

Tekniska Högskolan i Lund

Avdelningen för Bärande Konstruktioner

John Ericssons väg 1 223 63 Lund · Box 118 22100 Lund
telefon: 046/10 70 00 · telex: S-335-33 LUNIVER



LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

DEPARTMENT OF STRUCTURAL ENGINEERING

PO BOX 118 · S-221 00 LUND SWEDEN

TELEPHONE: 46 46 107000

ISLÄNSK BETONG:

**EXPERIMENTAL OCH TEORETISK
UNDERSÖKNING AV
HÅLLFASTHETSEGENSKAPER.**

Examensarbete
Handledare: Lars Sentler

Juni 1988
Jón Guðmundsson

ISLÄNSK BETONG:

EXPERIMENTAL OCH TEORETISK
UNDERSÖKNING AV
HÅLLFASTHETSEGENSKAPER.

Examensarbete
Handledare: Lars Sentler

Juni 1988
Jón Guðmundsson

FÖRORD

Denna rapport behandlar hållfasthetsegenskaper för Isländsk betong. Den är ett exemensarbete och bygger huvudsakligen på experiment utförda vid avdelingen för Bärande Konstruktioner, Tekniska Högskolan i Lund.

Jag vill tacka min handledare Lars Sentler samt Gudbrandur Steinthorsson min kontaktsmann på Island. Dessutom vill jag tacka Björn Karlsson, Haukur Ingason, Bjarni Jensson och Oskar Sigurdsson för deras hjälp under arbetets gång.

Lund juni 1988

Jon Gudmundsson

A handwritten signature in cursive script, reading "Jon Gudmundsson". The signature is written in dark ink and is positioned below the printed name.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SID

| | | |
|---------|---|----|
| | FÖRORD | |
| 1. | INLEDNING | 1 |
| 1.1 | Betong | 1 |
| 1.2 | Isländsk betong i jmf. med annan betong | 2 |
| 1.2.1 | Betongs egenskaper | 2 |
| 1.2.2 | Cement | 2 |
| 1.2.2.1 | Allmänt | 2 |
| 1.2.2.2 | Isländsk cement | 4 |
| 1.2.3 | Ballast | 6 |
| 1.2.3.1 | Allmänt | 6 |
| 1.2.3.2 | Isländskt ballast | 7 |
| 1.3 | Projektets inriktning | 9 |
| 1.3.1 | Standardiserad provning | 9 |
| 1.3.2 | Verklighetsanpassad provning | 9 |
| 2 | BETONGS HÅLLFASTHET | 10 |
| 2.1 | Allmänt | 10 |
| 2.2 | Viscoelstiska egenskaper | 11 |
| 2.2.1 | Storleksberoende egenskaper | 12 |
| 2.2.2 | Tidsberoende egenskaper | 13 |
| 2.2.3 | Inverkan av temperatur och fukt | 15 |
| 2.3 | Viscoelastisk hållfasthet | 15 |
| 3 | PROVNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR | 19 |
| 3.1 | Allmänt om material | 19 |
| 3.2 | Ballast | 19 |
| 3.2.1 | Bergsortanalys | 19 |
| 3.2.2 | Siktogram | 21 |
| 3.3 | Tilverkning av provobjekt | 22 |
| 3.4 | Efterbehandling av provkroppar | 23 |
| 4 | PROVNINGSRESULTAT | 24 |
| 4.1 | Allmänt | 24 |
| 4.2 | Cylinderprovning | 24 |
| 4.2.1 | Provningsmetodik | 24 |
| 4.2.2 | Provningsresultat | 26 |
| 4.2.3 | Sammanfattat resultat av cylinderförsök | 43 |
| 4.3 | Kubprovning-tryck | 45 |
| 4.3.1 | Allmänt | 45 |

| | | |
|---------|---------------------------------------|----|
| 4.4 | Provning böj-drag | 46 |
| 4.4.1 | Material och geometri | 46 |
| 4.4.2 | Mätning, mätutrusning och syfte | 46 |
| 4.4.3 | Resultat | 47 |
| 4.4.3.1 | Resultat av prov med vct.=0.7 | 47 |
| 4.4.4.2 | Resultat av prov med vct.=0.5 | 48 |
| 5 | RESULTATBEHANDLING | 49 |
| 5.1 | Allmänt | 49 |
| 5.2 | Betongs tryckhållfasthet | 50 |
| 5.2.1 | Viscoelastiska egenskaper | 50 |
| 5.2.2 | Normaliserad cylindertryckhållfasthet | 53 |
| 5.2.3 | Normaliserad cubtryckhållfasthet | 54 |
| 5.2.4 | Relationen cylinder - kubhållfasthet | 55 |
| 5.3 | Betongs draghållfasthet | 56 |
| 5.3.1 | Böjdragprovning | 56 |
| 5.4 | Sammanfattning | 57 |

1. Inledning

1.1 Betong

Betong tillhör materialgruppen kompositer, sammansatta material, där olika beståndsdelar blandas så att den resulterande produkten får önskade egenskaper.

De olika komponenterna eller faserna ingår inte i en kemisk förening med varandra utan de kan väl urskiljas var för sig under materiales hela livstid. Gränsen mellan två faser kallas fasgräns. I fallet betong urskiljer man i första hand den kontinuerliga fasen, cementpasta= cement + vatten + ev. luft, och den diskontinuerliga partikelfasen, ballast. Ballasten består av korn med varierande storlek och normalt med ursprung i naturliga bergartsmaterial.

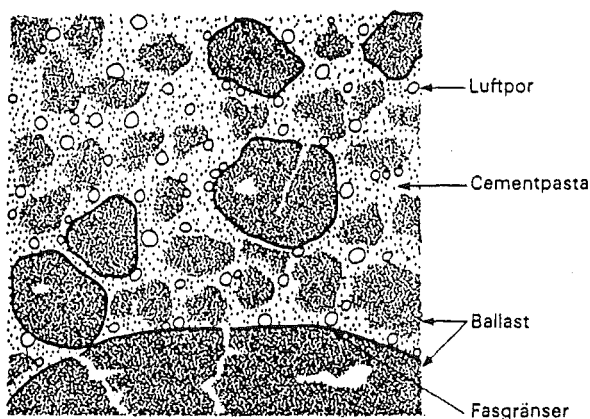


Fig 1.1.1 Schematisk bild av betongens uppbyggnad.

Betongs egenskaper regleras av komponenternas egenskaper, deras inbördes proportioner och egenskaperna hos fasgränsen mellan dem, t ex. vidhäftningen mellan cementpasta och ballast.

I normalt förekommande betong är andelen cementpasta ca. 25-30% räknat på volym och ballasten 70-75%. Härvid har hänsyn inte tagits till volymen luftblåsor, som normalt är 1-3% men som kan ökas med hjälp av särskilda tillsatsmedel med några procentenheter.

