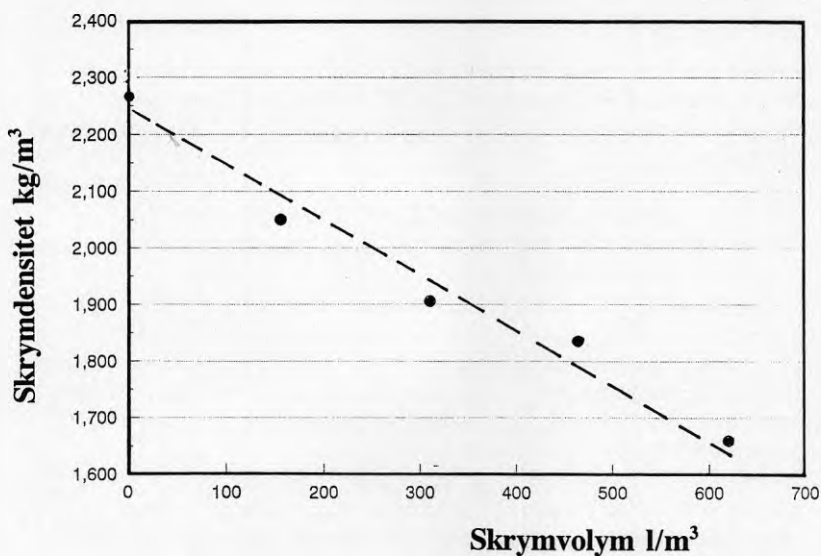
Standard portlandcement	425 kg/m ³
Sand	850 "
Svensk Leca, 2-6 mm	310 l/m ³ (skrymvolym)
" , 4-10 mm	310 "
Vattencementtal	0,395
Mighty 100	1 % på cementmängden

Lättballastvolymen enligt ovanstående recept valdes till 100 %. Övriga provade volymer utgjorde 75, 50, 25 och 0 % med samma förhållande mellan de två lättballastfraktionerna. 0 % betyder enbart cementbruk. Resultatet framgår av Tabell 5.2.

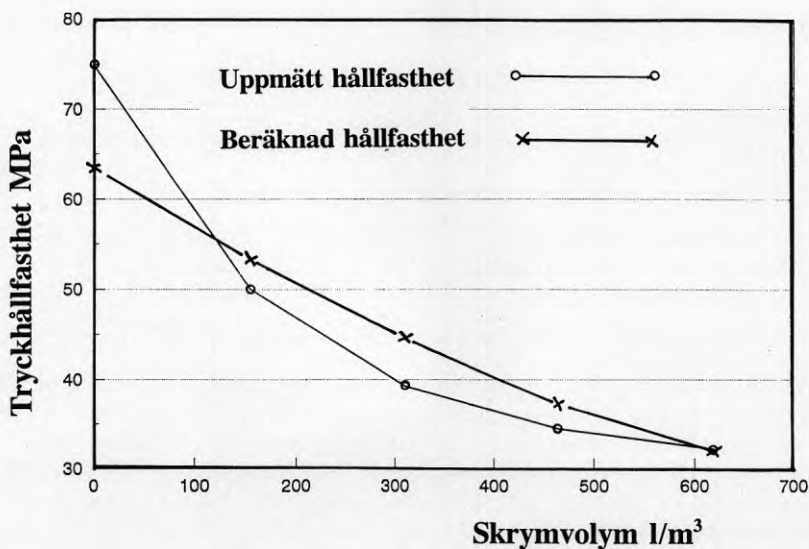
Tabell 5.2 Inverkan av volymen lättballast på konsistens, densitet och tryckhållfasthet. Densitet och hållfasthet är bestämda vid 28 dygn.

Blandning	Skrymvolym Leca l/m ³	Sättmått mm	Densitet kg/m ³	Tryckhållfasthet Mpa
1	620	35	1660	32,2
2	464	45	1835	34,5
3	310	80	1905	39,3
4	155	80	2050	50,0
5	0	-	2265	75,0

Hållfastheterna och densiteterna minskar med ökande halt lättballast i betongen. I Figur 5.2.1 visas betongens densiteter vid 28 dygn efter normenlig lagring. Tryckhållfastheterna som erhållits vid provning har märkts ut i Figur 5.2.2. I samma diagram har inritats även beräknade värden enligt den metod som redovisats i /5/. Särskild stor avvikelse mellan uppmätt och beräknad tryckhållfasthet har erhållits för bruket. Genom tillsättning av lättballast som uppgår till omkring en tredjedel av betongens volym, minskas betongens tryckhållfasthet ner till nästan hälften av brukets tryckhållfasthet då lättballastmaterialets medelskrymdensitet är något mindre än 400 kg/m³ (390 kg/m³).



Figur 5.2.1 Lättballastbetongens skrymdensitet vid olika volymandelar svensk Leca uttryckt som skrymvolym per m³ betong.



Figur 5.2.2 Tryckhållfasthet vid 28 dygn uppmätt och beräknad hos lättballastbetong med olika volym lättballast uttryckt som skrymvolym per m³ betong.

5.3 Konsistensändring med tiden - åtgärder

På liknande sätt som vanlig betong kommer lättballastbetongens konsistens att bli styvare med tiden. Betongens arbetbarhet försämras ju längre tid som gått efter det att blandningen har avslutats. Tillstyvnandet av den färska betongen kan orsakas av

- att tillsatsmedlets plasticerande effekt successivt avtar,
- att vatten sugas in i lättballastkornen så att cementpastans vattencemental minskas och
- att cementets hydratisering har börjat.

För att bestämma konsistensändringen med tiden och för att bestämma erforderlig mängd plasticerare respektive mängd vatten för att återställa konsistensen användes motsvarande betong vars recept beskrivits i föregående avsnitt 5.2. Provningsen utfördes på följande sätt:

Omedelbart efter det att blandningsproceduren hade avslutats bestämdes betongens densitet respektive konsistens med sättmått. Betongen förvarades övertäckt i betongblandaren och efter 1 timme provades densitet och konsistens på nytt. Samma typ plasticerare som i grundreceptet tillsattes, nämligen Mighty-lösning. I ytterligare en betongblandning tillsattes enbart vatten efter en timmes lagring för att återställa konsistensen.

Resultatet av provningen blev:

Moment	Sättmått mm	Densitet kg/m ³
Provningsen efter initialblandning	50	1700
Provningsen efter lagring i 1 timme	25	1740
Tillsats av Mighty-lösning	50	1690

Tillsatsmedlet var i form av en vätskelösning. Vid tillsättning av denna ökade vattencementtalet. Tillsatsmängden av Mighty var 0,33 % torrmasa av cementmängden. Då initialmängden var 1 % erfordrades således en tredjedel extra tillsats för att återställa konsistensen efter en timmes lagring. Vattentillskottet motsvarade en ökning av vattencementtalet med 0,007. Totala vattentillsatsen motsvarade ett vattencementtal på 0,402 vilket från början var 0,395.

Tillsattes extra vatten efter en timme var det nödvändigt att tillsätta så mycket att det motsvarade en ökning av vattencementtalet med 0,05. Uppskattningsvis kommer denna ökning av vattencementtalet att minska lättballastbetongens tryckhållfasthet med 6 à 7 %. Tillsats av Mighty-lösning minskade tryckhållfastheten med avsevärt mindre, beräkningsmässigt ca 1 %.

5.4 Lättballstbetongens elasticitetsmodul

Lättballstbetongens elasticitetsmodul har valts att bestämmas på betongtyper med ganska likvärdig sammansättning men med tre olika typer av plasticerande tillsatsmedel och med varierande mängder. Även kombinationer förekommer. Beteckning av tillsatsmedlen är följande:

2HPP avser blandning av Rescon HP och Rescon P, båda lignosulfonatbaserade, M avser Mighty och P avser Peramin. S betyder att silika ingår i betongen.

Elasticitetsmodulen har bestämts vid tryckprovning av cylindrar enligt svensk standard SS 13 72 32. Resultatet redovisas i Tabell 5.4 där även densiteter och kubhållfastheter vid 28 dygn anges.

Tabell 5.4 Elasticitetsmodul, densitet, tryckhållfasthet för några utvalda lättballstbetonger

Beteckn	Cement kg/m ³	Silika kg/m ³	Tillsats % av C	Vct (vbt)	Densitet kg/m ³	Tryckhållf. Mpa	E-modul GPa
R 2HPP	425	-	HP 1,1 P 0,4	0,395	1670	34,0	10,5
R 2SHPP	420	20	HP 1,1 P 0,4	0,435 (0,415)	1605	34,0	9,5
R 2SHP	420	20	HP 1,5	0,395 (0,367)	1655	35,0	9,0
M8	425	-	M 1,0	0,395	1640	32,2	10,5
P13	425	-	P 2,2	0,449	1640	30,0	9,0
P14S	425	21	P 2,2	0,483	1625	32,6	9,0

Då värdena på elasticitetsmoduler liksom på densiteter och tryckhållfastheter har tämligen begränsad spridning, kan resultaten redovisas som medelvärden med tillhörande variationskoefficienter (inom parentes nedan).

Densitet (vid 28 dygn efter normallagring)	1640 kg/m ³ (1,4 %)
Tryckhållfasthet (vid 28 dygn)	33.0 Mpa (5,5 %)
Elasticitetsmodul	9,6 GPa (7 %)

5.5 Värmekonduktivitet

Värmekonduktiviteten eller värmeledningsförmågan bestämdes på gjutna skivor av lättballastbetong. Skivorna hade planerats för dimensionen 250 x 250 x 50 mm. Tjockleken blev emellertid 55 mm. Efter normal lagring torkades skivorna och överlämnades till Avdelningen för husbyggnadsteknik, Chalmers tekniska högskola, för provning. Redovisningen av provningen i helhet återges i Bilaga 2.

Följande resultat har erhållits:

Densitet (efter torkning i 105 °C)	1575 kg/m ³ (1,1 %)
Värmekonduktivitet	0,66 W/m°C (4 %)

(Värden inom parentes är variationskoefficienten)

5.6 Nötningsmotstånd

Lättballastbetongs nötningsmotstånd jämfördes med vanlig betongs. Som provmaterial tillverkades plattor med storleken 1,1 x 1,1 x 0,25 m. Lättballastbetongen hade sammansättning som redovisats i avsnitt 5.2. Den färska betongens densitet var 1750 kg/m³, sättmättet 140 mm och tryckhållfastheten vid 28 dygn var 37,0 Mpa.

Den vanliga betongen (K25) hade följande sammansättning:

Standard portlandscement	275 kg/m ³
Sand	1060 "
Makadam, 8-12 mm	385 "
Makadam, 12-16 mm	385 "
Vatten	203 "

Betongens tryckhållfasthet vid 28 dygn var 32,5 Mpa.

Som förebild för konstruktion av provningsutrustningen har använts den som är standardiserad för bestämning av nötningsmotstånd enligt svensk standard SS 13 72 41. Provningsutrustningen är avbildad i Figur 5.6.1. De väsentliga skillnaderna är dels att den för provningen använda apparaturen hade belastningen 330 N per hjul istället för 130 N, dels att varvtalet var 67 varv per minut istället för 60 varv per minut.

Slitspåren efter nötningsprovningen visas i Figur 5.6.2. På lättballastbetongplattans slityta syns avnötta lättballast partiklar vilka torde ha mycket litet slitmotstånd. Nötningen provades på betongplattornas övre gjutyta. Resultatet har sammanfattats i Tabell 5.6.

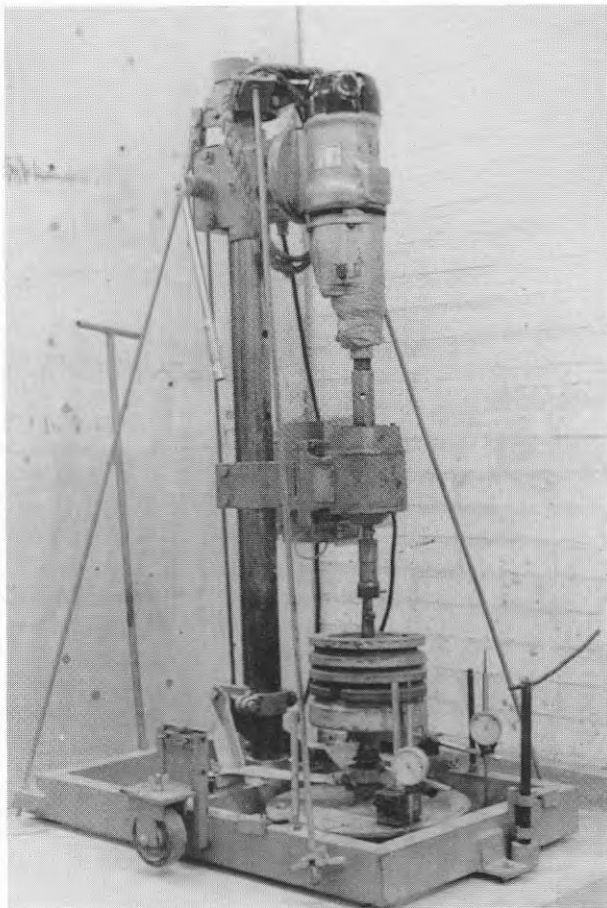
Tabell 5.6 Nötningsdjup i mm uppmätt vid bestämning av nötningsmotstånd.

Antal varv- prov nr	Vanlig betong			Lättballastbetong		
	Max	Min	Medel	Max	Min	Medel
800-1	1,04	2,64	1,84	0,86	1,56	1,21
800-2	1,24	2,73	1,99	0,93	1,94	1,43
1600-1	1,36	3,91	2,63	1,16	2,20	1,68
1600-2	1,40	3,89	2,65	1,19	2,31	1,73

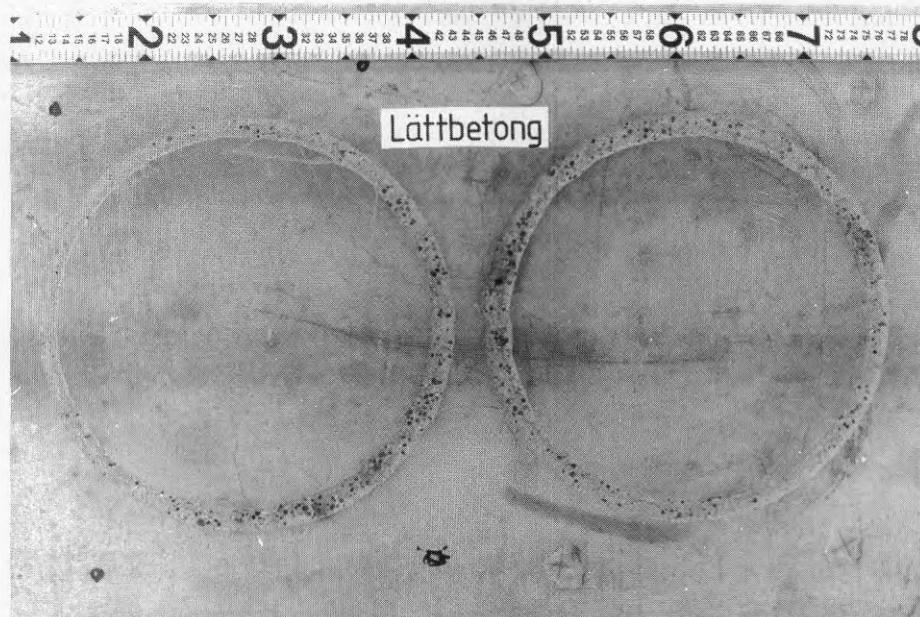
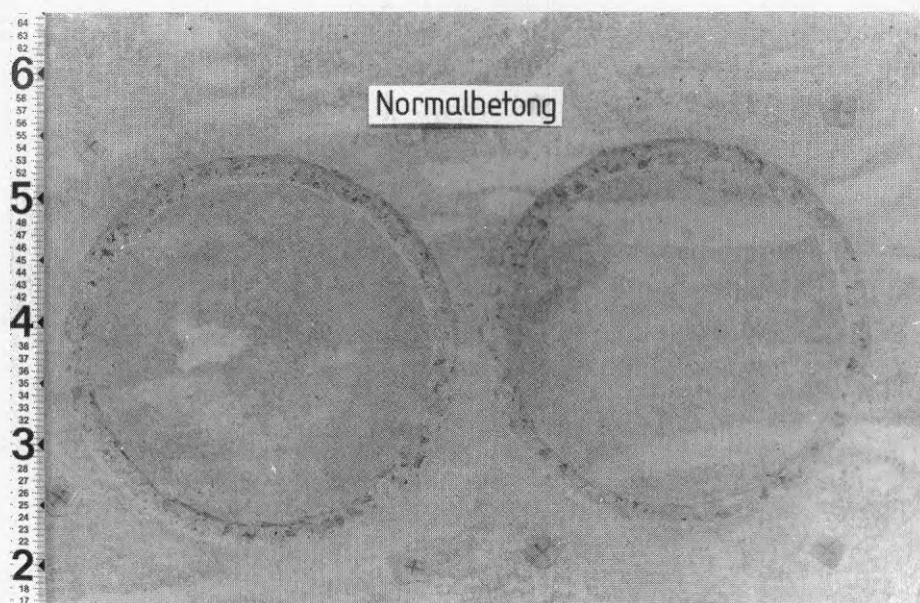
Medelvärden på slitdjupet för de båda betongerna sammanfattas som följer:

Nötningsdjup för vanlig betong är efter 0-800 varv 1,9 mm och efter 0-1600 varv 2,6 mm, för lättballastbetong efter 0-800 varv 1,3 mm och efter 0-1600 varv 1,7 mm.