1.2 Isländsk betong i jmf. med annan betong.

1.2.1 BETONGS EGENSKAPER

Betongs egenskaper bestäms primärt av de ingående komponenterna och deras blandningsförhållande. I betongstekniska termer uttrycks detta som:

1. Typen av cement.
2. Vattencementtalet (vct).
3. Ballastens egenskaper.

Om isländskt betong på något sätt är annorlunda en annan betong, då kan man konstantera att det måste vara beroande på egenskaperna hos, cementen eller ballasten.

1.2.2 CEMENT

1.2.2.1 Allmänt

Cement är en gammal beteckning för ett flertal olika bindemedel. I de flesta fall avses dock ett hydraulisk bindemedel som efter att ha blandats med vatten hårdnar såväl i luft som under vatten till ett fast, stenmaterial.

Man kan dela upp cement i olika cementtyper med hänsyn till kemisk sammansättning, användningsområden och egenskaper. För konstruktionsbetong (på Island) används främst Portlandcement, namnet kommer från en patentskrift från år 1824 (engelsmannen Aspdin). Där används ordet på grund av produktens likhet med en naturlig stenart från halvön Portland.

De viktigaste kemiska beståndsdelarna i portlandcement är oxider av kalcium (CaO), kisel (SiO₂), järn (Fe₂O₃) och aluminium (Al₂O₃). Råmaterialet för cementtillverkning är därför sådana berg- jordarter som vid upphettning bildar de önskade oxiderna.

Råmaterialen finmals och matas, antingen i form av ett torrt pulver (torrmetoden) eller som ett slam (våtmetoden), in i långa, svagt lutande, roterungnar, figur 1.2.1.

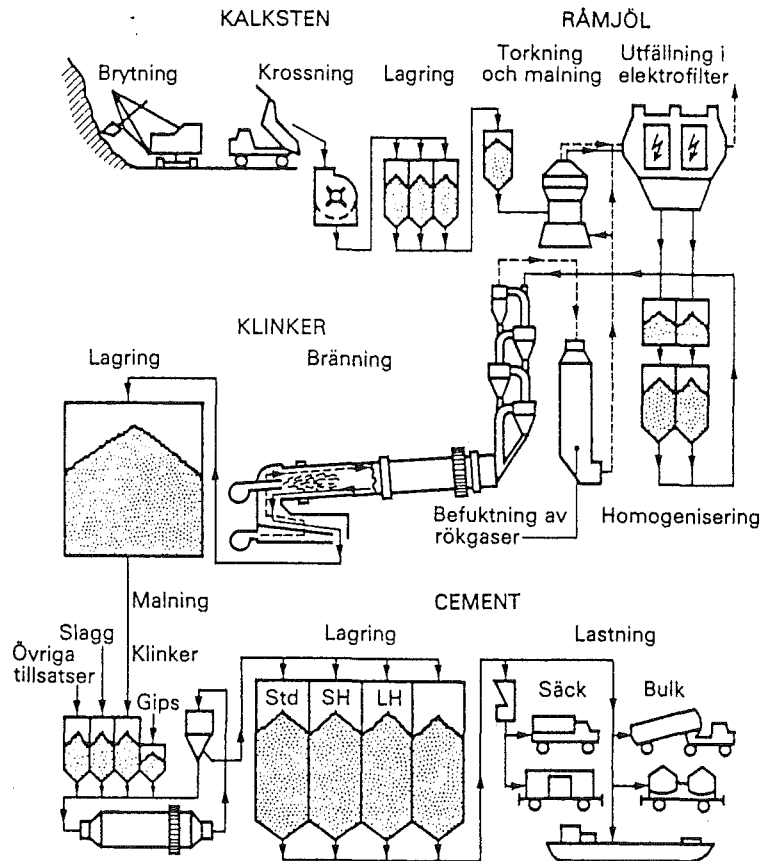


Fig 1.2.1 Cementtillverkning enligt torrmetoden. /1/.

Materialet matas kontinuerligt in i ugnens övre, kalla ända. Som följd av ugnens rotation och lutning förs materialet genom ugnen mot brännzonen. Temperaturen är där ca 1400°C. Materialet tappas sedan ut från ugnen och kyls. Det har nu formen av kulor eller små klumpar, s k cementklinker. Det färdiga cementet erhålls sedan genom att mala cementklinkern med ca 4% gips.

Beroende på hastigheten på hållfasthetsstillväxten indelas Portlandcement i tre klasser, nämligen:

- Snabbt hårdnand (SH)
- Standard (Std)
- Långsamt hårdnande (LH)

I figur 1.2.2 visas hållfasthetsutvecklingen för dessa tre standardiserande typer av (portland-) cement.

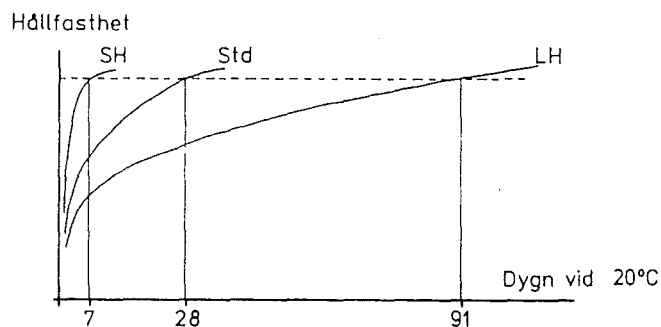


Fig 1.2.2 Hållfasthetsutveckling hos cement /3/.

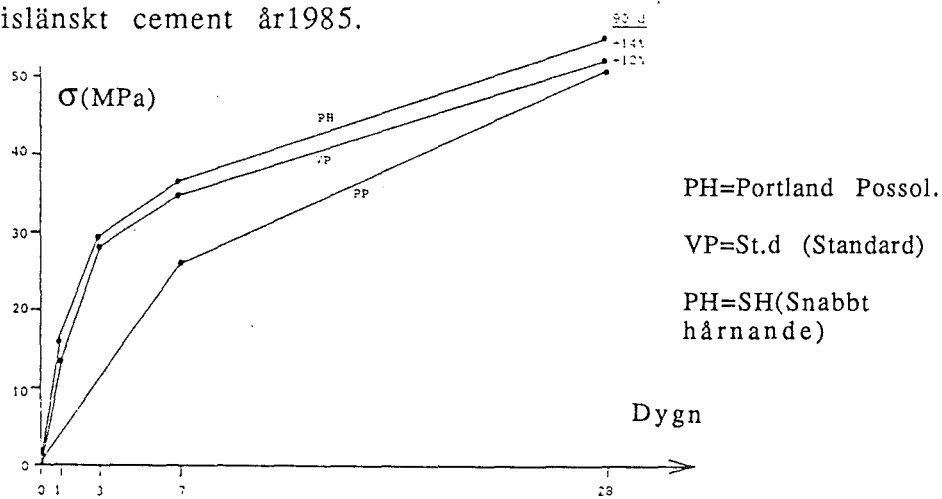
1.2.2.2 Isländsk cement.