Lättballastbetongens nötningsmotstånd med avseende på roterande och hasande hjul är tydligt bättre för lättballastbetong än för vanlig betong i dessa prov och under de förutsättningar som har rått. Orsaken till detta bör vara skillnaden hos cementpastans hållfasthet i de båda betongerna. Uppskattningsvis är pastans hållfasthet dubbelt så stor i lättballastbetongen som i den vanliga betongen.



Figur 5.6.1 Utrustning för bestämning av betongs nötningsmotstånd.



Figur 5.6.2 Fotografier som avbildar slitspår som uppstått vid bestämning av nötningsmotståndet hos vanlig betong med tryckhållfastheten 32,5 MPa och lättballastbetong med tryckhållfastheten 37,0 MPa.

5.7 Akustiska egenskaper

Den akustiska delen i projektet har omfattat beräkning av ljudisoleringsförmågan hos en enkelvägg av lättballastbetong med avseende på luftljud. Beräkningen är utförd genom att bestämma reduktionstalet med "Ingemanssons plåtåmetod". Beräkningen är redovisad i Bilaga 3.

Slutsatsen är att en 18 cm tjock vägg av konstruktionslättballastbetong uppfyller kraven enligt SBN 34:21-23. Vid beräkningen har betongens densitet har antagits till 1660 kg/m³ och elasticitetsmodul 9,5 Mpa.

5.8 Brandprovning av bjälklagsplatta

Provning av egenskaper vid brandbelastning av konstruktionslättballastbetong med kompakt struktur utfördes på ett normalarmerat betongbjälklag av storleken 6,00 x 2,60 x 0,24 m. 4 m³ betong blandades i en frifallsblandare och göts vid Färdig Betongs fabrik på Ringön i Göteborg. Kompakteringen utfördes med stavvibrator.

Betongens sammansättning var enligt receptet redovisat i avsnitt 5.2. Standardprovningen vid 28 dygn gav densiteten 1660 kg/m³ och tryckhållfastheten 35,2 Mpa, värdena är medelvärde från tre provkuber.

Efter lagring under 3 månader transporterades betongplattan till Statens Provningsanstalt i Borås, f o m 1993-07-01 Sveriges provnings- och forskningsinstitut, där brandprovningen genomfördes. Provningen redovisas detaljerat i en rapport från SP och förekommer i Bilaga 4.

Brandbelastningen var ensidig. Betongplattan belastades under provningen med två linjelaster på vardera 9,2 kN/m placerade i plattans fjärdedelspunkter. Efter 8 minuter började betongen spjälkas från den brandutsatta ytan och efter 23 minuter avbröts provningen.

Trolig orsak till spjälkningen är det höga inre vattenövertrycket som byggs upp i den täta cementpastan jämte tillgång till för mycket fritt vatten. Fuktkvoten bestämdes efter provningen till 6,1 % vilket bör motsvara ca 95 % relativ fuktighet i betongen vid provningen.

6 SLUTSATSER

Av några utvalda typer lättklinkermaterial som vid projektets start fanns på marknaden har framställts sk konstruktionslätballastbetong inom hållfasthetsområdet 20 till 60 Mpa. Målet har varit att närmare utprova lätballastbetong för platsgjutning i hållfasthetsklasserna från K25 till K40 och att bestämma vissa relevanta betongegenskaper med avseende på betongens användning i bärande konstruktioner. Med olika tillsatsmedel med dispergerande effekt och kombinationer av dessa har i allmänhet erhållits lämpliga betongkonsistenser för platsgjutning, dvs sättmått i området 80 - 100 mm.

För att uppnå stabila och homogena betongblandningar och undvika separation av lätballast under transport och vibrering, är betongens sammansättning av stor betydelse. Baserat på allmänna principer för sammansättning av lätballastbetong och på resultat från ett sjuttioal olika betongsammansättningar, har inom projektets ram utarbetats en särskild proportioneringsmetod för lätballastbetong med kompakt struktur med avseende på densitet och tryckhållfasthet.

Varje lättklinkermaterial har ett optimalt tekniskt och ekonomiskt användningsområde vad beträffar målsättningen med betongens densitet och hållfasthet. Om man har som mål att framställa betong med hög hållfasthet och enbart har tillgängligt ett lätballastmaterial med låg densitet och hållfasthet, måste cementbrukets hållfasthet kompensera lätballastpartiklarnas låga hållfasthet. Bruket skall i sådana fall sammansättas så att dess hållfasthet blir hög. Betongen blir troligen inte den billigaste. Det är således viktigt att redan i tidigt stadium välja lämpligt lätballastmaterial med hänsyn till fastställda krav.

För lättklinkermaterial existerar ett visst samband mellan ballastpartiklarnas densitet och hållfasthet. Ju större partikeldensitet desto större är partiklarnas hållfasthet. Sambandet mellan densitet och hållfasthet är bl a grundläggande för proportionering av lätballastbetong.

I vårt land är tillgången på olika typer av lätballastmaterial i praktiken relativt begränsad. Den lätballast som användes industriellt är särskilt anpassad för blocktillverkning. I projektet var denna lätballasttyp det ballastmaterial som hade den minsta densiteten av de provade lättklinkertyperna. Försöken har visat att det är möjligt att med detta lätballastmaterial framställa lätballastbetong med hållfasthetsklass K25 och dessutom med tillfredsställande marginaler. För högre hållfasthetsklasser är det av ekonomiska skäl lämpligt att söka ballastmaterial som har högre densitet och därmed hållfasthet. Liapor från Tyskland är ett lättklinkermaterial som tillverkas i sex densitetsklasser, varav tre, eventuellt fyra av dessa i de högsta densiteterna lämpar sig för framställning av K30 och högre. Lättklinkertyperna norsk Leca, Liapor 8 och Lytag från Storbritannien är anpassade för hållfasthetsklasser som minst motsvarar K40.

Det har visat sig att lätballastbetong har några fördelar framför vanlig betong av samma hållfasthetsklass. Vissa fördelar kan vara av intresse för utnyttjande inom projektets ram, dvs platsgjutning av inomhuskonstruktioner.

Följande fördelar med lättballastbetong kan nämnas:

Lättballastbetongens 1-dygnshållfasthet är mer än dubbelt så stor som för vanlig betong i samma hållfasthetsklass. Formrivningstiderna för framförallt bjälklag kan avsevärt förkortas.

Vattencementtal i lättballastbetong är mindre än i vanlig betong med samma hållfasthet. Det finns således möjligheter att minska risken för byggfuktproblem vid platsgjutning av betong med hållfasthetsklassen K25. Användes svensk Leca kommer vattencementtalet för denna hållfasthetsklass att ligga på ca 0,40. Den nygjutna betongen bör skyddas mot extra vattentillskott åtminstone under det första dygnet efter gjutningen. Vidare bör fuktkvoten hos lättballasten vara ganska låg, exempelvis mindre än 5 %. Konstruktionslösningar med kvar-sittande form är möjliga att tillämpa utan överhängande risk för efterföljande fuktproblem.

Viktsbesparing på omkring 30 procent kan påräknas vid byte av normalbetong mot lättballastbetong.

I lättballastbetong uppträder en del problem som inte förekommer i vanlig betong och som huvudsakligen är förorsakade av lättballastmaterialet. Ett problem är separation av lättballastpartiklar, oftast de största i betongblandningen. Lösningen på detta problem kan vara, dels att sammansätta hela lättballastmaterialet så att storleksfördelningen blir kontinuerlig och följer en typ av Fuller-kurva, dels att undvika alltför lösa konsistenser. Ett annat problem är att betongkonsistensen blir styvare med tiden efter blandningen. Orsaken kan vara såväl avtagande verkan av flytmedlet som insugning av vatten från cementpastan i lättballastpartiklarna. Att återställa konsistensen utan att ändra på övriga betonegenskaper åstadkommes enklast genom att ytterligare tillsätta en mindre mängd flytmedel, förslagsvis en tredjedel av den första tillsatsmängden.

Nötningsmotståndet med avseende på roterande och hasande hjul hos ytor av lättballastbetong är bättre än hos vanlig betong av ungefär samma hållfasthetsklass, nämligen minst K25. Förklaringen till detta bör vara att cementpastans hållfasthet är så mycket större i lättballastbetongen.

Brandprovning av en bjälklagsplatta i lättballastbetong utföll inte lyckosamt. Betongen spjälkades tidigt från den brandutsatta sidan och provningen fick avbrytas i tidigt stadium. Trolig orsak är det inre ångöverttrycket i cementpasta med lågt vattencementtal och för stort vatteninnehåll. Liknande avspjälkning av höghållfast lättballastbetong har enligt uppgift inträffat vid brandprovning på andra håll.

Resultatet av projektet har visat att det är fullt tekniskt möjligt att tillverka lättballastbetong i industriell skala med hållfasthetsklasser från K25 med sk lättballastmaterial. Betongproportioneringen kan därvid genomföras med den metod som utarbetats inom projektet. Metoden är tillämplig för godtyckliga lättballastmaterial och för tryckhållfastheter från K8 upp till K80.

7 LITTERATUR

1. Wilson C. *Concrete ship resists sea water 34 years*, Concrete, vol 62 No 1, p 5-8, 1954
2. *Lettagregatbetong. Egenskaper i fersk tilstand og mekaniske egenskaper*, SINTEF FCB Forskningsinstituttet for Cement og Betong, Rapport STF65 A88011, 1988-02-26.
3. Zhang M. *Microstructure and Properties of High Strength Lightweight Concrete*, The Norwegian Institute of Technology, Division of Building Materials, Trondheim, Norway, Nov. 1989.
4. Spitzner J. *Dauerhafter Leichtbeton*, Leichter Baustoff für den Ingenieurbau, Beton 2/90, pp 45-47.
5. Berntsson L. *Proportionering av lättballastbetong - Sammansättning av tät konstruktionslättballastbetong med beräkningsexempel för praktiskt bruk*, Chalmers tekniska högskola, Institutionen för byggnadsmaterial, P-93:10, Göteborg 1993.



BILAGOR



TABELLER

FÖRSÖKSPROGRAM I

TABELL 1A - I t o m TABELL 8 - I

TABELL 1A - I Svensk Leca

Prov nr	Cement kg/m ³	Slitika kg/m ³	Flygaska kg/m ³	Slagg kg/m ³	Grus kg/m ³	Lättballast Skrymvolym l/m ³ (2-6 mm) (4-10 mm)	Volym lättballast %	Vatten l/m ³	vct/vbt	Tillsatsmedel vikt-% på bindemedel	γ_{ber} kg/m ³	γ_{mask} kg/m ³	Sättnått mm
SL-1	375				825	297	32,0	159	0,42	0,4 P-A40 0,8 S	1597	1568	30
SL-2	367				796	285	31,0	168	0,46	1,0 P-A40	1561	1466	80
SL-3	450				942	354	32,2	174	0,40	1,58 S-FF40	1820	1832	42
SL-4	444				851	299	32,6	182	0,41	"	1728	1724	170
SL-5	400				863	307	32,3	177	0,44	0,5 R-P	1676	1643	30
SL-6	400				864	299	32,6	177	0,44	0,5 R-P	1673	1633	10
SL-7	440	22			823	352	32,1	196	0,45/0,42	1,5 S-FF40	1731	1728	42
SL-8	432	43			800	283	30,7	181	0,42/0,38	1,43 S-FF40	1688	1689	40
SL-9	289		73		829	300	32,8	210	0,73/0,58	0,75 R-P	1653	1644	55
SL-10	268			115	827	292	31,8	195	0,73/0,51	0,5 R-P	1651	1638	65
SL-11	261			107	833	301	32,9	190	0,73/0,52	0,53 R-P	1645	1643	50
SL-12	243			110	848	309	33,5	194	0,80/0,55	0,56 R-P	1649	1632	70
SL-13	192			162	849	300	32,7	200	1,04/0,56	0,55 R-P	1644	1631	150
SL-14	171			141	8560	313	34,0	200	1,17/0,64	0,75 R-P	1633	1645	30
SL-15	123			208	862	313	34,1	189	1,54/0,57	0,75 R-P	1640	1638	40
SL-16	226	23		111	838	303	33,0	209	0,92/0,58	1,0 R-P	1661	1653	45
II:1	415				811	293	31,9	202	0,49	1,2		1688	150
II:2	414				795	320	34,8	171	0,41	1,2		1649	85
II:3	416				843	293	31,9	180	0,43	1,2		1668	90

TABELL 1B - I Svensk Leca

Prov nr	$\gamma_{id} \pm s$ kg/m ³ ±(%)	Vattenlagring + $\Delta\gamma$ %	γ_{id} kg/m ³	γ_{idorr} kg/m ³	γ_{id} kg/m ³	γ_{idorr} kg/m ³	γ_{2sd} kg/m ³	γ_{2sdorr} kg/m ³	f_{id} MPa	f_{id} MPa	f_{2sd} MPa
SL-1			1584	1463	1615	1494	1626	1533	12,1	21,2	24,8
SL-2			1550	1452	1572	1461	1544	1457	12,7	20,8	24,1
SL-3			1871	1739	1868	1750	1862	1757	26,6	35,2	37,2
SL-4			1686	1551	1664	1549	1676	1567	23,6	28,0	32,9
SL-5	1651 (0,3)	0,3	1654	1533	1659	1556	1643	1544	17,2	24,6	26,2
SL-6	1662 (0,4)	0,4	1681	1560	1695	1583	1668	1588	17,0	25,9	28,4
SL-7			1711	1577	1704	1591	1721	1618	24,0	29,9	36,4
SL-8			1695	1562	1691	1581	1687	1583	26,5	31,8	35,9
SL-9	1661 (0,6)	1,1	1662	1529	1661	1514	1626	1513	16,7	21,4	25,6
SL-10	1648 (0,4)	1,6	1652	1499	1679	1535	1628	1494	7,5	17,7	24,7
SL-11	1645 (0,3)	1,6	1646	1492	1667	1489	1639	1520	7,20	20,0	23,5
SL-12	1613 (0,5)	2,0	1606	1451	1644	1472	1610	1477	5,9	17,4	22,0
SL-13	1627 (0,9)	2,7	1641	1475	1667	1536	1640	1501	3,5	9,0	21,6
SL-14	1631 (0,6)	2,6	1644	1534	1627	1513	1608	1489	8,9	14,5	20,8
SL-15	1625 (0,7)	3,4	1636	1535	1609	1490	1599	1498	6,2	14,9	21,9
SL-16	1674 (1,2)	1,4	1660	1538	1652	1537	1675	1558	12,5	20,5	25,0
II:1	1660 (1,0)	0,4	1657	1534	1636	1524	1659	1558	16,7	24,6	26,1
II:2	1661 (1,4)	0,4	1659	1506	1672	1542	1634	1519	15,5	22,7	28,2
II:3	1689 (1,5)	0,5	1690	1560	1704	1582	1686	1578	17,9	26,2	28,1

TABELL 2A - I Liapor 5

Cement kg/m ³	Silika kg/m ³	Flygaska kg/m ³	Slagg kg/m ³	Grus kg/m ³	Lättballast Skrymvolym l/m ³ (1-4 mm) (4-8 mm)	Volym lättballast %	Vatten l/m ³	vet/vbt	Tillsatsmedel vikt- % på bindemedel	γ_{ber} kg/m ³	$\gamma_{fäsk}$ kg/m ³	Sättnått mm
384				838	301	31,9	195	0,51	0,75 R-P	1721	1695	60
388				808	291	30,7	210	0,54	0,5 R-P	1715	1701	70
300	30			862	327	35,9	173	0,58/0,52	1,1 R-P	1702	1679	40
333	33			835	313	33,0	191	0,57/0,52	1,0 R-P	1704	1692	50
337	34			804	289	32,7	215	0,64/0,58	1,0 R-P	1700	1701	60
294		74		843	317	35,1	179	0,61/0,49	0,75 R-P	1720	1706	35
225			93	852	319	35,8	196	0,87/0,62	0,75 R-P	1703	1692	25
241			101	841	316	34,6	199	0,83/0,58	0,75 R-P	1707	1710	45
259			109	826	310	32,7	220	0,85/0,60	0,75 R-P	1740	1714	40
198			164	841	316	33,9	178	0,90/0,49	0,75 R-P	1701	1686	100
125			216	822	329	43,5	196	1,57/0,59	0,75 R-P	1683	1661	60
223	22		110	826	328	34,9	199	0,89/0,56	1,0 R-P	1708	1697	30

TABELL 2B - I Liapor 5

Prov nr	$\gamma_{1d} \pm s$ kg/m ³ ±(%)	Vattenlagring + $\Delta\gamma$ %	γ_{1d} kg/m ³	γ_{1dorr} kg/m ³	γ_{1d} kg/m ³	γ_{7dorr} kg/m ³	γ_{28d} kg/m ³	γ_{28dorr} kg/m ³	f_{1d} MPa	f_{7d} MPa	f_{28d} MPa
L5-1	1710 (0,3)	0,6	1709	1578	1720	1614	1710	1634	19,6	29,5	34,8
L5-2	1716 (0,9)	0,8	1701	1534	1719	1623	1696	1575	14,3	29,7	33,2
L5-3	1690 (0,5)	0,7	1680	1554	1712	1565	1659	1542	14,4	24,1	33,6
L5-4	1699 (0,3)	0,7	1703	1590	1707	1610	1699	1645	18,2	30,2	33,9
L5-5	1705 (0,6)	0,9	1708	1596	1698	1610	1679	1661	13,1	28,1	35,3
L5-6	1725 (0,8)	1,1	1738	1602	1743	1583	1676	1569	11,6	26,2	31,9
L5-7	1714 (0,6)	1,3	1703	1564	1741	1587	1687	1570	6,9	23,4	26,6
L5-8	1703 (0,6)	1,4	1708	1571	1695	1553	1680	1574	7,8	25,4	29,8
L5-9	1759 (0,4)	1,0	1757	1674	1757	1627	1733	1621	13,6	31,8	38,1
L5-10	1714 (0,9)	2,0	1725	1608	1721	1592	1671	1557	5,0	13,3	30,7
L5-11	1704 (1,1)	2,5	1685	1564	1733	1603	1684	1566	2,2	17,9	29,2
L5-12	1722 (0,5)	1,2	1733	1601	1742	1605	1687	1572	8,2	24,0	34,3

TABELL 3A - I Liapor 5 (1-4 mm)/Liapor 6 (4-8 mm)

Prov nr	Cement kg/m ³	Slitika kg/m ³	Flygaska kg/m ³	Slagg kg/m ³	Grus kg/m ³	Lättballast Skrymvolym l/m ³ (2-6 mm) (4-10 mm)	Volym lättballast %	Vatten l/m ³	vet/vbt	Tillsatsmedel vikt-% på bindemedel	γ_{ber} kg/m ³	γ_{finak} kg/m ³	Säftmått mm
L6-1	387				831	312 384	32,8	205	0,53	0,75 R-P	1767	1765	35
L6-2	385				804	299 273	31,5	216	0,56	0,75 R-P	1735	1725	160
L6-3	342	34			845	234 295	34,1	174	0,51/0,46	0,9 R-P	1740	1725	30
L6-4	340	34			809	301 276	31,8	218	0,64/0,58	0,9 R-P	1732	1727	65
L6-5	288		72		823	309 281	32,5	210	0,73/0,58	0,75 R-P	1731	1709	50
L6-6	265			91	829	311 286	32,8	208	0,78/0,58	0,87 R-P	1738	1729	45
L6-7	240			101	839	316 290	33,4	205	0,85/0,60	1,0 R-P	1740	1733	25
L6-8	258			107	824	310 281	34,8	204	0,79/0,56	1,0 R-P	1746	1733	30
L6-9	193			166	839	315 286	33,4	200	1,04/0,56	1,0 R-P	1744	1739	25
L6-10	222	22		109	824	309 281	32,5	206	0,93/0,58	1,0 R-P	1729	1717	45

TABELL 3B - I Liapor 5 (1-4 mm)/Liapor 6 (4-8 mm)

Prov nr	$\gamma_{1d} \pm s$ kg/m ³ ±(%)	Vattenlagring + $\Delta\gamma$ %	γ_{1d} kg/m ³	γ_{1dorr} kg/m ³	γ_{7d} kg/m ³	γ_{7dorr} kg/m ³	γ_{28d} kg/m ³	γ_{28dorr} kg/m ³	f_{1d} MPa	f_{7d} MPa	f_{28d} MPa
L6-1	1771 (0,4)	0,8	1767	1671	1772	1662	1745	1638	21,1	36,7	38,7
L6-2	1744 (0,4)	0,8	1745	1587	1732	1590	1717	1620	18,6	32,8	35,6
L6-3	1748 (0,4)	0,9	1742	1590	1741	1630	1736	1635	18,5	31,6	42,3
L6-4	1735 (0,7)	0,8	1727	1571	1722	1579	1712	1636	20,5	32,4	36,6
L6-5	1746 (0,5)	0,7	1749	1609	1729	1608	1699	1600	14,3	31,2	36,8
L6-6	1744 (0,8)	0,6	1752	1617	1742	1616	1711	1610	12,8	28,9	36,3
L6-7	1746 (0,9)	1,3	1735	1592	1756	1620	1721	1617	8,7	28,0	36,9
L6-8	1757 (0,4)	0,5	1760	1615	1750	1630	1732	1626	11,7	29,3	39,9
L6-9	1749 (0,7)	1,4	1738	1593	1764	1635	1726	1617	5,0	27,0	38,1
L6-10	1741 (0,5)	1,0	1749	1606	1712	1602	1704	1613	10,1	32,4	37,6

TABELL 4A - I Liapor 5 (1-4 mm)/Liapor 8 (4-8 mm)

Prov nr	Cement kg/m ³	Stilka kg/m ³	Flygaska kg/m ³	Slagg kg/m ³	Grus kg/m ³	Lättballast Skrymvolym l/m ³ (2-6 mm) (4-10 mm)	Volym lättballast %	Vatten l/m ³	vct/vbt	Tillsatsmedel vikt- % på bindemedel	γ_{ber} kg/m ³	γ_{fasak} kg/m ³	Sättnått mm
L8-1	445				673	337	35,9	189	0,42	1,0 R-P	1787	1788	80
L8-2	445				647	344	37,9	225	0,51	0,75 R-P	1814	1814	120
L8-3	381	38			648	335	37,4	202	0,53/0,48	1,36 R-P	1750	1719	155
L8-4	406	41			673	337	35,7	206	0,51/0,46	0,91 R-P	1800	1784	110
L8-5	344	34			747	334	35,5	210	0,61/0,56	0,91 R-P	1818	1814	40
L8-6	420	42			666	333	35,2	211	0,50/0,46	1,1 R-P	1800	1854	(180)
L8-7	299		74		703	366	38,7	199	0,67/0,53	0,75 R-P	1793	1779	35
L8-8	305			124	681	354	37,3	204	0,67/0,48	1,0 R-P	1820	1818	80
L8-9	270			111	712	369	39,0	194	0,72/0,51	1,0 R-P	1799	1800	20
L8-10	246			104	718	375	39,6	180	0,73/0,51	1,0 R-P	1782	1779	20

TABELL 4B - I Liapor 5 (1-4 mm)/Liapor 8 (4-8 mm)

Prov nr	$\gamma_{1d} \pm s$ kg/m ³ \pm (%)	Vattenlagring + $\Delta\gamma$ %	γ_{1d} kg/m ³	γ_{1dorr} kg/m ³	γ_{1d} kg/m ³	γ_{1dorr} kg/m ³	γ_{2sd} kg/m ³	γ_{2sdorr} kg/m ³	f_{1d} MPa	f_{1d} MPa	f_{2sd} MPa
L8-1	1799 (0,9)	0,5	1795	1627	1795	1650	1751	1619	19,6	37,3	40,6
L8-2	1816 (0,7)	0,6	1814	1641	1794	1689	1795	1657	19,5	33,5	42,5
L8-3	1751 (0,9)	0,7	1760	1580	1734	1589	1726	1584	15,8	32,4	38,6
L8-4	1789 (0,3)	0,6	1794	1628	1815	1626	1775	1645	19,7	33,8	42,2
L8-5	1823 (0,6)	0,7	1827	1668	1841	1644	1785	1665	20,1	33,6	44,9
L8-6	1791 (0,7)	0,6	1781	1604	1773	1661	1774	1635	14,5	33,2	37,9
L8-7	1794 (0,4)	1,2	1795	1653	1794	1635	1748	1666	13,6	33,6	41,6
L8-8	1820 (0,4)	1,3	1808	1651	1795	1672	1787	1674	8,1	33,8	44,7
L8-9	1791 (0,8)	1,6	1776	1627	1770	1650	1763	1655	6,5	33,3	39,1
L8-10	1783 (0,4)	1,4	1785	1648	1783	1645	1750	1656	8,7	30,8	40,0

TABELL 5A - I Norsk Leca (Hög densitet)

Prov nr	Cement kg/m ³	Slilka kg/m ³	Sand kg/m ³	Grus kg/m ³	Lättballast Skrymvolym l/m ³ (8-12 mm)		Volym lättballast %	Vatten l/m ³	vt/vbt	Tillsatsmedel vikt-% på bindemedel	γ_{ber} kg/m ³	γ_{fask} kg/m ³	Sättnå tt mm
NL-1	358		528		218	299	47,9	192	0,54	0,33 R-P	1732	1752	55
NL-2	402			666		344	39,8	221	0,55		1824	1843	175
NL-3	415		678		324	352	40,0	212	0,51	0,54 R-P	1840	1836	160
NL-4	346		565		230	300	47,0	189	0,55		1743	1767	40
NL-5	410		658		359	308	39,6	226	0,55		1808	1812	135
NL-6	347		601		244	297	46,3	200	0,58		1757	1761	45
NL-7	393	39	56	56	339	360	63,7	183	0,47/0,42	1,0 R-P	1543	1546	5
NL-8	421	42	280	280		345	40,9	216	0,51/0,47	1,0 R-P	1768	1774	160
NL-9	416	42	362	362		305	32,6	211	0,51/0,46	1,0 R-P	1825	1827	175
NL-10	420	42	289	280		357	41,6	207	0,49/0,45	1,0 R-P	1760	1761	110

TABELL 5B - I Norsk Leca

Prov nr	γ_{id} kg/m ³	$\gamma_{id,orr}$ kg/m ³	γ_{7d} kg/m ³	$\gamma_{7d,orr}$ kg/m ³	γ_{28d} kg/m ³	$\gamma_{28d,orr}$ kg/m ³	f_{1d} MPa	f_{7d} MPa	f_{28d} MPa
NL-1	1763	1589	1770	1594	1721	1571	17,7	35,9	41,8
NL-2	1850	1674	1847	1670	1826	1666	16,6	34,4	42,5
NL-3	1877	1703	1856	1677	1863	1693	19,6	40,9	50,2
NL-4	1766	1602	1789	1598	1717	1569	15,3	35,6	38,7
NL-5	1823	1681	1838	1688	1824	1684	22,8	38,5	45,3
NL-6	1754	1593	1774	1613	1789	1640	21,8	37,3	45,5
NL-7	1566	1402	1566	1446	1542	1428	34,4	44,0	47,0
NL-8	1804	1602	1793	1676	1765	1651	28,2	41,9	51,6
NL-9	1857	1623	1858	1705	1821	1680	29,7	46,4	53,6
NL-10	1785	1610	1786	1630	1761	1621	30,6	45,6	48,6

TABELL 6A - I Svensk och norsk Leca

Prov nr	Cement kg/m ³	Silika kg/m ³	Sand kg/m ³	Grus kg/m ³	Lättballast Skrymvolym l/m ³ (2-4 mm) (4-8 mm) (8-12 mm)	Volym lättballast %	Vatten l/m ³	vct/vbt	Tillsatsmedel vikt-% på bindemedel	γ_{ber} kg/m ³	γ_{finak} kg/m ³	Sättmått mm
SB-1	315	15,5	209	209	975 ¹	53,2	189	0,60/0,57	0,46 R-P	1249	1252	
SB-2	445	22,4	280	280	590 ¹	37,6	214	0,48/0,46	0,48 R-P	1463	1464	140
SB-3	420	42	289	280	357 ²	41,6	207	0,49/0,45	1,0 R-P	1760	1761	110
SB-4	394			809	356 ¹	35,5	175	0,44	1,0 R-P	1764	1763	15
SB-5	357			754	404 ¹	37,4	181	0,51	0,68 R-P	1786	1785	30

1) Svensk Leca

2) Norsk Leca

TABELL 6B - I Svensk och norsk Leca

Prov nr	γ_{1d} kg/m ³	γ_{1dorr} kg/m ³	γ_{1d} kg/m ³	γ_{1dorr} kg/m ³	γ_{2sd} kg/m ³	γ_{2sdorr} kg/m ³	f_{1d} MPa	f_{1d} MPa	f_{2sd} MPa
SB-1	1235	1103	1244	1105	1265	1146	10,1	15,3	17,9
SB-2	1516	1374	1489	1332	1472	1336	15,9	20,3	23,9
SB-3	1785	1610	1786	1630	1761	1621	30,6	45,6	48,6
SB-4	1785	1649	1784	1649	1756	1638	24,8	35,5	42,4
SB-5	1713	1566	1689	1546	1666	1549	16,8	28,9	32,8

TABELL 7A - I Lytag 0-4/4-8 mm

Prov nr	Cement kg/m ³	Lättballast (0-4 mm) kg/m ³	Lättballast (4-8 mm) l/m ³	Volym lättballast %	Vatten l/m ³	vct	Tillsatsmedel vikt-% på bindemedel	γ_{ber} kg/m ³	γ_{mek} kg/m ³	Sättnått mm
L-1	338	655	719	36,4	178	0,53	1,0 R-P 0,5 V33	1865	1875	20
L-2	307	870	921	23,6	197	0,64	1,0 R-P 0,5 V33	1791	1787	90
L-3	320	719	780	32,1	202	0,63	1,5 R-P 2,0 V33	1809	1810	75
L-4	323	786	863	31,2	169	0,52	1,5 R-P 3,0 V33	1830	1832	85

TABELL 7B - I Lytag 0-4/4-8 mm

Prov nr	$\gamma_{id} \pm s$ kg/m ³ \pm (%)	Vattenlagring $+\Delta\gamma$ %	γ_{id} kg/m ³	γ_{idorr} kg/m ³	γ_{ra} kg/m ³	γ_{idorr} kg/m ³	γ_{sd} kg/m ³	γ_{sdorr} kg/m ³	f_{id} MPa	f_{rd} MPa	f_{sd} MPa
L-1	1855 (0,3)	0,2	1859	1667	1813	1632	1758	1638	16,4	37,8	50,1
L-2	1794 (0,4)	0,6	1796	1546	1763	1532	1651	1518	6,3	20,0	30,4
L-3	1808 (0,2)	1,5	1807	1572	1780	1625	1691	1588	7,7	25,3	40,2
L-4	1821 (0,4)	1,0	1822	1619	1797	1647	1743	1651	13,2	40,5	59,6

TABELL 8 - I

Prov nr	Cement kg/m ³	Silika kg/m ³	Slagg kg/m ³	Grus kg/m ³	Lättballast* krymvolym l/m ³ (x ₁ -x ₂ , mm)	Volym lättballast %	Vatten l/m ³	vct/vbt	Tillsatsmedel vikt-% på bindemedel	γfärsk kg/m ³	Sättmått mm	γ28d kg/m ³	f _{ssd} MPa
SL-4R	444			832	305	33,2	180	0,41	1,5 S-FF40	1725	40	1705	31,0
SL-5R	400			844	354	32,1	177	0,44	0,5 R-P	1647	30	1720	27,0
SL-7R	440	22		844	354	32,1	190	0,45/0,42	1,5 S-FF40	1735	60	1725	40,7
L5-1R	400			838	301	31,8	200	0,50	0,75 R-P	1670	50	1720	36,3
L5-5R	350	35		804	289	30,5	210	0,60/0,54	1,0 R-P	1724	60	1715	40,7
L5-9R	269		111	826	310	32,6	220	0,85/0,60	0,75 R-P	1752	50	1750	36,1
L6-2R	400			832	294	32,1	200	0,50	0,75 R-P	1770	90	1735	40,0
L6-3R	350	34		845	324	34,0	190	0,54/0,47	0,9 R-P	1780	40	1770	39,6
L8-1R	450			679	340	36,2	200	0,45	0,9 R-P	1815	40	1795	44,5

*För lättballast SL (svensk Leca) betyder fraktionerna (x₁-x₂, mm) och (y₁-y₂, mm) 2-6 mm och 4-10 mm och för lättballast L (Ljapor) 1-4 mm och 4-8 mm.