Isländskt cement är producerad enligt isländsk standard IST 9.

I /2/ visas resultat från cementkontroll år 1985.

Där visas min. krav enligt IST 9, ASTM C 151 och ASTM C 188 -44, samt uppnått resultat.

Figur 1.2.3 visar diagram från /2/, där medelvärdet av hållfasthetsstillväxten visas som funktion av häringstiden, för isländskt cement år 1985.



Figur 1.2.3 Medelhållfasthet för Isländskt Portlandcement /2/.

Det som är unikt för isländskt cement är att råmateriallet kalk inte finns som naturligt bergmaterial på Island. I stället pumpas skal sand från havsbotten, djup 25-30 m. Skal-sanden som huvudsakligen består av kalk(85-86%) är sedan blandat med liparit, och produktionen sker enligt våtmetoden.

På grund av att en stor del av råmateriallet för cementframställningen kommer från salt hav, samt att del av ballasten som används i island är pumpad från havet, har orsakat stora skador pga. alkalikiselsyrareaktioner har uppkommit./4/

För att minnska dessa skador började man blanda 5% kiselstoft i isländskt cement år 1979. Förutom att kiselstoftet har minskat alkalikiselsyreaktioner, har det ökat hållfastheten och tätheten hos betongen, och samtidigt givit positiv inverkan på beständighet i frostangreppsammanhang mm./4/ Fig 1.2.4 visar ökning av hållfasthet hos betong vid iblandning av kiselstoft.

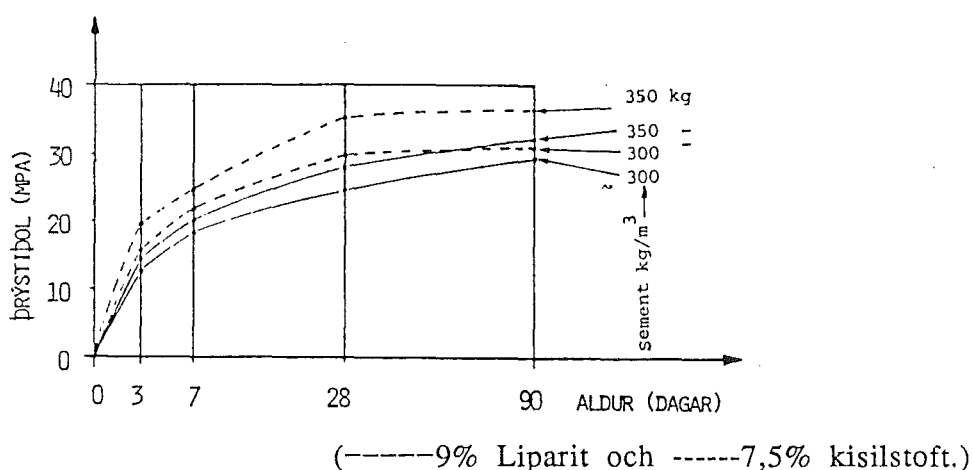


Fig 1.2.4 Hållfasthet av betong med olika cementtyper./4/

Tabellen nedan ger jämförelse mellan huvudkomponenter i Isländsk Portlandcement/2/ och Svensk portlandcement./1/

Tabell 1.2.1 Huvudkomponenter i Isländsk resp. Svensk portland

| | cement. | Sv.-Std. | Isl.-Std. | Isl.-SH. |
|-----------------|--------------------------------|----------|-----------|----------|
| C=kalciumoxid | CaO | 64-67 % | 58.3 % | 57.5 % |
| S=kiseldioxid | SiO ₂ | 20-25 % | 23.8 % | 24.9 % |
| A=aluminiumoxid | Al ₂ O ₃ | 3-7 % | 4.05% | 4.40% |
| F=järnoxid | Fe ₂ O ₃ | 2-4 % | 4.08% | 4.05% |

1.2.3 BALLAST

1.2.3.1 Allmänt

Ballast är en gensam benämning på bergartsmaterial, avsedda för betongtillverkning, och på ersättningsmaterial för dessa.

Beroande på kornstorlekar använder man beteckningarna sand (<4mm), fingrus (<8mm) eller sten (>8mm). Det allra finaste materialet (kornstorlek <0.125mm) kallas filler. Om man vill ange om materialet har framställts genom krossning betecknar man stenen som makadam, i övriga fall som singel (figur 1.2.5).

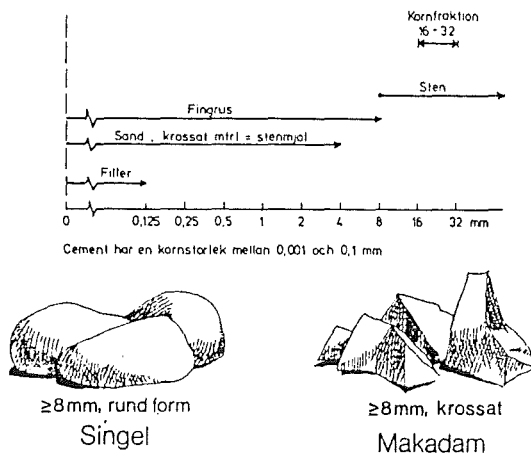


Fig 1.2.5 Ballastbeteckningar/3/.

De ballastegenskaper som framför allt påverkar betongens sammansättning är gradering, ballastorten, fillerhalt, slamhalt, maximal kornstorlek samt kornform och ytbeskaffenhet. Dessa egenskaper är betydelsefulla både för den färska och den hårdnade betongens egenskaper. Vissa variationer i ballastens egenskaper måste av praktiska skäl tolereras, men det är nödvändigt att de begränsas och kontrolleras.

Densitet, porositet och de därtill knutna egenskaperna vattenabsorption och fukthalt är viktiga ballastegenskaper och måste beaktas bl a vid proportioneringen.

Information om ballastens halt av föroreningar i form av humus, beläggningar av lera och dylikt krävs för att avgöra om materialet lämpar sig för betongframställning eller ej.

1.2.3.2 Isländskt ballast

Island ett ungt land geologist sett, jämfört med tex Skandinavien. Basalt är den enda användbara bergsorten för framställning av ballast i Island. I stort sett kan man konstantera att Isländskt Basalt kan jämföras med Basalt(plagioklasrik) och Diabas i tabellen nedan, samt Isländskt Liparit kan jämföras med Trakyt.

Tabell 1.2.2 Exempel på mekaniska egenskaper hos olika ballastsorter/1/.

| Ballast | Böjdraghållfasthet | | Spräckhållfasthet | | Krosshållfasthet | | Dynamisk E-modul | | Motstånd mot avnötning |
|----------------------------|--------------------|--------------|-------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------------|
| | MPa | Rang-ordning | MPa | Rang-ordning | MPa | Rang-ordning | MPa | Rang-ordning | |
| Basalt (plagioklasrik) | 44,7 | 1 | 15,2 | 3 | 307 | 2 | 75100 | 4 | 7 |
| Diorit (hornblände) | 38,5 | 2 | 25,2 | 1 | 366 | 1 | 91600 | 1 | 1 |
| Trakyt (vulkanisk bergart) | 34,8 | 3 | 16,5 | 2 | 285 | 3 | 72500 | 5 | 2 |
| Granit | 28,9 | 4 | 13,0 | 4 | 246 | 5 | 66100 | 8 | 3 |
| Granit (ortoklasrik) | 25,1 | 5 | 11,7 | 5 | 247 | 4 | 70300 | 6 | 4 |
| Sandsten (kvarthaltig) | 17,6 | 6 | 10,8 | 6 | 213 | 6 | 34500 | 9 | 5 |
| Kalksten | 15,6 | 7 | 8,5 | 8 | 184 | 7 | 77900 | 3 | 9 |
| Diabas | 13,6 | 8 | 10,1 | 7 | 179 | 8 | 85500 | 2 | 6 |
| Slagg | 12,5 | 9 | 4,7 | 10 | 89 | 10 | 68300 | 7 | 10 |
| Granit (grovkornig) | 6,2 | 10 | 6,3 | 9 | 158 | 9 | 22800 | 10 | 8 |

Huvudindelning av Isländskt basalt för betongframställning är/5/:

| | | |
|---------------------|---------|---------------|
| Basalt-färskt | -tätt | Rangordning 1 |
| | -poröst | 1 |
| -förvittrad | -tätt | 2 |
| | -porös | 2 |
| -starkt förvittrad- | | 3 |

Rangordning 1 är bäst, 3 är sämst. I gruppen starkt förvittrat sätter man också andra bergarter som är lika olämpliga för betongframställning (fex liparit, pimpsten, lersten och andra lösa sedimentbergarter mm).

Korndensiteten kan ge värdefull information om ballastens kvalitet. Enligt Svenska Statens Vattenfallsverk (1972) anges att om korndensiteten avsevärt understiger 2600 kg/m^3 tyder det på poröst och därmed olämpligt material.

Exempel från Island kommer från grustagen Raudimelur och Björgun/6/, med korndensiteten 2400 resp. 2800 kg/m^3 .

Ballastgraderingen för allmän bruk bör enligt Isländsk praxis ligga mellan gränskurvorna i figur 1.2.6.


Rannsóknastofnun
byggingariðnaðarins
Keldnahöfði — Sími 83200

FYLLIEFNI Í
STEINSTEYPU
Markalínur sáldurferils

Rb/116
Ep 1 (A71)
Rb Eq.002

Febrúar 1979

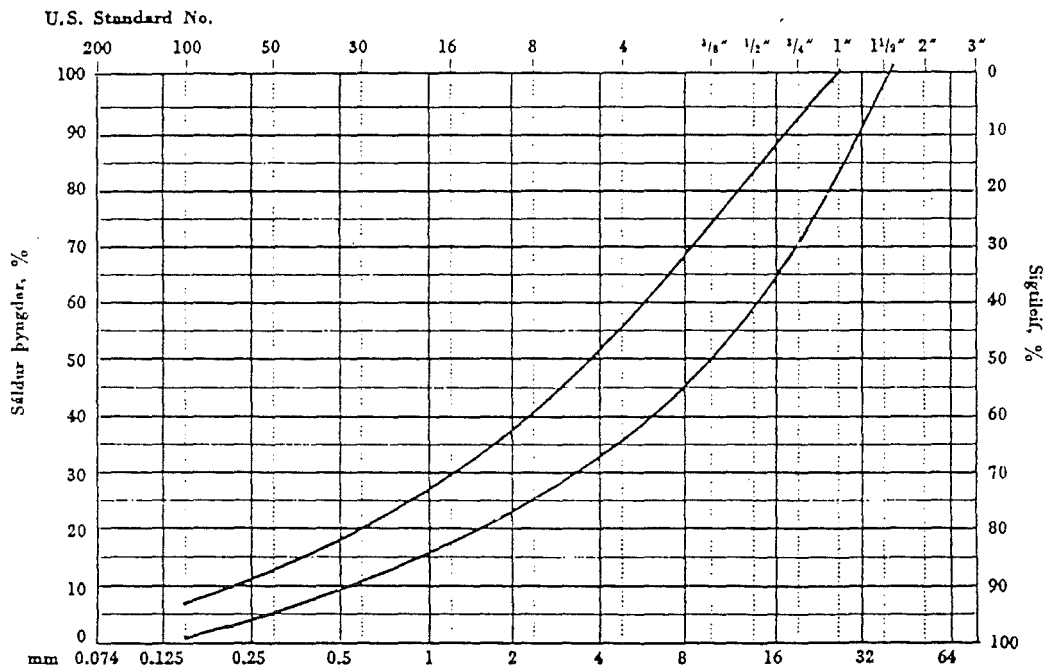


Fig 1.2.6 Gränskurvor för Isländskt ballast /7/.

Isländsk standard nr. 10 (IST 10), samt blad Eq 005 från Statens (Rb) provningsanstalt, ger ytterligare information om krav som ställs för ballast.

1.3 Projektes inriktning

Betongs egenskaper kan variera inom ett vitt område beroende på delmaterialens egenskaper och deras blandningsförhållande. Detta berör både egenskaper som är relaterade till påverkan av laster och miljöfaktorer.

Oftast är betongs egenskaper då det påverkas av laster av störst betydelse även om den senare aspekter har fått allt större betydelse i samband med beständighet och livslängdsfrågor. I detta projekt behandlas enbart påverkan av laster.

1.3.1 STANDARDISERAD PROVNING

Vissa grundläggande egenskaper som betongens elasticitetsmodul, brotthållfasthet i tryck eller drag osv. bestäms genom standardiserade provningsmetoder. Sådana metoder behöver inte nödvändigtvis avspegla hur betong påverkas i verkligheten utan är en normerad provningsmetodik fastställd i internationell ISO standard och nationella normer. Resultat som erhålls på detta sätt kan därför jämföras med varandra.

1.3.2 VERKLIGHETSANPASSAD PROVNING

Betongs egenskaper är inte så väldefinierade som normerade provningsresultat ofta antyder. Förutom den spridning i provningsresultat som normalt förväntas finns ett storleksberoende och ett tidsberoende provningsresultat. Det är därför som standardiserade provningsmetoder är så väldefinierade. Men storleks- och tidsberoendet har stor praktisk betydelse eftersom verkliga konstruktionen påverkas på ett annat sätt än små provobjekt. Det finns därför stor anledning att utvärdera sådana egenskaper också.