FÖRSÖKSPROGRAM II

TABELL 1A - II t o m TABELL 2B - II

TABELL 1A - II

Prov nr	Cement kg/m ³	Silika kg/m ³	Grus kg/m ³	Lätballast Skrymvolym, l/m ³ (2-6 mm) (4-10 mm)	Vatten l/m ³	vct/vbt	Tillsatsmedel vikt-% på bindemedel	$\gamma_{fäsk}$ kg/m ³	Sättnått mm
M1	425		850	310	166	0,390	0,75 (M)	1650	30
M1R	"		"	"	170	0,400	"	1650	50
M2	"		"	"	185	0,435	0,375 (M) + 0,375 (RP)	1635	30
M2R	"		"	"	170	0,400	"	1655	30
M3	"		"	"	160	0,375	1,2 (M)	1740	30
M4S	"	21,25 (5% av C)	"	"	168	0,395/0,376	"	1725	40
M5	"		"	77,5 (1/4 av M8)	150	0,350	0,75 (M)	2050	80
M6	"		"	155 (1/2 av M8)	156,5	0,368	"	1905	80
M7	"		"	232 (3/4 av M8)	170	0,402	"	1835	45
M8	"		"	310	168	0,395	1,0 (M)	1660	35
M9	"		"	"	168	0,395	"	1660	35
P10	"		"	"	175	0,412	1,0 (P)	1645	30
P11	"		"	"	172	0,405	1,5 (P)	1725	30
P12	"		"	"	203	0,481	2,0 (P)	1710	70
P13	"		800	340	170	0,399	2,2 (P)	1676	105
P13R	"		"	"	191	0,499	"	1630	10
P14S	"	21,25 (5% av C)	"	"	205	0,483/0,460	"	1640	50

TAEELL 1B - II

Prov nr	γ_{1d} kg/m ³	γ_{1dorr} kg/m ³	γ_{7d} kg/m ³	γ_{7dorr} kg/m ³	γ_{28d} kg/m ³	γ_{28dorr} kg/m ³	f_{1d} MPa	f_{7d} MPa	f_{28d} MPa
M1	1635	1520	1630	1525	1525		23,8	25,5	28,8
M1R	1660		1643		1610		22,1	24,9	27,7
M2	1611	1470	1593	1455	1580	1455	19,4	24,0	26,2
M2R	1648		1632		1605		23,0	24,3	27,4
M3	1750		1725		1720		27,3	30,0	34,6
M4S	1738		1713		1720		28,2	32,0	38,7
M5	2045		2055		2075		33,5	40,0	50,0
M6	1910		1913		1885		29,2	35,3	39,3
M7	1775		1780		1766		24,9	31,2	34,5
M8	1635		1655		1640		25,9	29,6	32,2
M9	1648 (15 s) 1665 (30 s) 1675 (45 s)				1630 1641 1650		25,0 26,4 27,2		30,5 32,8 33,9
P10	1640		1645		1630		22,0	25,3	31,0
P11	1720		1645		1684		24,9	29,1	31,3
P12	1700		1680		1675		19,8	25,6	28,6
P13	1677		1655		1655		22,9	27,6	30,1
P13R	1655		1648		1640		20,7	26,4	31,0
P14S	1660		1655		1625		22,0	29,7	32,6

TABELL 2A - II

Prov nr	Cement kg/m ³	Silika kg/m ³	Grus kg/m ³	Lättballast Skrymvolym l/m ³ (2-6 mm) (4-10 mm)	Vatten l/m ³	vct/vbt	Tillsatsmedel vikt-% på bindemedel	γ_{ber} kg/m ³	γ_{fnak} kg/m ³	Sättnått mm
R1	420		740	350	198	0,460	1,1 HPP + 0,4 P	1646	1603	85
R2S	420	20	740	358	168	0,400/0,383	"	1636	1623	65
R2	425		760	349	169	0,595	"	1636	1659	65
R2S	420	20	760	349	183	0,435/0,415	"	1663	1641	40
R3	425		765	340	184	0,432	"	1667	1652	75
R3S	420	20	808	337	148	0,400/0,385	"	1679	1677	65
R2	425		760	349	164	0,385	1,5 HP	1630	1656	40
R2S	420	20	760	349	162	0,367	"	1643	1678	35

TABELL 2B - II

Prov nr	γ_{fd} kg/m ³	γ_{rd} kg/m ³	γ_{dnor} kg/m ³	γ_{zsd} kg/m ³	f_{fd} MPa	f_{rd} MPa	f_{zsd} MPa
R1	1630	1605		1600	31,3	23,4	27,5
R1S	1643	1638		1625	25,4	28,3	31,0
R2	1685	1688		1670	22,9	31,8	34,0
R2S	1640	1620		1605	20,9	30,3	34,0
R3	1760	1655	1650	1650	22,9	28,0	29,0
R3S	1670	1670		1655	23,8	28,6	33,0
R2	1670	1660		1655	25,9	27,8	32,1
R2S	1675	1677		1655	24,4	30,7	32,8

VÄRMEKONDUKTIVITET

Nr 818

**VÄRMEKONDUKTIVITET FÖR PROVER
AV KONSTRUKTIONSLÄTTBETONG**

av

Jan Isberg

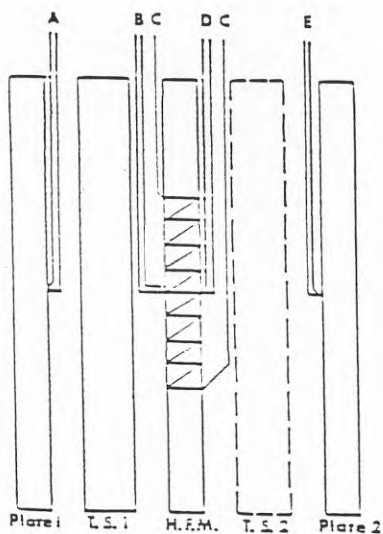
Göteborg, oktober 1992

1 INLEDNING

Föreliggande provning som är utförd på uppdrag av Satish Chandra, avd för Materiallära CTH, avser bestämning av värmekonduktivitet för provplattor av specialbetong. Provningsen är utförd vid Chalmers Tekniska Högskola, avdelningen för Husbyggnadsteknik som står under ledning av professor Lars-Erik Larsson.

2 PROVUTRUSTNING

Bestämningen av värmekonduktiviteten är gjord i en kvadratisk plattapparat med värmeflödesmätaren placerad på den varma sidan av provet. Utrustningens principiella uppbyggnad framgår av FIG 2.1.



- Plate 1 - Controlled temperature plate at T_1 (or T_2)
- T.S. 1 - Test specimen 1
- H.F.M. - Heat flow meter (simplified)
- T.S. 2 - Test specimen 2 or damping layer
- Plate 2 - Controlled temperature plate at T_1 (or T_2)
- A and E - Plate surface thermocouples or transducers
- B and D - Heat meter surface thermocouples
- C - Heat meter thermopile or temperature-difference detector

FIG 2.1 Principskiss av den plattapparat som använts vid mätningarna, ASTM (1980).

Utrustningens varmsida består av 5 mm tjock mässingsplåt med urfrästa spår för motståndstråd. Kallsidan består av en 8 mm tjock aluminiumplatta med kanaler på baksidan. Genom kanalerna pumpas glykolblandat vatten som hålls på en konstant låg nivå med ett konstantbad.

Hela utrustningen omsluts av en låda försedd med ett kontakttermometerstyrt kylaggregat. På detta sätt hålls provets medeltemperatur, normalt 10°C, i luften runt provutrustningen. Temperaturen på ömse sidor om provet kan mätas med 5 st termoelement i försänkningar på varm- resp kallplattan. Termoelementen som är tillverkade av kalibrerad tråd av kopparkonstantan är anslutna till en logger typ Orion, med inbyggt nollställe. Normalt används endast 3 av termoelementen på var sida vid standardmätningar.

Värmeflödet erhålles genom en värmeflödesmätare placerad på den varma sidan om provet. Flödesmätaren är kalibrerad för denna placering mot skivor med känt värmemotstånd.

Utgående från registrerat värmeflöde, uppmätta temperaturer på ömse sidor och provets tjocklek kan, då "stationära" förhållanden uppnåtts, materialets värmekonduktivitet beräknas enligt

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{(\theta_v - \theta_k)} \quad (2.1)$$

där	λ	= värmekonduktivitet	[W/m°C]
	q	= uppmätt värmeflödestäthet	[W/m ²]
	d	= provtjocklek	[m]
	θ_v	= yttemperatur varma sidan	[°C]
	θ_k	= " " kalla " "	[°C]

3 RESULTAT

Erhållna resultat framgår av TAB. 3.1. Bestämningen av värmekonduktiviteterna är gjorda vid medeltemperaturen 10°C och med en temperaturdifferens av ca 15°C.

TABELL 3.1 Uppmätt värmekonduktivitet för prover av konstruktionslättbetong. Angiven densitet avser prover torkade vid 105°C.

Prov	Tjocklek (m)	Densitet (kg/m ³)	Värmekondukt. (W/m°C)
Rescon 2	0.055	1570	0.68
Rescon 2s (1)	0.056	1590	0.63
Rescon 2s (2)	0.055	1580	0.67
Rescon 2s HP	0.056	1600	0.69
Rescon 3 (1)	0.056	1550	0.68
Rescon 3 (2)	0.056	1580	0.68
Rescon 3s (1)	0.057	1550	0.67
Rescon 3s (2)	0.056	1580	0.66
M 8(65) SC	0.058	1570	0.61

Ingen skillnad bör göras mellan uppmätta värmekonduktiviteter för materialen, då registrerade skillnader ligger inom noggrannheten för den använda utrustningen.

AKUSTISKA EGENSKAPER

BERÄKNINGAR REDOVISADE AV SATISH CHANDRA

Ingemansson Platåmethod

In practice there are some simple calculation methods for determining the reduction number. In Sweden method used for this calculation is Ingemansson Platåmethod. It is summarised below:

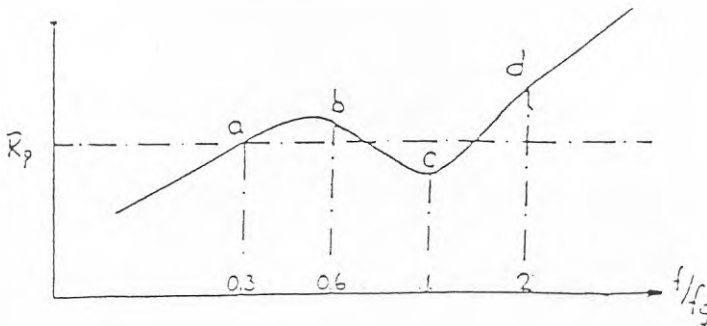


Fig 1; Calculation of reduction number for a single wall according to the Ingemansmethod;

The curve shown in fig.1; is made with the help of following calculations:

- 1) calculate f_g for the wall, where f_g is the critical frequency generally for walls

$$f_g = \frac{1.83 \cdot 10^4 \sqrt{M}}{\sqrt{B}}$$

and for a homogeneous, plan parallel wall

$$f_g = \frac{6 \cdot 10^4 \sqrt{d}}{h \sqrt{E}}$$

where d is the density in kg/m^3 h is the height in meters and E is the modulus in Pa

- 2) calculate plate height R_p for homogeneous according to the following equation;

$$R_p = 30 \log d - 10 \log E + 37.5 \text{ dB}$$
- 3) put point "a" on R_p at $f/f_g = 0.3$ and draw a straight line towards low frequencies with steepness of 6dB/Octave. Frequency scale (x-axis) must be logarithmic.
- 4) put point "b" 3 dB over R_p at $f/f_g = 0.6$
- 5) put point "d" at $25 + 10 \log$ where $= .01$ over R_p at $f/f_g = 2$.
- 6) Draw from d a straight line against the higher frequency with steepness of 9 dB/Octave.
- 7) Connect the points a-d so that to make point c with f_g . Generally c comes approximately 5 dB under R_p when f_g is over some hundreds of H_z . In the case of lower boundary frequencies c shifts up.

According to the Swedish Standard SS-ISO Standard 717/1, weighed reduction number is estimated using a standard method. In this method a reference curve is used. This reference curve is put over the curves made for different thicknesses so that the difference between the two curves is not more than 32 dB. At this point the value of R_p is read at 500 Hz. It is reported at R_w in decibels (dB). The values of R_w thus calculated are compared with the values given in the table 34-21 SBN 34:21-23 and the thickness of the wall is decided which gives required sound insulation properties.

Average value of densities, compressive strengths and E-modulus were calculated and acoustic properties were determined using the method described above.

Table , Average values of concrete properties for acoustic properties calculations

Density k/m^3 , d	Deviation s	Comp. Str. MPa	Deviation s	E-Modulus GPa, E	Deviation ns
1639	20.7 (1.3%)	32.6	1.9 (5.9%)	9.5	0.7 (7.7%)

Values of R_p and f_g for different thicknesses 15 cm, 18 cm and 20 cm were calculated according to the following equations;

$$R_p = 30 \log d - 10 \log E + 37.5 \text{ dB} \quad (1)$$

where d is the density in kg/m^3 and E is the modulus in Pascal.

and

$$f_g = \frac{6.10^4 \sqrt{d}}{h \sqrt{E}} \quad (2)$$

where d is the density in k/m^3 , h is the height in meters and E is the modulus in Pasca.

putting the values in (1);

$$\begin{aligned} R_p &= 30 \log 1639 - 10 \log 9.5 \cdot 10^9 + 37.5 \text{ dB} \\ &= 34.2 \text{ dB} \end{aligned}$$

Putting the values in (2);
for 15 cms. thickness;

$$\begin{aligned} f_g &= 6.10^4 \sqrt{1639/0.15} \cdot \sqrt{9.5 \cdot 10^9} \\ &= 164.4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{for 18 cms. } f_g &= 137 \\ \text{for 20 cms. } f_g &= 123 \end{aligned}$$

Now the values of a and b are calculated for 15, 18 and 20 cms. thicknesses
These values are in Hz.

$$\begin{array}{ll} a \text{ is situated at } f/f_g^e 0.3 & \text{and } b \text{ at } f/f_g 0.6 \\ \text{i.e at } f_g \times 0.3 & \text{i.e } f_g \times 0.6 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} c \text{ is at } f/f_g 1.0 & \text{and } d \text{ is at } f/f_g 2 \\ \text{i.e at } f_g \times 1.0 & \text{i.e at } f_g \times 2 \end{array}$$

for 15 cms.

$$\begin{array}{ll} a1, 164 \times 0.3 = 49.2 & b1, 164 \times 0.6 = 98.4 \\ c1, 164 \times 1.0 = 164 & d1, 164 \times 2.0 = 328.8 \end{array}$$

for 18 cms.

$$\begin{array}{ll} a2, 137 \times 0.3 = 41.1 & b2, 137 \times 0.6 = 82.2 \\ c2, 137 \times 1.0 = 137 & d2, 137 \times 2.0 = 274.06 \end{array}$$

for 20 cms.

$$\begin{array}{ll} a3, 123 \times 0.3 = 36.9 & b3, 123 \times 0.6 = 73.8 \\ c3, 123 \times 1.0 = 123 & d3, 123 \times 2.0 = 246 \end{array}$$

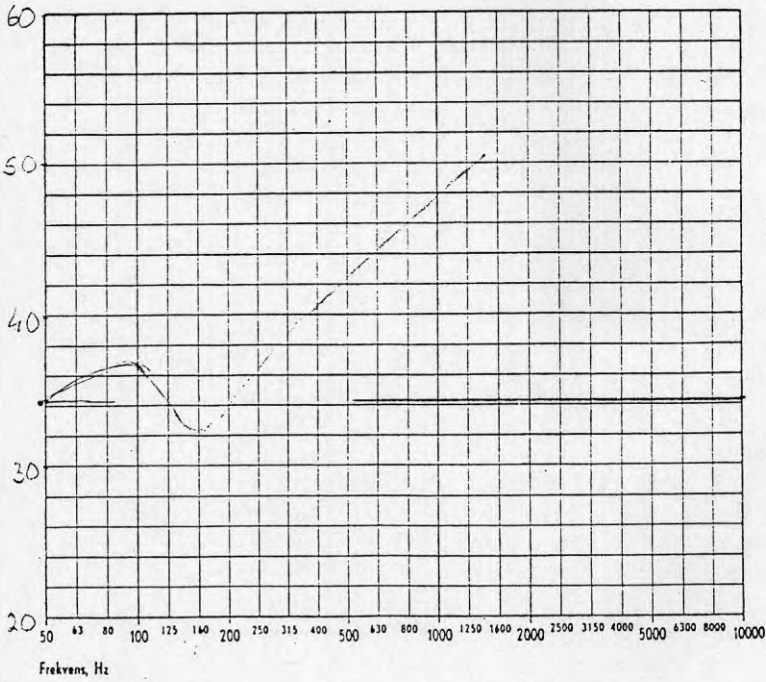


Fig. 2, Graph between R_p in dB and f in Hz for 15 cms thickness.