2. Betongs hållfasthet

2.1 Allmänt

För alla konstruktionsmaterial gäller att de ska ha vissa hållfasthetsegenskaper som är tillräckligt positiva i förhållande till andra egenskaper som pris, vikt och användbarhet. För betong gäller att tryckhållfastheten kan varieras inom ganska vida gränser. Eftersom priset är relativt lågt och användbarheten stor genom att betong kan gjutas till, stort sett, vilken form som helst så har betong kommit att få en stor användning i byggnadstillämpningar. Det mest negativa med betongen som sådan är den höga densiteten vilket medför att förhållandet mellan hållfasthet/vikt är lägre än för de flesta andra konstruktionsmaterial.

Hållfastheten hos ett material är oftast relaterad till resultat som erhållits vid någon standardiserad provning. För betong innebär detta provning av kuber eller cylindrar vars dimensioner är väl definierade liksom provningshastigheten och den temperatur under vilken provningen ska ske. Hållfasthetsresultat erhållna på detta sätt är viktiga juridiskt sett eftersom detta utgör en verifikation på att vissa specificerade krav från beställaren har uppnåtts.

Men den verkliga hållfastheten i en konstruktion är alltid annorlunda eftersom de förutsättningar som gäller vid standardiserad provning inte är uppfyllda i verkligheten. En verklig konstruktion belastas aldrig till brott. I varje fall är detta inte avsikten. I stället utsätts den för belastningar från egenvikten och andra laster som konstruktionen är dimensionerad för. Detta leder till påkänningar som är konstanta i tiden eller mer eller mindre variabla i tiden. Det intressanta i det här fallet är konstruktionens beteende under den förväntade livslängden, något som traditionella hållfasthetsteorier inte ger svar på. För att utvärdera tidsberoende egenskaper behöver betongs viscoelastiska egenskaper beaktas. Vad detta innebär redovisas kortfattat nedan.

2.2 Viscoelstiska egenskaper

Alla konstruktionsmaterial har viscoelastiska egenskaper /8/. I detta avseende är det alltså ingen skillnad mellan betong och andra konstruktionsmaterial. Skillnaden mellan olika material ligger i hur de är uppbyggda vilket bestämmer hur de beter sig då de utsätts för belastningar.

Ett material kan vara uppbyggt direkt av atomer vilket är fallet för metalliska material. I detta fall då bindningarna inom ett material beror på atomernas attraktionskrafter blir sammanhållningen i materialet mycket god. I andra material som är mer komplicerade till sin struktur och som är uppbyggda av olika molekylgrupper är bindningarna inom ett material svagare. Till skillnad från metalliska material som har ungefär lika stor tryckhållfasthet som draghållfasthet, så har material uppbyggda av molekylgrupper en betydligt reducerad draghållfasthet. Betong, som tillhör den sistnämnda gruppen, har typiskt en draghållfasthet som är betydligt mindre än tryckhållfastheten.

Men det finns också andra egenskaper som skiljer material med atombindningar och svagare van der Waal's bindningar. Vid skjuvning i ett material med atombindningar kan två atomplan glida sinsemellan utan att materialet går sönder. Detta kan till och med förbättra materialets egenskaper. Denna egenskap benämns ofta töjningshårdnande av denna orsak. För material med andra bindningar kan en glidning i materialet enbart ske lokalt eller inte alls. I stället uppstår sprickor i materialet. Sådana sprickor har tendensen att försvaga materialet och detta beteendet kallas därför för töjningsmjuknande. Ett töjningshårdnande eller ett töjningsmjuknande är initiiellt en materialegenskap men belastningssättet är också viktigt. Detta märks inte minst vid variabla laster som medför utmattning där alla material beter sig töjningsmjuknande även om det finns en viss skillnad mellan metalliska material och andra material.

2.2.1 STORLEKSBEROENDE EGENSKAPER

Sedan lång tid tillbaka är det ett välkänt faktum att det finns ett storleksberoende i brottlaster. Detta innebär att ju större volym en provkropp har desto mindre blir brotthållfastheten. Denna egenskap är mest känd genom Weibulls teori för brottlaster. Denna teori säger att medelvärdet för brotthållfastheten kan skrivas:

$$R=R_0(V_0/V)^{1/k} \quad (2.1)$$

där R är maximala brottpåkänningen för volymen V under påkänning i förhållande till någon referensbrottpåkänning R_0 för volymen V_0 . Storleksparametern k är en materialegenskap som varierar inom vida gränser beroende på materialet.

Ett exempel på betongs storleksberoende visas i tab. 2.1 från /1/.

Tabell 2.1 Inverkan av provkroppens storlek på betongens tryckhållfasthet. /1/

| Kubstorlek mm | Relativ hållfasthet % | Cylinderstorlek diameter mm | höjd mm | Relativ hållfasthet % |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------|
| 70 | 106 | 50 | x | 109 |
| 100 | 104 | 75 | x | 106 |
| 150 | 100 | 150 | x | 100 |
| 200 | 95 | 200 | x | 97 |
| 250 | 92 | 300 | x | 91 |
| | | 450 | x | 87 |
| | | 600 | x | 84 |
| | | 900 | x | 82 |

För betong gäller att storleksparametern beror initiiellt på spridningen i hållfastheten och den är i storleksordningen 3-5 för låga hållfastheter och över 10 för höghållfast betong. Medan dessa värden representerar det som kan åstadkommas i ett laboratorium så kan värden för konstruktionsbetong vara kraftigt reducerade på grund av försämrade egenskaper i sådan betong.

En brottlast som beror på volymen under påkänning kommer att påverka töjningskurvans utseende. Detta vis i Fig 2.1 för olika

volymer under påkänning. Detta berör framför allt töjningen vid maximal påkänning, sedan reduceras med ökande volym under påkänning, men hela påkännings - töjningskurvan förändrar utseende.

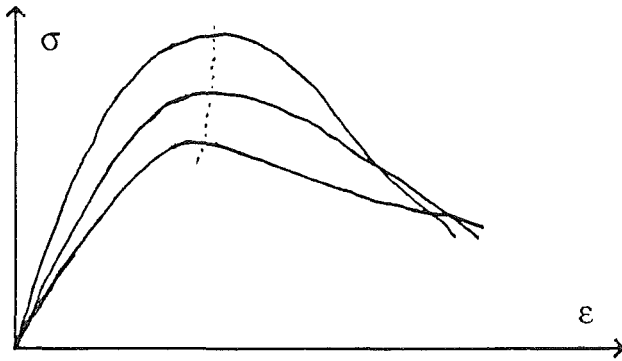


Fig 2.1 Påkännings - töjningskurvor som funktion av volymen under påkänning.

2.2.2 TIDSBEROENDE EGENSKAPER

Ett material som utsätts för en belastning får en direkt initiell deformation. Om belastningen kvarstår kommer denna initiella belastning att följas av en efterföljande deformation. Denna deformations karaktär beror på den initiella belastningen vilket är åskådliggjort i Fig 2.2. För belastningar under en viss påkänningsnivå uppstår enbart primärkrypning, något som kan ses som en fördröjd deformation.

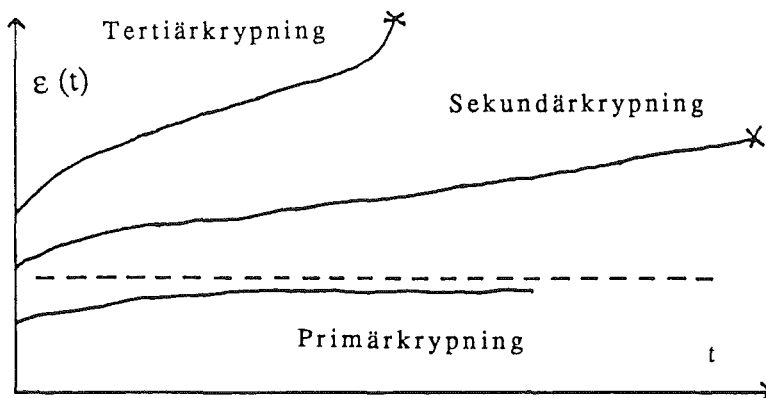


Fig 2.2 Olika former av krypning i ett material som funktion av påkänningsnivån.

Denna krypning avtar i tiden och är normalt inte något problem. För belastningar över en viss påkänningsnivå kommer primärkrypningen att efterföljas av sekundärkrypning. Denna form av krypning, vars kryphastighet är beroende av påkänningsnivån, beskrivs ofta med Nortons kryplag där $\dot{\epsilon}$ är kryphastigheten, σ är påkänningen, och A och n är

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \quad (2.2)$$

konstanter. Om denna sekundärkrypning får hålla på tillräckligt länge uppstår brott. För ett töjningsmjuknande material sker detta då sekundärkrypningens kapaciteten är uttömd medan ett töjningshårdnande material ofta också uppvisar en tertiärkrypning strax innan brottet sker.

Ett exempel på betongs tidsberoende visas i tabell 2.2 från /1/.

Tabell 2.1 Inverkan av lastens varaktighet på betongens hållfasthet. /1/

| Belastningens varaktighet | | | År | Procent av statisk hållfasthet vid standardiserad belastningshastighet |
|---------------------------|----------------|------|----|--|
| Min | Tim | Dygn | | |
| | 2 ¹ | | | 100 |
| | 10 | | | 95 |
| | 30 | | | 92 |
| 60 | 1 | | | 90 |
| | 4 | 0,17 | | 88 |
| | | 100 | | 78 |
| | | 365 | 1 | 77 |
| | | | 3 | 73 |
| | | | 30 | 69 |

¹ Approximativt

De tidsberoende egenskaperna är inte oberoende av storlekseffekten. Tvärtom, den möjliga töjningarna vid krypning till brott är bestämda av den volym som påverkas av en påkänning. Detta resulterar i en hållfasthet som beror både på volymen under påkänning och varaktigheten hos denna påkänning.

2.2.3 INVERKAN AV TEMPERATUR OCH FUKT

Alla material får en reducerad hållfasthet vid ökad temperatur. Detta beror helt enkelt på att rörelsen inne i materialet ökar vilket märks genom att materialet utvidgas. Denna inre rörelse utnyttjar en del av den tillgängliga töjningskapaciteten, vilket vid ökande temperatur reducerar töjningskapaciteten för yttre belastning. Detta gäller för alla material och betong är inget undantag. Men på grund av betongens karaktär där cementpasta och ballast har olika funktion och egenskaper så sker en förändring av betongens egenskaper vid temperaturer över cirka 100 °C vilket påverkar temperaturberoendet och gör det mer komplicerat.

Betong som är ett hygroskopiskt material påverkas också av förändringar i fukthalten. Efter gjutningen har betongen oftast en relativt hög fukthalt för att säkerställa goda förutsättningar för en kontinuerlig hydratation av cementet. Då icke kemiskt bundet vatten diffunderar bort uppstår krympning. Krympning och krypning är ofta svåra att särskilja eftersom de uppstår samtidigt och de överlagras på varandra. Dessutom är både krympning och krypning temperaturberoende vilket försvårar en analys.

2.3 Viscoelastisk hållfasthet

Ett materials hållfasthet bestäms primärt av tillgänglig töjningskapacitet. För ett teoretiskt perfekt material skulle denna töjningskapacitet vara mycket stor och endast bero på de krafter som verkar inne i materialet och som håller det samman. Men på grund av att alla material innehåller felaktigheter så blir töjningskapaciteten kraftigt reducerad. De fel som bestämmer redueringen tenderar att öka i inflytande med ökande volym under påkänning och ökande varaktighet hos påkänningen. Det är detta som gör töjningskapaciteten storleks- och tidsberoende.

Töjningen vid brott, ϵ_u , kan därför formuleras som /8/

$$\epsilon_u = g(\sigma; V, D) \quad \{2.3\}$$

där $g(\cdot)$ är en funktion av påkänningen σ , volymen under

påkänning V och varaktigheten D . Töjning till brott kan ske på två sätt, volymstöjning eller distortionstöjning. Denna första formen avspeglar resultatet av enbart drag eller tryckpåkänningar medan distortionstöjningar uppstår genom skjuvning i materialet.

Detta är samma uppdelning som görs i traditionell hållfasthetsteori /9/. Ekvation 2.3 kan därför delas upp i två delar som avspeglar dessa brottmoderna. Genom att också differentiera med avseende på de oberoende variablerna V och D erhålls en integralyta med följande utseende

$$\epsilon_u = \int_v g_1(\sigma_v; D) dV + \int_D g_2(\sigma_D; V) dt \quad (2.4)$$

där den första delen till höger om likhetstecknet avspeglar volymstöjning och den andra distortionstöjning. På grund av att ett material innehåller fel så bestäms integralytan av den svagaste delen i materialet. Ett sådant beteende beaktas bäst genom den statistiska extremvärdesteorin vilket resulterar i en statistisk fördelning för brottbeteendet, nämligen Weibull fördelningen. Utan att gå in på detaljer, som finns redovisade i /8/ så kan brottbeteendet skrivas som

$$F(s) = 1 - \exp\left\{-V/V_0(D/D_0)^{k/h}((\sigma_v - r_{01})/c_{01})^k - D/D_0(V/V_0)^{h/k}((\sigma_d - r_{02})/c_{02})^h\right\} \quad (2.5)$$

där V är volymen under påkänning i relation till en referensvolym V_0 , D är varaktigheten i förhållande till en referensvaraktighet D_0 , k är en storleksparameter, h är en tidsparameter, r_{01} och r_{02} är tröskelvärden, och c_{01} och c_{02} är konstanter.