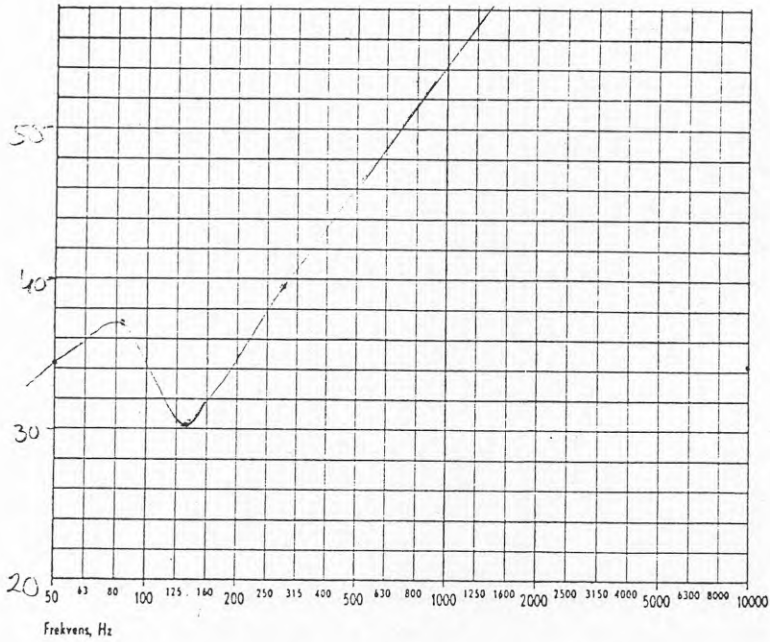


Fig.3; Graph between R_p in dB and f in Hz for 18 cms thickness.

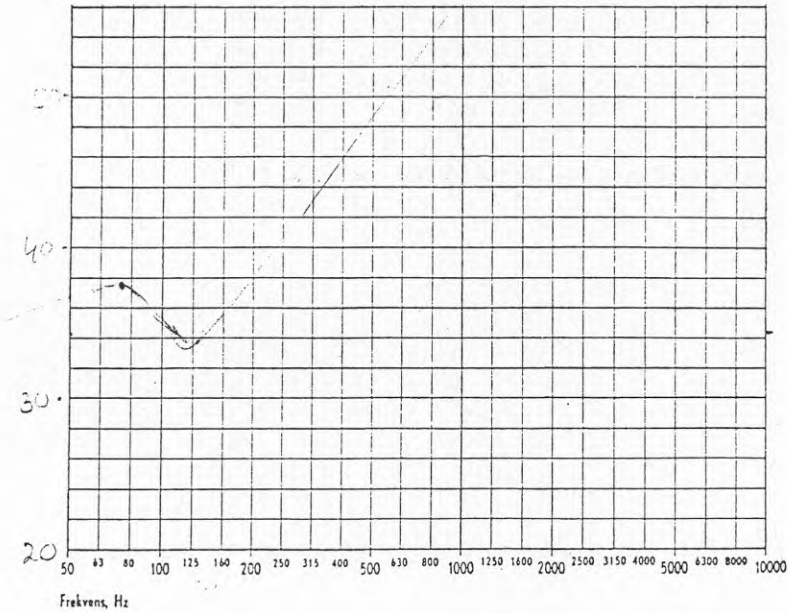


Fig.4; Graph between R_p in dB and f in Hz for 20 cm thickness.

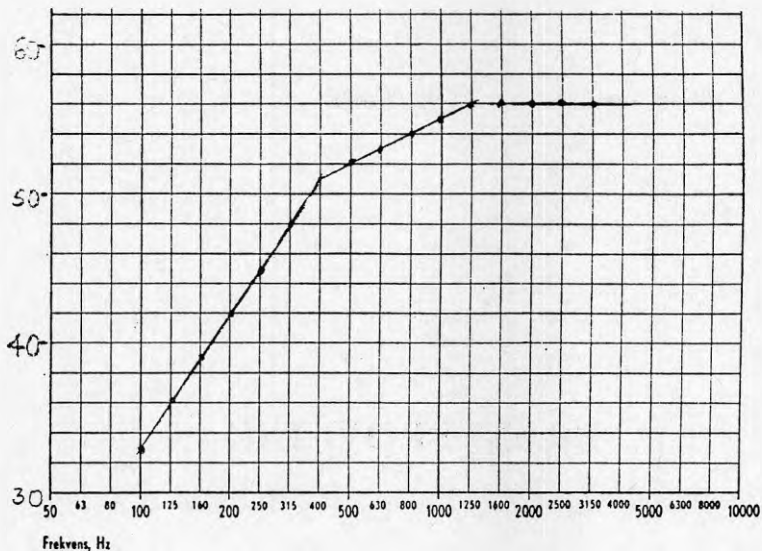


Fig.5; Reference graph according to the Swedish Standard SS-ISO 717/1.

Graphs have been plotted between R_p and $f(\text{Hz})$. It is shown in Fig.2, Fig. 3 and Fig.4. A reference graph is plotted from the standard values. It is shown in Fig.5. It is put over the graphs shown in figures 1-3, so that the difference between the two curves is not more than 32 dB. It should be closer to 32 dB. At this point value of R_p is read at 500 Hz and is reported as the reduction number which is compared with the standard reduction number according to the table 34-21 of SBN 34:21-23.

The values of R_w thus calculated are 48, 50 and 54 dB respectively for 15, 18 and 20 cms thick walls. According to SBN 34:21-23; table 34-21, for living houses, walls, the minimum value of R_w is 52 dB. These values are ± 3 . It seems that for making walls of the structural lightweight aggregate concrete, 18 cms. thickness will be enough from acoustic point of view. These values are approximate calculations. The actual test should be done by testing the walls on place.

BRANDPROVNING



RAPPORT

1 (6)

Brandteknik

1992-11-06

92 R12201

Annika Lundqvist

Chalmers Tekniska Högskola
Avd för byggnadsmaterial
412 96 GÖTEBORG

PROVNINGSRAPPORT

NR 92 R12201

Brandprovning av

belastat betongbjälklag

enligt metod SIS 02 48 20, utgåva 2
(NT FIRE 005, ISO 834)

På uppdrag av

Chalmers Tekniska Högskola

0 Inledning

0.1 Uppdragsgivare

Chalmers Tekniska Högskola
Avdelningen för byggnadsmaterial
412 96 GÖTEBORG

0.2 Produkt

Betongbjälklag

0.2.1 Tillverkare

Färdig Betong AB, Göteborg

0.3 Provningsdatum

1992-10-22

0.4 Provföremålets ankomstdag

1992-08-13

0.5 Gjutdatum

1992-04-16

0.6 Provföremålets uttag

Insänt av tillverkaren

1 Provnings ändamål

Ändamålet med brandprovningen var att undersöka bjälklagets brandtekniska klass vid provning enligt metod SIS 02 48 20, utgåva 2 (NT FIRE 005, ISO 834).

2 Produktbeskrivning

2.1 Konstruktionsbeskrivning

Provföremålet bestod av ett bjälklag av lättballastbetong med nominell densitet 1600 kg/m³. Lättballastmaterialet utgjordes av "Leca" i fraktionerna 2-6 mm och 4-10 mm. Bjälklagets dimension var L x B x H = 6,00 m x 2,60 m x 0,24 m. Bjälklaget var armerat i underkant med armering typ Ks 60 S, diameter 12 mm, enligt skiss i bilaga 1. Täckande betongskikt var 25 mm.

2.2 Montering

Bjälklaget placerades på stålbalkar på horisontalugnen enligt skissen redovisad i bilaga 2.

2.3 Kontroll av provföremål

Innan brandprovningen bestämdes betongens fuktkvot till 5,6 %. Detta materialprov togs från ett hörn på bjälklagets ovsida.

Efter brandprovningen togs ytterligare material ut för kontroll. Resultatet framgår av tabellen nedan.

Prov	Fuktkvot vid 105 °C (vikt-%)	Glödgningsförlust vid 550 °C (vikt-%)
1	6,5	3,7
2	6,1	3,6

Prov 1 togs från bjälklagets ovsida och prov 2 från dess undersida.

I samband med gjutningen tillverkades tre stycken standardkuber. Betongkubernas densitet och hållfasthet undersöktes av Färdig Betong AB, Göteborg. Resultaten framgår av bilaga 1.

3 Provning och resultat

Bjälklaget provades, med brand mot undersidan, enligt metod SIS 02 48 20, utgåva 2 (NT FIRE 005, ISO 834) under ca 23 minuter. Bjälklaget var belastat med två linjelaster enligt punkt 3.3 under brandprovningen.

3.1 Ugnskontroll

3.1.1 Temperaturer

Ugnstemperaturen uppmättes med 10 stycken termoelement placerade ca 100 mm från provföremålets brandutsatta yta.

Ugnen styrdes så att medeltemperaturen av de 10 termoelementen följde standardbrandkurvan.

Uppmätt ugnsmedeltemperatur i förhållande till standardbrandkurvan framgår av tid-temperatur-diagram enligt bilaga 3.

3.1.2 Ugnstryck

Trycket i ugnen relativt ugnshallen uppmättes på nivån ca 100 mm under provföremålets brandutsatta yta.

Uppmätt ugnstryck framgår av tid-tryck-diagram enligt bilaga 4.

3.2 Uppmätta temperaturer på provföremålets icke brandutsatta sida

Temperaturen på provföremålets icke brandutsatta sida uppmättes med fem stycken termoelement. Termoelementens placering framgår av bilaga 5.

Uppmätt temperaturstegring på bjälklagets icke brandutsatta yta var mindre än 1 °C då provningen avslutades efter 23 minuter.

3.3 Belastning

Under provningen belastades bjälklaget med en yttre last på 48 kN, fördelad på två linjelaster på vardera 9,2 kN/m, se bilaga 6. Belastningen påfördes 30 minuter innan brandprovningen startade.

Total last under provningen, inklusive bjälklagets egenvikt, var 7,0 kN/m².

3.4 Uppmätt deformation

Bjälklagets mittnedböjning registrerades under provningen. Uppmätta deformationer framgår av bilaga 7.

3.5 Observationer

3.5.1 Observationer under provningen

Tid min:s	Observationer
0:00	Provningsstartar.
5:50	Enstaka bitar spjälkas bort från bjälklagets undersida.
8:18	Kraftig spjälkning från bjälklagets undersida.
15:00	Spjälkning över så gott som hela bjälklagets brandutsatta yta.
17:20	Armeringsjärnen syns på bjälklagets undersida. Fortfarande kraftig spjälkning.
23:40	Bjälklaget rasar ner i ugnen. Provningsavslutas.

Fotografier tagna under provningen framgår av bilaga 8.

3.5.2 Observationer efter provningen

Efter brandprovningen observerades att betong var bortspjälkat över så gott som hela bjälklagets brandutsatta yta. Tjockleken på det bortspjälkade betongskiktet var upp till ca 10 cm. Stora delar av armeringsjärnen var synliga på provföremålets eldsida. Armeringsjärn hade slitits av vid brottet.


Fotografier tagna efter provningen framgår av bilaga 9.

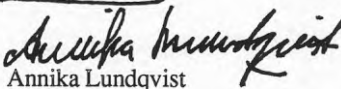
4 Sammanfattning

Ett belastat betongbjälklag, beskrivet i avsnitt 2.1, har brandprovats enligt metod SIS 02 48 20, utgåva 2 (NT FIRE 005, ISO 834) under ca 23 minuter. Belastningen utgjordes av två stycken linjelaster på vardera 9,2 kN/m, placerade i bjälklagets fjärdedelspunkter, enligt skiss redovisad i bilaga 6.

Efter ca 8 minuter startade en kraftig spjälkning av betong från bjälklagets brandutsatta sida. Spjälkningen pågick under resten av provtiden. Efter ca 23 minuter rasade bjälklaget ner i ugnen och provningen avslutades. Under brandprovningen var temperaturstegringen på bjälklagets icke brandutsatta yta mindre än 1 °C.

SP
Brandteknik, Konstruktion


Torbjörn Persson


Annika Lundqvist

Bilagor: 1 - 9

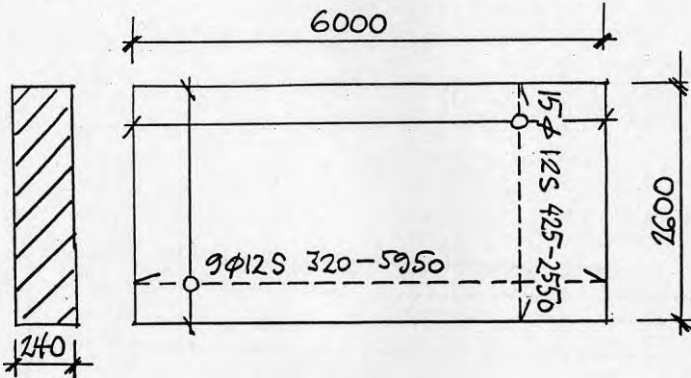
Göteborg den 4 september 1992

Annika Lundkvist
Brandtekniska laboratoriet
Statens Provningsanstalt
Box 857
501 15 Borås

	BILAGA NR:.....
	TILL ÄRENDE
	NR: <u>92 R12201</u>
	SIGN:.....
BRANDTEKNIK	

Angående platta i lättballastbetong för brandprovning

Armeringsritning:



Betong: Lättballastbetong, densitetsklass 1600 kg/m³

Armering: Ks60S
täckande betongskikt 25 mm
toleranser 8 mm, i övrigt enligt BBK 79-8.9, Utgåva 2

Gjutdatum: 16 april 1992

Anm. I samband med gjutningen tillverkades 3 st standardkuber för hållfasthetstest. Provningsresultaten redovisas nedan.

Kub nr	Densitet, kg/m ³	Tryckhållfasthet*, MPa
1	1650	34.7
2	1650	35.3
3	1670	35.6
mv	1660	35.2