I ekv 2.5 avspeglar den första delen volymstöjning och den andra delen distortionstöjning. Vid direkt belastning till brott uppstår primärt ett volymstöjningsbrott medan ett distortionstöjningsbrott avspeglar krypning till brott. Detta framgår också vid en närmre analys av ekv 2.5 där Weibull teorins brottbeteende finns inbakat i den första delen medan den andra delen avspeglar Nortons kryplag.

Genom att ta medelvärdet med avseende på påkänningen i ekv 2.5 erhålls brottbeteendet uttryckt i hållfasthet. I normaliserad form kan denna hållfastheten skrivas:

$$R = R_0 \{ a + b(V_0/V)^{1/k} (D_0/D)^{1/h} \} \quad \{2.6\}$$

där R_0 är en referenshållfasthet som kan relateras till referensvolymen V_0 och referensvaraktigheten D_0 . Värdena på de två konstanterna a och b beror på brottypen.

För ett volymtöjningsbrott är $a = 0$ och $b = 1$.

För ett distortionstöjningsbrott har konstanten a ett värde som avspeglar den påkänningsnivå över vilken sekundärkrypning sker vilket innebär att värdet på konstanten b reduceras i motsvarande grad. Detta innebär att brottbeskrivningen skiljer sig åt vid korttidsbelastning och långtidsbelastning.

Variansen av ekv 2.5 kan bestämmas på ett liknande sätt som medelvärdet. Genom att dividera standardavvikelsen med medelvärdet erhålls variationskoefficienten, COV, som kan skrivas:

$$\text{COV} = \frac{b(V_0/V)^{1/k} (D_0/D)^{1/h}}{a + b(V_0/V)^{1/k} (D_0/D)^{1/h}} G(k,h) \quad \{2.7\}$$

där $G(k,h)$ är en funktion som innehåller gamma funktioner. Ofta kan en serieutveckling av $G(\cdot)$ skrivas som:

$$G(\alpha) = \pi/(\alpha\sqrt{6}) \quad \{2.8\}$$

vilket innebär att ekv 2.7 och 2.8 möjliggör att storleks- eller tidsparametern kan bestämmas också genom spridningen i försöksresultat.

Spridningen som beskrivs i ekv 2.7 kommer att minska för ökande volym och varaktighet och omvänt för det motsatta. Av speciellt intresse är att variationskoefficienten är oberoende av volymen under påkänning och varaktigheten för volymstöjningsbrott, dvs vid kontinuerlig belastning till brott.

Beteendet hos ekv 2.6 presenteras i Fig 2.3. En konsekvens av storleks- och tidsberoendet är att hållfastheten hos stora

konstruktionselement alltid kommer att vara lägre än för små provobjekt. Hur mycket lägre beror på storleksparametern k och tidsparametern h . På grund av att dessa parametrar är samma vid korttidsbelastning och långtidsbelastning så kan en bestämning av parametervärden ske på många olika sätt. Av praktiska skäl är korttidsbelastning att föredra även om långtidsförsök ger en säkrare bestämning av tidsparametern.

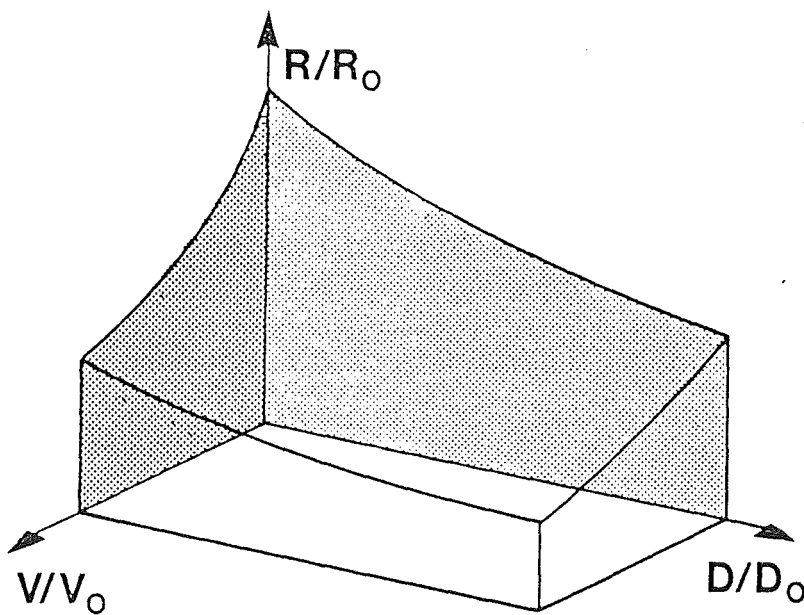


Fig 2.3 Den relativa hållfastheten, R , i förhållande till vollymen under påkänning, V , och varaktigheten av denna påkänning, D .

3 Provningsföresättningar

3.1 Allmänt om material

Allt material, förutom vatten, är hämtat från Island.

Cementen är Isl. Std. Portlandcement med 5% kisilstof. (Se kap 1.2.2.2 för närmare upplysn.)

Stenen kommer från företaget Björgun h/f.

Sanden (fingrusen) kommer från grustagen Raudimelur.

3.2 Ballast

3.2.1 BERGSORTSANALYS

Bergsorteringen utfördes på det sättet att delar av materialet, som vid gradering, stannade på sikt med fri maskvidd 4 mm sorterades för analys. Resultaten hittar man i tabeller 3.2.1 och 3.2.2

Tabell 3.2.1 Bergsortanalys av stenmateriallet (Björgun h/f)

| Rangordning | Bergsortsanalys | Antal | % |
|-------------|------------------------------|-------|-----|
| 1 | Basalt-färskt -tätt | 13 | 3 |
| 1 | Basalt-färskt -poröst | 34 | 8 |
| 2 | Basalt-förvittrad -tätt | 43 | 10 |
| 2 | Basalt-förvittrad -poröst | 50 | 11 |
| 3 | Basalt-starkt förvittrad | 8 | 2 |
| 2# | Basaltglas-färskt -tätt | 99 | 22 |
| 2 | Basaltglas-färskt -poröst | 33 | 7 |
| 2* | Basaltglas-förvittrad-tätt | 112 | 25 |
| 2* | Basaltglas-förvittrad-Poröst | 53 | 12 |
| 2 | Skal-brottstycken | 7 | 2 |
| 3 | Sediment | 1 | 0 |
| | | Σ | 453 |
| | | | 102 |

#,* se förklaringar nästa sida.