* 28-dygnshållfasthet

Hälsningar

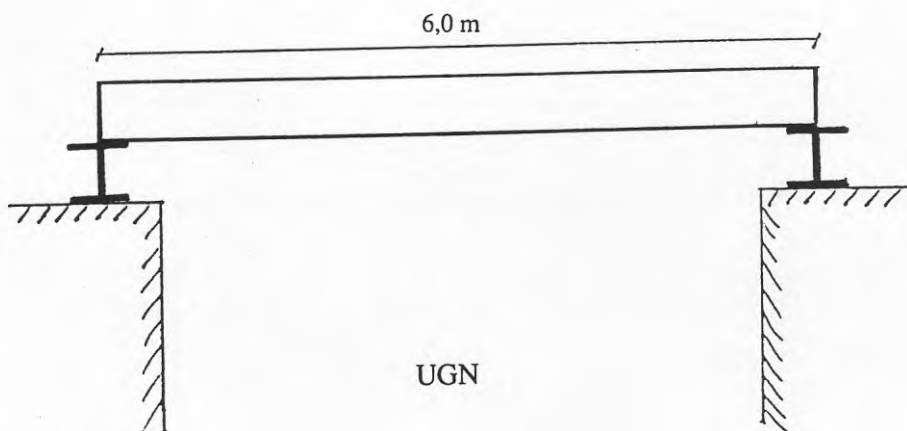
Tomas Kutti

Tomas Kutti, tel.031-51 84 80



BILAGA NR.: 2.....
TILLÄRENDE
NR.: 92 R/2201.....
SIGN.: S.H.....
BRANDTEKNIK

PROVUPPSTÄLLNING

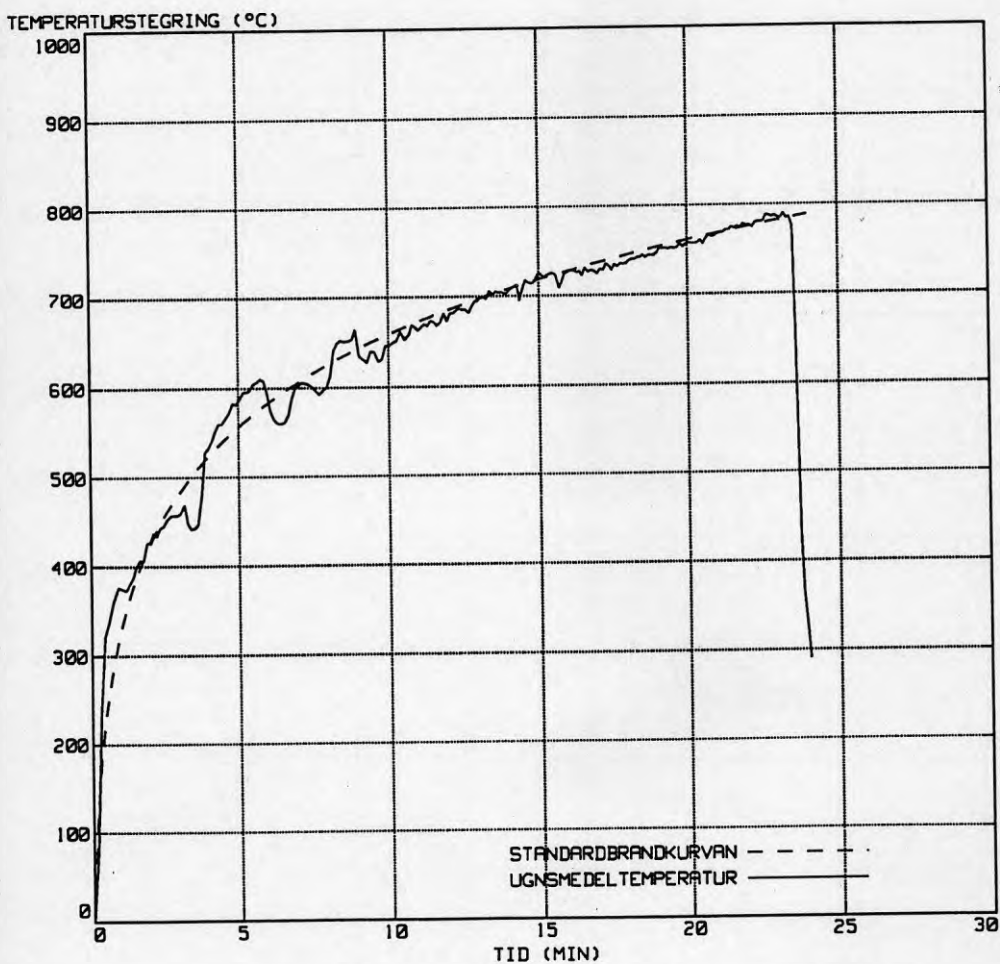




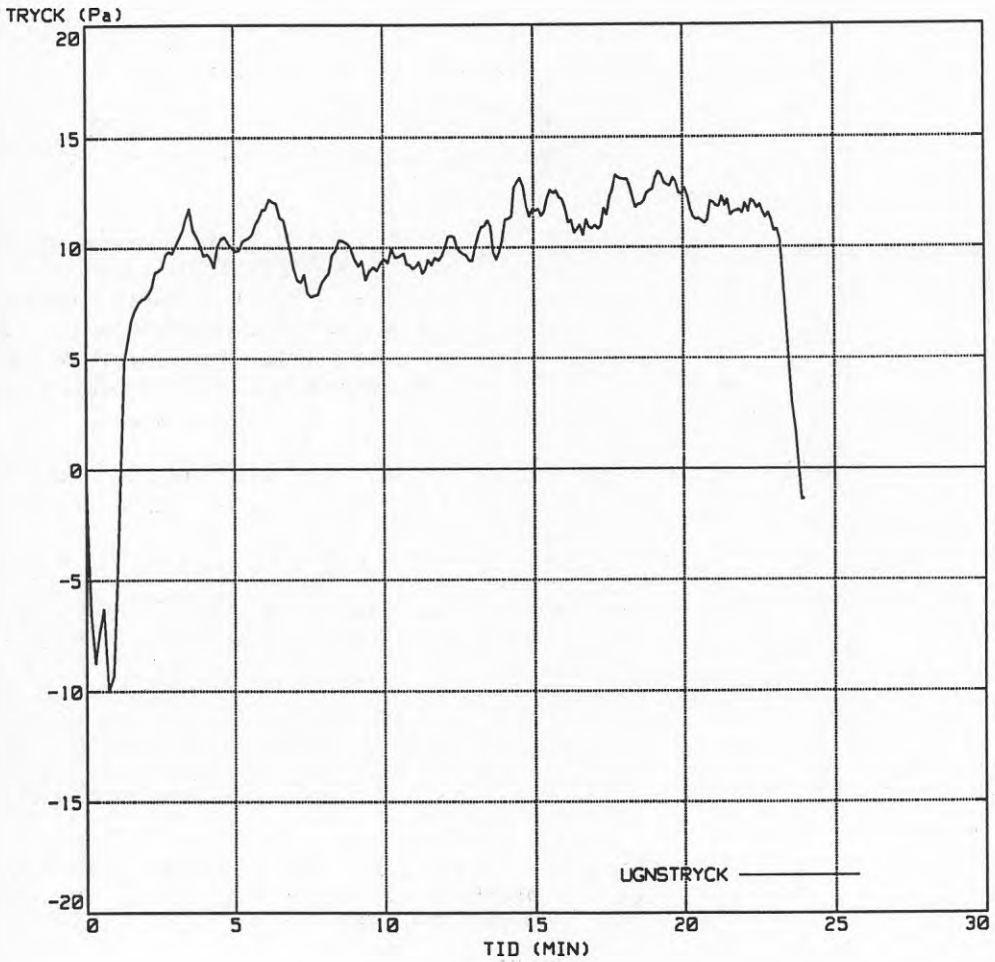
BILAGA NR.: 3.....
TILLÄRENDE
NR.: 92 R/2201.....
SIGN:

BRANDTEKNIK

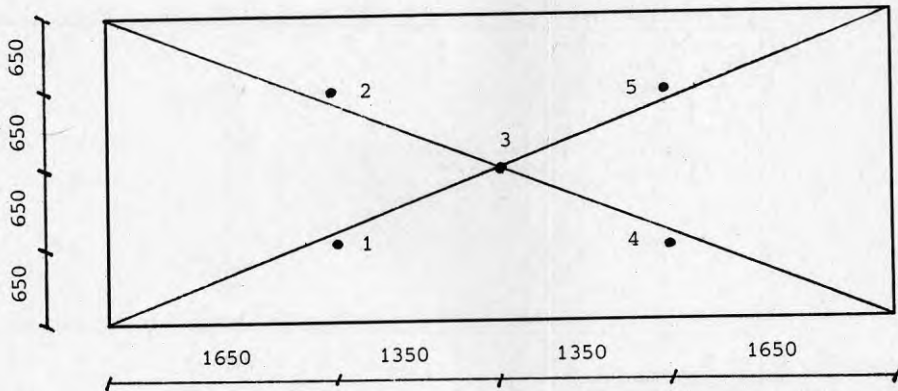
UGNSTEMPERATUR



UGNSTRYCK

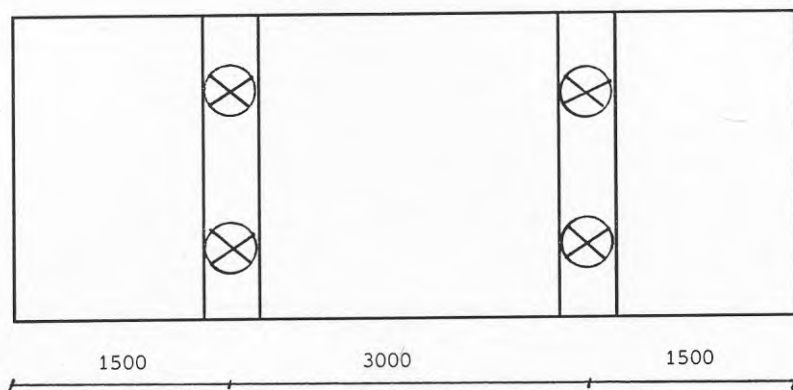


TERMOELEMENTPLACERING



Termoelement nr 1 - 5 på provföremålets icke brandutsatta yta.

BELASTNING



Total belastning 48 kN. Belastningen utgörs av fyra punktlaster som via stålbalkar överförs till två linjelaster på vardera 9,2 kN/m.

UPPMÄTT NEDBÖJNING UNDER PÅLASTNINGEN

Last (kN)	Nedböjning (mm)
0	0
12	1
24	3
36	10
48	19

UPPMÄTT NEDBÖJNING UNDER BRANDPROVNINGEN

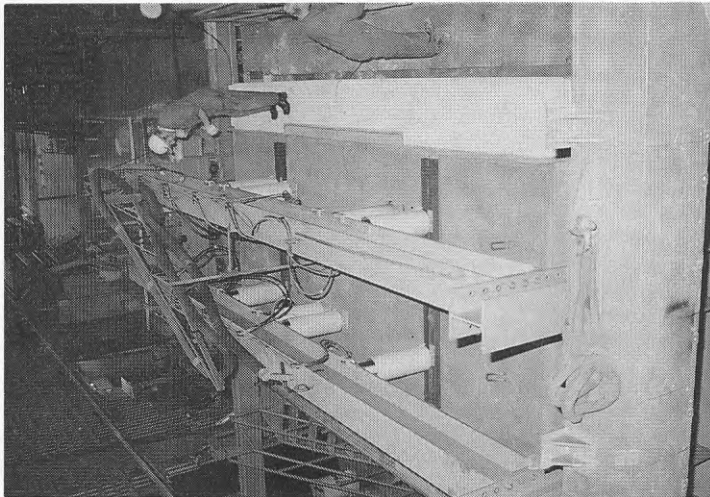
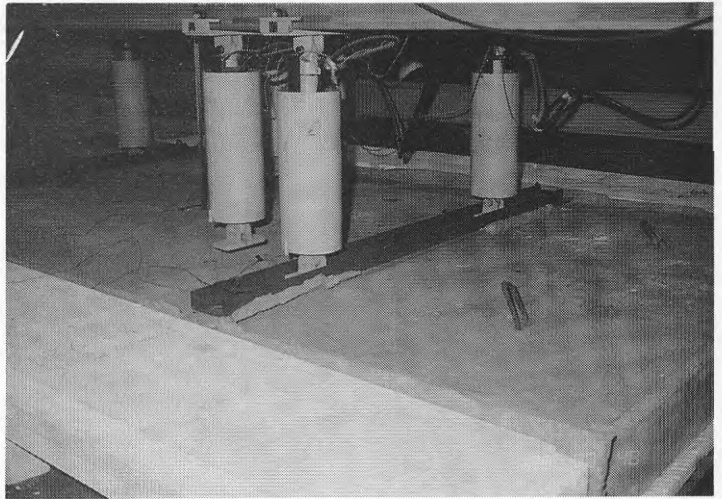
Tid (min)	Nedböjning (mm)
0:00	0
5:00	12
10:00	26
15:00	39
20:00	64

BILAGA 8

**Rapport nr:
92 R12201**

Foto nr: 1

**Provnigen har just
startat.**



**Rapport nr:
92 R12201**

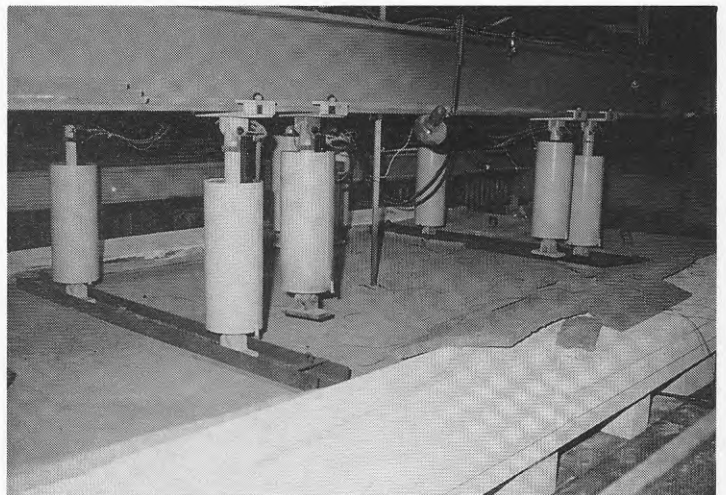
Foto nr: 2

Tid 3:28.

**Rapport nr:
92 R12201**

Foto nr: 3

Tid 19:15.



BILAGA 9

**Rapport nr:
92 R12201**

Foto nr: 1

**Bjälklagets brandut-
satta sida efter prov.**



**Rapport nr:
92 R12201**

Foto nr: 2

**Bjälklagets brandut-
satta sida efter prov.**

**Rapport nr:
92 R12201**

Foto nr: 3

**Bjälklagets brandut-
satta sida efter prov.**



STRUKTURSTUDIER

**SAMBAND MELLAN MIKROSTRUKTUR OCH HÅLLFASTHET HOS
KONSTRUKTIONSLÄTTBALLASTBETONG**



Interdependence of Microstructure and Strength of Structural Lightweight Aggregate Concrete

Shondeep L. Sarkar

Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1

Satish Chandra & Leif Berntsson

Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, S-412 96 Gothenburg, Sweden

Abstract

The demand for lightweight concrete is steadily increasing because of economic and practical considerations. Hence, the inherent internal and external features of lightweight aggregates have been a subject of intense research in recent years. This study provides new insight into the microstructural and chemical factors which influence the strength properties of structural lightweight aggregate concrete. These are described with respect to four expanded clay lightweight aggregates used in nine concrete compositions containing various types and proportions of dispersing agents such as water-reducing admixtures and superplasticizers, with silica fume and ground granulated blast-furnace slag as optional mineral admixtures. The microstructural characteristics of the paste-aggregate interface and the paste porosity of these concretes are discussed. The methods used include scanning electron microscopy-energy-dispersive X-ray analysis, X-ray diffraction analysis, optical microscopy and compressive strength testing.

Keywords: Lightweight aggregate concretes, expanded clay, compressive strength, slag, silica fume, water absorption, microstructure, porosity, paste-aggregate interface.

INTRODUCTION

The demand for lightweight aggregates in concrete is steadily rising, primarily because of economic and practical considerations. Neither

can the enhanced durability factor of lightweight aggregate concrete be overlooked. Its light weight translates into significant reductions in the bulk of foundation and bridge decks, decreases in the dead load and easier handling of precast elements.¹ Thicker cover for reinforced concrete can be placed at an equal weight of ordinary concrete.² Higher thermal efficiency can also be achieved because of its lower density and its cellular structure.

Although several commercial types of lightweight aggregate, ranging from expanded shale to pulverized fuel ash are available, they all share certain characteristics. Porous in nature, the grains are capable of absorbing water, which is then yielded to the surrounding matrix. This facilitates the process of 'inner curing'. According to Swamy and Lambert,³ the porosity of Lytag (pulverized fly ash) lightweight aggregate can vary between 25 and 75%, depending on the raw materials and manufacturing process used.

Over the past few years, the inherent internal and external structure of lightweight aggregate, particularly the microstructure of the paste-aggregate interface, has been the subject of a number of research publications.³⁻⁵ The underlying reason is that these factors are considered to be the most important criteria for the excellent bonding that develops between the paste and aggregate in lightweight aggregate concrete. It is indeed true to state that the chemical and physical properties of aggregates determine to a large extent the ultimate behaviour of the concrete.

The investigation by Holm *et al.*⁶ of several lightweight concretes of mature ages, including

the USS *Selma*, a 7500-ton expanded shale lightweight concrete ship built in 1919, revealed that the long-term durability of this type of concrete can be exceptionally high.

Though the pozzolanic nature of lightweight aggregate is said to contribute towards higher concrete strength, a recent investigation by Zhang and Gjrv⁷ pointed to a negligible level of pozzolanicity. A further study by these workers⁸ demonstrated that lightweight aggregates with dense outer shells behave similarly to natural aggregates. Porous exterior shells promote denser and more homogeneous bonding to cement paste than aggregate particles with smooth shells.

The objective of the present study was to examine some of these effects on the concrete strength properties, using four types of expanded clay lightweight aggregate and various concrete compositions containing a plasticizing admixture and a superplasticizer.

Optical and electron microscopic techniques were mainly used for this investigation. Chemical and mineralogical analyses were also performed. It is obvious that a study of the basic micro-chemical characteristics focusing on both the internal and the external structure of lightweight aggregates provides a better understanding of the behaviour of these aggregates in concrete, especially in the paste-aggregate interfacial region.

MATERIALS

A standard Portland cement of 350 m²/kg Blaine specific surface area, supplied by Cementa AB (Sweden), was used. The slag, obtained from Merox AB (Sweden), had a specific surface area of 500 m²/kg, and the silica fume was from Elkem (Norway). The last has 20% particles of less than 0.05 µm, and 70% of less than 0.10 µm. The

chemical compositions of all the cementitious materials and aggregates are given in Table 1.

The table shows that the silica, iron oxide and alumina contents in the aggregates are much higher than those of the cementitious components, except that the silica fume contains 87% silica. The alkalis, specially potassium oxide, are also distinctly higher in the aggregates, whereas their lime content is significantly lower than in the cement and slag. With the exception of the slag, the magnesium oxide content is lower than 6% in all the components.

Four lightweight aggregates used in the series of experiments included a Swedish Leca, and Liapor 5, 6 and 8 of German origin. Chemical admixtures used consisted of melamine and lignosulphonate types. The cement, sand and the particular aggregate were mixed in designated proportions with various amounts of chemical admixtures in a pan mixer according to ASTM methods. Compositions of the mixes and their slumps are shown in Table 2. Compressive strength at 1, 7 and 28 days, and densities of dried concrete after testing at 28 days are shown in Table 3.

RESULTS AND DISCUSSION

Absorption test

Results of the 24-h absorption test carried out on the aggregates is shown in Table 4. From this table, it is evident that the water absorption under vacuum is nearly the same, 21–22% by weight, for the four aggregates. The difference between water absorption at 24 h and the water absorption under vacuum indicates the fraction of non-interconnected pores. The Swedish Leca is the most impermeable, and Liapor 8 has the highest interconnectivity (97%). Thus, very few pores in Liapor 8 are completely sealed; on the contrary,

Table 1. Chemical analysis (wt%) of the cement, slag, silica fume and lightweight aggregates

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	S	LOI
Cement	19.6	4.14	2.08 ^a	3.09	62.9	0.23	1.15	3.40 ^b	2.36
Slag	37.0	9.0	1.0	12.0	38.0	—	—	0.1	—
Silica fume	86.9	0.2	0.3	0.2	—	0.8	1.5	—	—
Swedish Leca	66.2	16.0	6.4	2.7	1.8	1.8	4.0	0.1	0.1
Liapor 5	57.1	19.4	10.0	2.6	4.6	0.3	3.0	0.6	0.7
Liapor 6	57.1	19.7	10.0	2.6	4.5	0.3	3.0	0.4	0.5
Liapor 8	55.7	19.6	10.0	5.6	4.7	0.3	3.0	1.5	1.8

LOI, Loss on ignition.

^aDetermined as Fe₂O₄.

^bDetermined as SO₃.

Table 2. Composition and slump of lightweight aggregate concretes

No.	Aggregate type	Aggregates, volume (m^3/m^3)		Sand (kg/m^3)	Cement (kg/m^3)	CSF (kg/m^3)	BSF (kg/m^3)	Adm. ^c	W/C (W/B) ^d	Slump (mm)
		A ^a	B ^b							
1	Swedish Leca	0.167	0.167	863	400	—	—	0.20 ^e	0.44	30
2	Swedish Leca	0.163	0.163	851	444	—	—	0.63 ^f	0.44	170
3	Swedish Leca	0.192	0.129	823	444	22	—	0.60 ^f	0.45/0.42	42
4	Liapor 5	0.159	0.159	838	384	—	—	0.30 ^e	0.51	60
5	Liapor 5	0.163	0.163	826	259	—	109	0.30 ^e	0.85/0.60	40
6	Liapor 5	0.153	0.153	804	337	34	—	0.36 ^e	0.64/0.58	60
7	Liapor 6	0.171 ^g	0.170	845	342	34	—	0.36 ^e	0.51/0.46	30
8	Liapor 6	0.158 ^g	0.157	804	385	—	—	0.30 ^e	0.56	160
9	Liapor 8	0.178 ^g	0.178	673	445	—	—	0.40 ^e	0.42	80

^aSize 2–6 mm for Swedish Leca and 1–4 mm for Liapor.

^bSize 4–10 mm for Swedish Leca and 4–8 mm for Liapor.

^cAdm., Chemical admixture calculated on the weight of binder (dry wt%).

^dW/C = water/cement ratio; W/B = water/binder ratio.

^eChemical admixture, lignosulphonate.

^fChemical admixture, melamine type.

^gLiapor 5.

Table 3. Development of compressive strength

No.	Aggregate type	Compressive strength (MPa)			Density ^a (kg/m^3)
		1 day	7 days	28 days	
1	Swedish Leca	17.2	24.6	26.2	1544
2	Swedish Leca	23.6	28.0	32.9	1567
3	Swedish Leca	24.0	29.9	36.4	1619
4	Liapor 5	19.6	29.5	34.8	1634
5	Liapor 5	13.6	31.8	38.1	1714
6	Liapor 5	13.1	28.1	35.1	1661
7	Liapor 6	18.5	31.6	42.3	1635
8	Liapor 6	18.6	32.8	35.6	1620
9	Liapor 8	19.6	37.3	40.6	1619

^aDensity after drying 28-day specimens at 105°C to equilibrium.

they are highly interconnected. The 24-h water absorption value obtained for Lytag by Swamy and Lambert,³ Balendran⁹ and Teychenne¹⁰ ranged from 13 to 14%, implying similar pore characteristics of lightweight aggregates. Zhang

and Gjörv,⁴ who also found open pores in German, Norwegian and UK lightweight aggregates, concluded from porosimetry measurements that over 30% pores are open, and the closed pores represent only 4–7%.

Though Swamy and Lambert³ claimed that the initial rapid absorption of water is followed by a slower prolonged absorption that can extend to several months, the present data indicate that not all lightweight aggregates behave in the same way. It may be possible that prolonged absorption can occur in the Swedish Leca, whereas most of the pores in Liapor 8 are filled within the first 24 h.

Ionic solubility

The solubility of selective ions determined on powder samples immersed in distilled and deionized water for 10 min (Table 5) yielded some major differences. The dissolution of alkali and sulphate ions was lowest in the Swedish Leca. The maximum sulphate dissolution occurred in Liapor

Table 4. Water absorption of lightweight aggregates

Aggregates	Initial moisture (% by wt)	Water absorption (24 h)	Water absorption under vacuum	Interconnectivity ^a (%)	Density of aggregate	
					Surface dried (kg/m^3)	Wet (kg/m^3)
Swedish Leca	0.04	10.2	22.2	46.0	735	836
Liapor 5	0.21	16.1	22.6	71.2	911	1072
Liapor 6	0.08	17.1	21.5	79.5	1155	1326
Liapor 8	0.69	21.0	21.6	97.2	1535	1745

^aInterconnectivity: ratio of water absorption after 24 h and under vacuum. Water absorption is calculated on the percentage of dry mass.

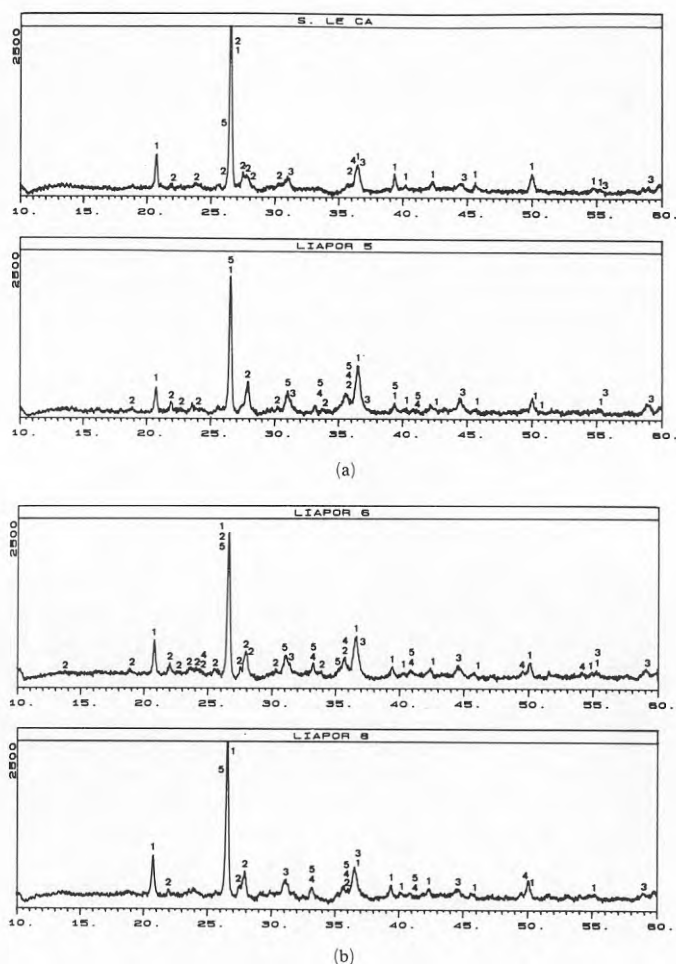


Fig. 1. X-Ray diffraction patterns of (a) Swedish Leca and Liapor 5; (b) Liapor 6 and Liapor 8 aggregates. 1, Quartz (SiO_2); 2, anorthite ($(\text{Ca,Na})(\text{SiAl})_4\text{O}_8$); 3, ringwoodite ($(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$); 4, hematite [Fe_2O_3]; 5, mullite ($\text{Al}_6\text{S}_2\text{O}_{13}$).

or occurs individually, its likely composition being hematite. This confirms the presence of these minerals, which was indicated by XRD. The exact location of quartz could not be precisely determined from X-ray dot mapping. The dark coloration in the external shell may be partly related to optical isotropism as a result of the presence of semi-amorphous and amorphous phases.

Some of the sulphur visible in the X-ray maps of the other concretes could have resulted from the use of plasticizers which are sulphonated compounds relatively rich in sulphur. Similar findings were reported earlier in high-strength concrete containing superplasticizer.¹³ Zhang and GjØrv,⁸

who also reported high sulphur concentration, concluded this to be due to ettringite formation. The aluminium distribution maps, however, failed to demonstrate a preponderance of aluminium, another major component of this mineral, in this zone.

Correlation between microstructure and the strength of concrete

The typical fracture surface in Fig. 4 is representative of Swedish Leca aggregate concrete composition 3, which shows a 10–20- μm smooth, impermeable external shell of the aggregate, in addition to a strong paste-aggregate bond. The

Table 5. Solubility of selective ions (mg/litre) of lightweight aggregates

Aggregates	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	SO ₄ ²⁻
Swedish Leca	3.3	1.7	0.1	0.4	610	10.0	9.0	40.3
Liapor 5	3.4	0.8	0.1	0.3	700	14.5	58.4	385.0
Liapor 6	3.3	0.9	0.1	0.4	660	16.8	54.7	423.6
Liapor 8	4.2	1.0	0.1	0.3	530	9.0	35.8	453.3

8, but not at the expense of alkalis, which were found to be in a less soluble state than in Liapor 5 and 6. This is an important finding, as soluble alkali sulphate affects not only the concrete strength but also the rheology.¹¹ The bulk chemical compositions of these aggregates (Table 1), however, do not reflect on the degree of ionic solubility.

The calcium oxide content of the Swedish Leca is the lowest, whereas its potassium oxide is highest in the series. The only visible distinction apparent in the chemical analysis is the high sulphur content of Liapor 8, which obviously is in the soluble form, as is evident from the solubility test. In comparison with other ions, the rapid release of calcium ions was considerable, ranging from 530 to 700 mg/litre. This is indeed interesting in view of the fact that calcium content in the lightweight aggregates is rather low. Silicon, aluminium, iron and magnesium ionic dissolution were recorded as negligible.

Mineral composition

Mineralogical identification by X-ray diffraction (XRD) (Figs 1(a) and 1(b)) shows that the aggregates are composed of quartz, anorthite, ringwoodite, hematite and mullite. Zhang and Gjrv,⁷ who also investigated the mineralogical composition of Liapor and Norwegian Leca aggregates, found very similar minerals. Although the proportions of these minerals vary from one aggregate to the other, quartz is the principal mineral component. This is in agreement with the results of the chemical analysis. Anorthitic feldspar is the next mineral in order of abundance, and ringwoodite, hematite and mullite are minor mineral constituents. The low quantity of dissolved silicon (Table 5) indicates that most of it is bound in crystalline silica and silicate minerals. The sharp peaks of quartz in all the diffraction patterns indicate that it is in a highly crystalline state, whereas the broad peaks of the other minerals indicate that, although they are not totally amorphous, they are of a much lower degree of crystal-

linity.¹² The high temperature used in the manufacture of lightweight aggregate is said to be responsible for some recrystallization and reduction in glass content.⁴

External features

Optical micrographs of the outer surface of aggregates presented in Figs 2(a)–2(d) show a distinct, thick external shell in the Swedish Leca which also appears to be impermeable. This indicates that the outer shell of the Swedish Leca is partly responsible for its low water absorption in the dry state. It was reddish brown, as observed earlier,³ suggesting iron enrichment. Liapor 8 on the other hand, consists of an indistinct outer shell with a number of jagged features. The impermeable shell of the Swedish Leca acts as a barrier for rapid capillary suction. Thus, only under pressure can water probably enter the interior of these aggregates, whereas the interconnected cellular structure of the external shell of Liapor 8 permits passage of water with relative ease. The external surface of Liapor 8, however, exhibits the most angular features, which can promote the formation of a better bond with the paste.

Elemental distribution

Although Zhang and Gjrv⁸ claimed the presence of a calcium-enriched paste-aggregate interfacial zone in some lightweight aggregate concretes, this zone was indistinguishable from X-ray mapping (Fig. 3). As expected, the aggregates were virtually devoid of calcium, although its concentration was extremely high in the paste region. Apart from cement hydrate components, calcium dissolution from the aggregates may have contributed to its high concentration in the paste region.

Other differences were also noted in the internal structure. For example, the potassium and iron distribution in the Swedish Leca was uniform, whereas potassium formed an external rim in the Liapor 5 aggregate (Fig. 3(b)). Iron in this aggregate, however, was as evenly distributed in the solid spaces as in the Swedish Leca. The Liapor 6 concrete showed an unusually dense concentration of both potassium and sulphur in the paste. Solubility test results (Table 5) confirm a high dissolution rate of these ions from the Liapor 6 aggregate compared with the Swedish Leca.

The partially matching patterns of aluminium and silicon distribution in these aggregates suggest aluminosilicate as one of the mineral components, whereas iron is either located in silicate minerals

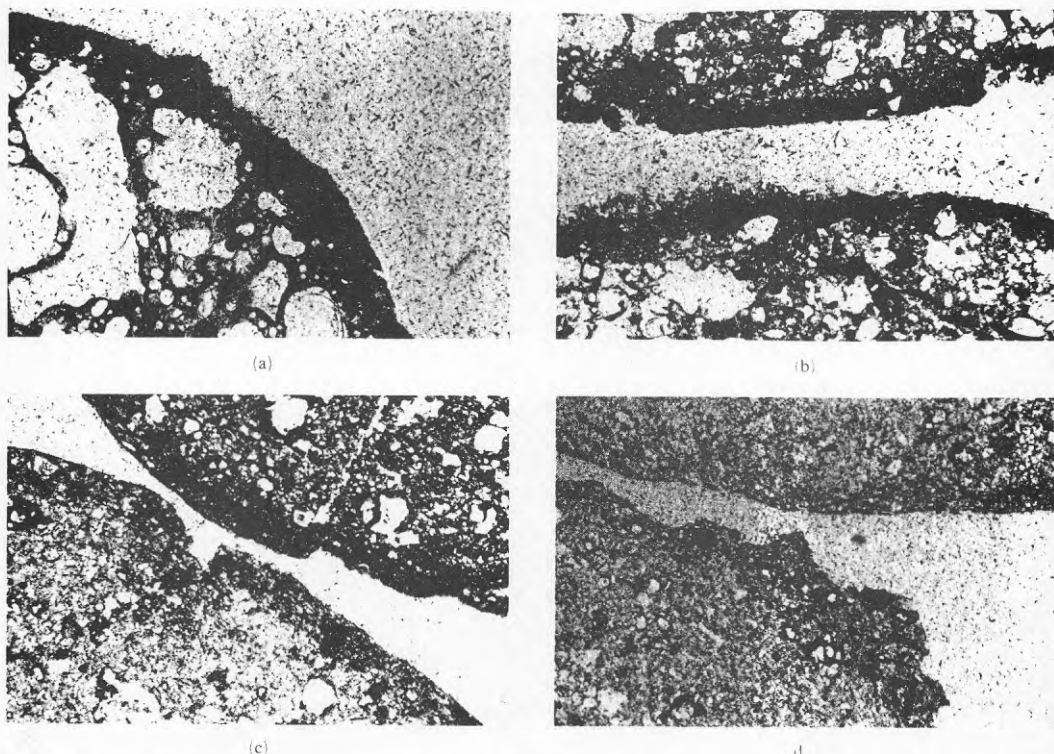


Fig. 2. External surface of lightweight aggregates under transmitted-light polarizing microscope. (a) Swedish Leca; (b) Liapor 5; (c) Liapor 6; (d) Liapor 8.

compactness of the paste is due to the use of 5% silica fume by weight, and low water-binder ratio in the concrete. Silica fume, known for its prompt pozzolanicity and micro-filler action, contributes towards enhancing the early strength. Its activity at late age remains doubtful.¹⁴

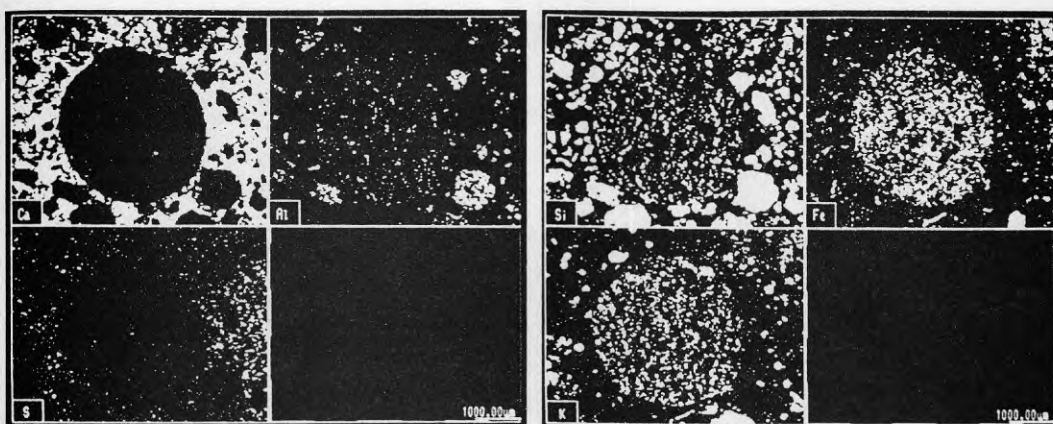
The intimate bond between the paste and aggregate is evident in Fig. 5 (composition 8), in which the Liapor 6 aggregate was used. This confirms the observation of Zhang and Gjrv⁸ that the rough external surface of lightweight aggregate can act as an anchor for the paste. The roughness of the surface can be clearly seen in Fig. 6. The porous nature of the paste is due to the relatively high water-cement ratio of 0.54. This concrete also exhibits the formation of some ettringite needles in the vacant spaces of the paste-aggregate interfacial zone (Fig. 7).

The high interconnectivity and absence of the dense external shell of the Liapor 8 aggregate is evident in Fig. 8. (composition 9). However, the extremely rough surface of this aggregate helps to

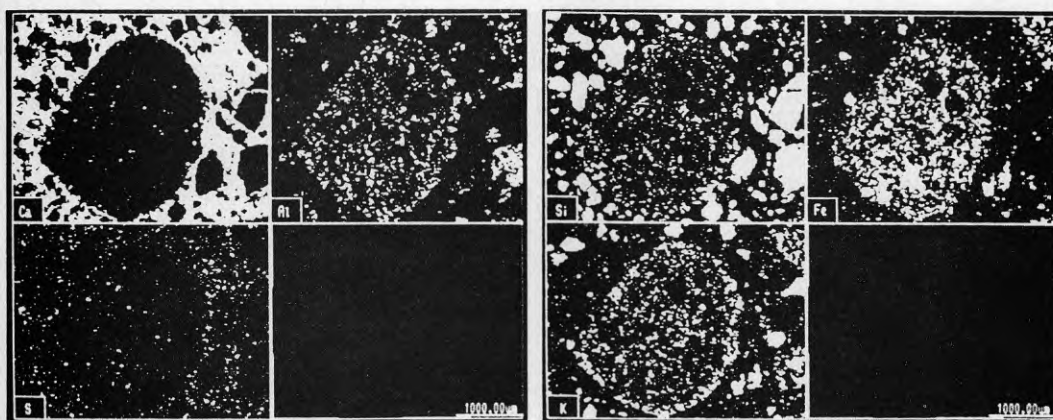
form a much stronger bond, which directly imparts high strength. The paste of this concrete, which has a water-cement ratio 0.42, is not as porous as that of concrete 7.

Strong paste-aggregate bonding was also observed in concrete 6 made with Liapor 5 aggregate (Fig. 9). The paste is dense, as in concrete 2, by virtue of its content of 10% by weight of silica fume. The impermeable shell and rough exterior of Liapor 5 are also distinctly visible in Fig. 9.

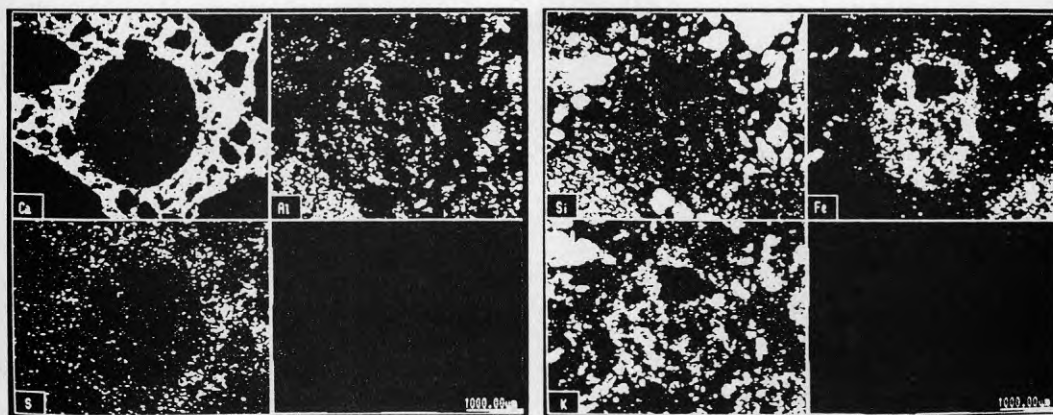
Concretes 6 and 7, made with the same amount of cement and silica fume, show the influence of water-cement ratio or water-binder ratio and particle density of the lightweight aggregate used (see Tables 2 and 3). In principle, the strength of lightweight aggregate concrete is related to the density of concrete. The strength increases when the density increases, assuming that lightweight aggregate and water-cement ratio is unchanged. Concrete 7 has greater strength than concrete 6 despite the higher density of the latter. The



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Elemental X-ray maps of Ca, Al, S, Si, Fe and K. (a) Swedish Leca concrete, composition 3; (b) Liapor 5 concrete, composition 6; (c) Liapor 6 concrete, composition 8. Concrete compositions are shown in Table 2.

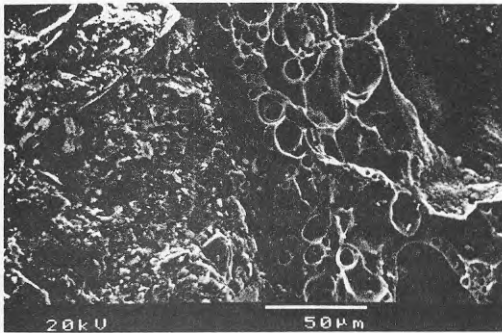


Fig. 4. The paste-aggregate microstructure of Swedish Leca aggregate concrete, composition 2, showing the thick impermeable external surface, dense paste and strong paste-aggregate bond.

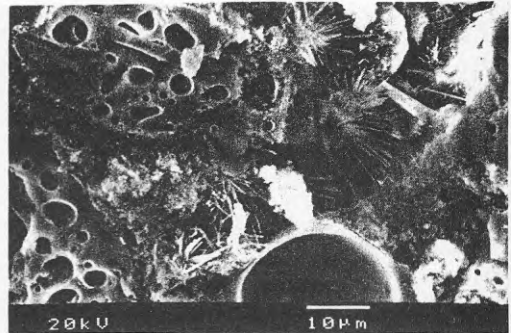


Fig. 7. Ettringite needles formed in the paste-aggregate interfacial zone of concrete with Liapor 8, composition 8.

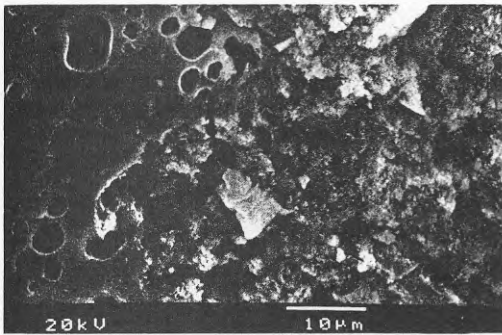


Fig. 5. The strong bonding between the rough external surface of Liapor 6 aggregate and paste, composition 8. The paste is porous.

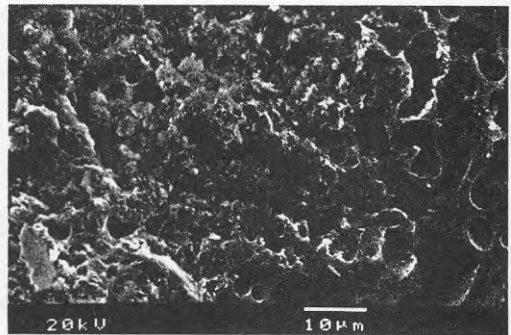


Fig. 8. Interlocking nature of paste-aggregate bonding in Liapor 8 concrete, composition 9.

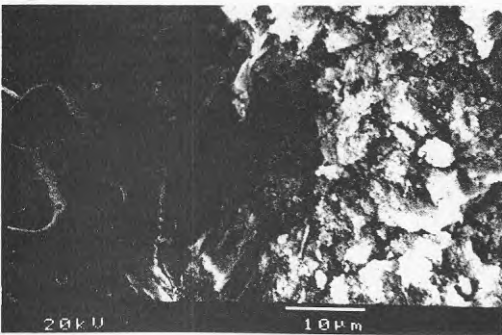


Fig. 6. The rough external surface of Liapor 6, composition 8.

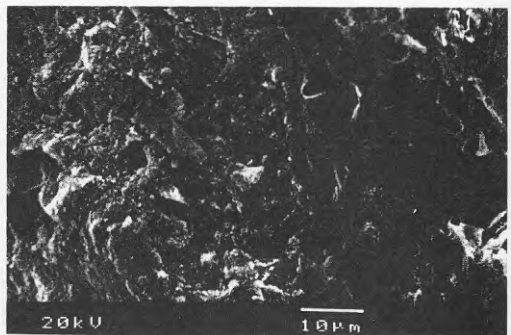


Fig. 9. The paste-aggregate bonding in Liapor 5 concrete, composition 6. The impermeable external shell of this aggregate and the dense paste are also visible.

explanation for this is the lower water-cement ratio in concrete 7, and the higher density of the aggregate. Table 4 shows that the density of Liapor 6 is 244 kg/m³ higher than that of Liapor 5 in concrete 6.

Silica fume appears to have little effect on the early strength of concretes made with aggregates with a rough external surface (Liapor 5 and 6). Some positive influence on the early strength seems to occur in mixes containing the Swedish Leca, which has a smooth surface. It is also likely that the action of silica fume is more effective at lower water-cement ratios.

Concrete 5, which contains nearly 30% by weight replacement of cement by slag together with the Liapor 5 aggregate, develops a low early strength, but its 28-day strength is higher than that of some of the other concretes in this series. This can be explained in terms of the latent hydraulically of slag, which helps to enhance the late-age strength.¹⁵ Concrete 5 also has a high density.

The differences in the strength development pattern of these lightweight aggregate concretes cannot all be explained as a result of microstructure alone. A number of other related factors, such as the batch composition, dosage and type of chemical admixtures, water-cement ratio, porosity, density, etc., also play dominant roles. Careful microstructural examination, however, does reveal the importance of the external and internal structure of lightweight aggregates in the development of paste-aggregate bond, and the effect of water-cement ratio and mineral admixtures on the porosity of the paste.

Oriented calcium hydroxide crystals that are normally present at the paste-aggregate interface in conventional concrete could not be detected in the fracture specimens of the lightweight aggregate concretes. Holm *et al.* also observed the absence of this feature in lightweight aggregate concrete.⁶ This should not be taken as a direct proof of the pozzolanicity of lightweight aggregate.⁷ On the contrary, the prompt release of calcium ions from these aggregates would negate any pozzolanic activity. The water absorption capacity of the lightweight aggregate, which lowers the water content in the paste-aggregate interfacial zone, appears to have a pronounced effect. Fagerlund suggested the influence of a filtration phenomenon.¹⁶ Water from the cement paste enters the aggregate to provide an impermeable membrane, which leads to the improvement in bonding. According to Khokorin,¹⁷ chemical reactions take place in this zone which result in

the formation of new cement hydrates. The rapid dissolution of selective ions indicates that such chemical reactions are possible. Moskvina suggested that chemicals are released when the absorbed water vaporizes.¹⁸

CONCLUSIONS

The present study shows that the expanded clay lightweight aggregates investigated are mineralogically constituted of crystalline silica in the form of quartz, with other silicate minerals having a lower degree of crystallinity.

The rate of dissolution of ions varies from one aggregate to another. Calcium dissolution, which was the highest of all the ion dissolution rates, is relatively constant. Prompt dissolution of alkalis and sulphate occurs in some types of aggregate, e.g. the Liapor series.

The interconnectivity of pores can also vary, with the Swedish Leca having the greatest amount of closed pores. The thickness of the outer shell ranges from negligible to 20 μ m. Characteristics of this shell can also vary: in Liapor 8, it is extremely rough, whereas the Swedish Leca has a much smoother surface.

The microstructure of these concretes reveals that paste-aggregate bonding is dependent on the nature of the external shell of the aggregate. Mechanical interlocking plays an important role in strengthening the interface. Absence of oriented calcium hydroxide crystals at the interface is related to the water absorption factor. Distinct refinement of the interfacial zone can be obtained, provided the other factors are optimized.

There is no direct microstructural evidence of pozzolanic activity of lightweight aggregates, but chemical reactions in the paste-aggregate zone seem to be possible. About 10% by weight of silica fume addition helps to improve the early strength in some cases, whereas positive evidence of the latent hydraulicity of slag was noted in the concrete containing 30% by weight of cement replacement.

ACKNOWLEDGEMENTS

This project was financed by the Swedish Council for Building Research and the Development Fund of the Swedish Construction Industry. S.L.S.

thanks the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

REFERENCES

1. Nesbit, J. K., *Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Concrete Publications, London, 1966.
2. Holm, T. A. & Bremner, T. W., The durability of structural lightweight concrete. *Proc. 2nd ACI/CANMET Int. Conf. on Durability of Concrete*, 1991, ed. V. M. Malhotra. American Concrete Institute, Detroit, Vol. 2, pp. 1119-34.
3. Swamy, R. N. & Lambert, G. H., The microstructure of Lytag aggregate. *Int. J. Cement Composites Lightweight Concrete*, 3(4)(1981) 273-82.
4. Zhang, M. H. & Gjrv, O. E., Characteristics of lightweight aggregates for high strength concrete. *ACI Materials J.*, 88(1991) 150-63.
5. Bremner, T. W., Holm, T. A. & Desouza, H., Aggregate-matrix interaction in concrete subjected to severe exposure. *Proc. FIP-CPCI Int. Symp. on Concrete Sea Structures in Arctic Regions*, Vol. 2, Calgary, August 1984, pp. 82-8.
6. Holm, T. A., Bremner, T. W. & Newman, J., Lightweight aggregate concrete subject to severe weathering. *Concrete Int.*, 6(1984) 49-54.
7. Zhang, M. H. & Gjrv, O. E., Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates. *Cement Concrete Res.*, 20(1990) 884-90.
8. Zhang, M. H. & Gjrv, O. E., Microstructure of interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste. *Cement Concrete Res.*, 20(1990) 610-18.
9. Balendran, R. V., Properties of high strength lightweight concrete. PhD thesis, University of Wales Institute of Science and Technology, Cardiff, UK, 1980.
10. Teychenne, P. C., Lightweight aggregates — their properties and uses in concrete in the UK. *Proc. 1st Int. Congr. on Lightweight Concrete*, Vol. 1. Concrete Society, London, 1968, pp. 23-37.
11. Jawed, I. & Skalny, J., Alkalis in cement: a review. *Cement Concrete Res.*, 7(1977) 719-30.
12. Klug, H. P. & Alexander, L. E., *X-Ray Diffraction Procedures*, 2nd edn. Wiley, New York, 1974.
13. Atcin, P. C., Sarkar, S. L. & Diatta, Y., Microstructural study of different types of very high strength concretes. *Proc. Materials Research Society Symp.*, MRS, Pittsburgh, 1987, Vol. 85, pp. 261-72.
14. Sarkar, S. L. & Atcin, P. C., Dissolution rate of silica fume in very high strength concrete. *Cement Concrete Res.*, 17(1987) 591-602.
15. Sarkar, S. L., Atcin, P. C. & Djellouli, H., Synergistic roles of slag and silica fume in very high strength concrete. *Cement, Concrete Aggregates*, 12(1)(1990) 32-7.
16. Fagerlund, G., Frost resistance of concrete with porous aggregate. Research Report No. Fo.2:78 of the Cement and Concrete Institute, Stockholm, Sweden, 1978.
17. Khokorin, N. K., *The Durability of Lightweight Concrete Structural Members*. Kuibyshev, USSR, 1973.
18. Moskvina, V., *Concrete and Reinforced Concrete, Deterioration and Protection*. Mir, Moscow, 1983.

R13:1994

ISBN 91-540-5634-9

Bygghälsö, Stockholm

Art.nr: 6814013

Abonnemangsgrupp:

Z. Konstruktioner och material

Distribution:

Svensk Byggtjänst

171 88 Solna

Cirkapris: 101 kr inkl moms