Tabell 3.2.2 Bergsortanalys af fingrusen. (Raudimelur)

| Rangorndning | Bergsortsanalys | Antal | % |
|--------------|----------------------------|-------|-----|
| 1 | Basalt-färskt -tätt | 75 | 22 |
| 1 | Basalt-färskt -poröst | 219 | 63 |
| 2 | Basalt-förvittrad -tätt | 11 | 3 |
| 2 | Basalt-förvittrad -poröst | 26 | 8 |
| 2# | Basaltglas-färskt -tätt | 7 | 2 |
| 2* | Basaltglas-förvittrad-tätt | 1 | 0 |
| 2 | Skal-brottstycken | 1 | 0 |
| 3{?} | "Moberg" | 7 | 2 |
| | Σ | 347 | 100 |

Basaltglas = Urkristalliserad basalt, dvs. den basiska typen av obsidian (som är den sura typen).

* Basaltglas- förvittrad = Palagonitiserad, dvs. brun, oftast tunn vittring utan på kornet.

{?} Moberg = Palagonitiserat tuff, dvs. vittrad luftburen vulkan och lava-brottstycken.

Bergsortanalysen utfördes av en isländsk doktorand i geologi, Oskar Sigurdsson, som tidigare har arbetat på Island i samband med bergsortering.

Tabell 3.2.3 ger sammanfattning av bergsorteringen. I /5/ och /12/ hittar man information om grustag på Island.

Tabell 3.2.3 Sammanfattning från tabell 3.2.1 resp. 3.2.2

| Rangorning | Raudimelur % | Björgun h/f % |
|------------|-----------------|------------------|
| 1 | 85 | 11 |
| 2 | 13 | 89 |
| 3 | 2 | 2 |

3.2.2 SIKTDIAGRAM

Siktningen utfördes på de sättet att 4 prov siktades 2 för stenen och 2 för fingrusen. Diagrammen nedan visar medeltal av dessa prov.

Fig 3.2.1 visar siktkdiagram för sten resp. fingrusen.

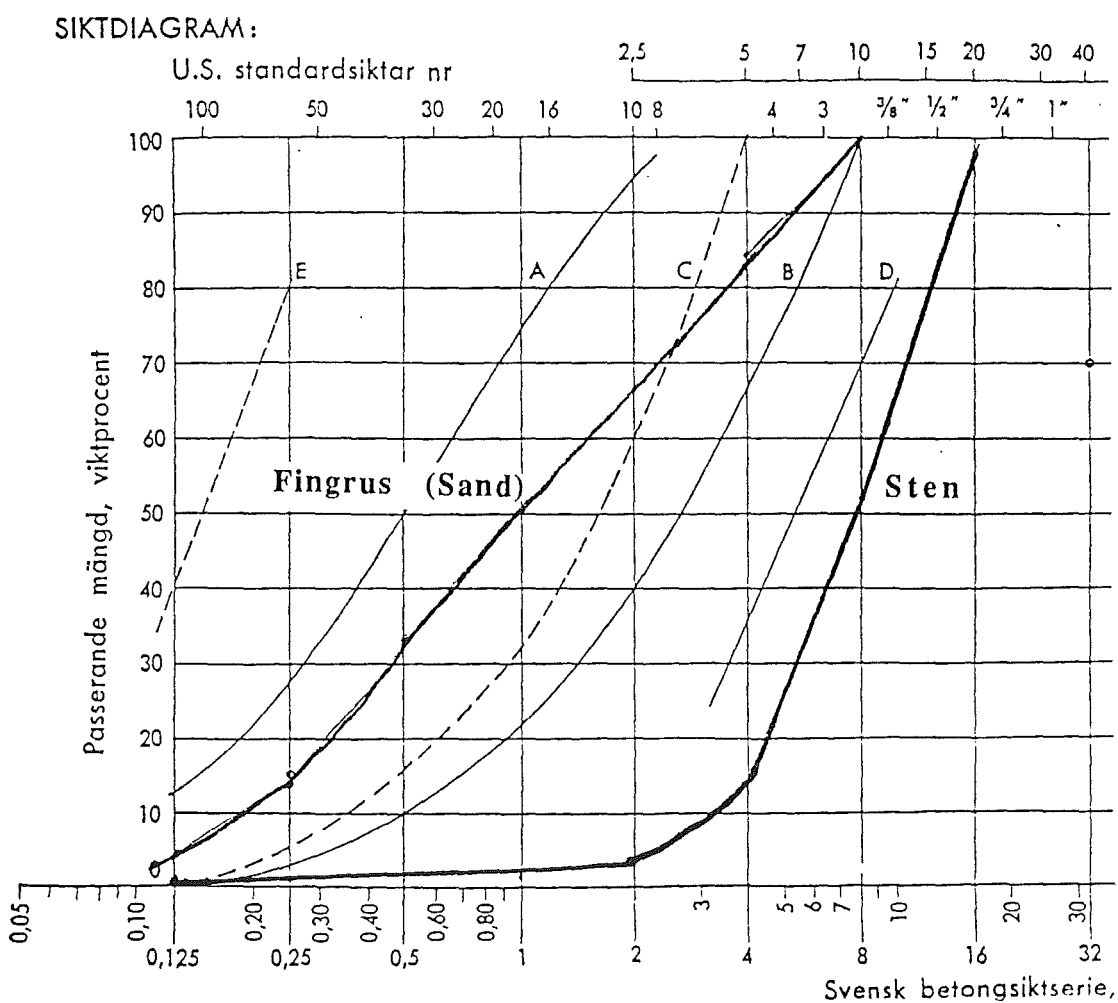


Fig 3.2.1 Siktkdiagram för sten resp. fingrusen (sand)

3.3 Tilverkning av provobjekt

För försöken blandades betong med två olika vattencementtal, vct=0.5 resp. 0.7. I tabell 3.3.1 ges recepten för dessa två typer.

Tabell 3.3.1 Recept för betong

| Cementtyp vct Tilverkningsdag | Isl. Std Portland 0.5 Juni 86 | Isl. Std Portland 0.7 Juni 86 |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Cement Kg/m ³ | 300 | 300 |
| Vatten Kg/m ³ | 150 | 210 |
| Sten Kg/m ³ | 854 | 788 |
| Sand Kg/m ³ | 1079 | 996 |

Tabell 3.3.2 visar information om typ provkroppar samt, antal, typ, numering, storlek och geometri.

Tabell 3.3.2 Information om provkroppar.

| Försök | Typ av Provkropp | Storlek (mm) | | | vct | Antal. stk. |
|-----------|---------------------|--------------|-----|-----|-----|----------------|
| | | b | h | l | | |
| L1-L5 | Cylinder | 50 | 100 | - | 0.5 | 5 |
| 6 - 10 | Cylinder | 75 | 150 | - | 0.5 | 5 |
| A - E | Cylinder | 50 | 100 | - | 0.5 | 5 |
| P - U | Cylinder | 75 | 150 | - | 0.5 | 5 |
| | | | | | | 20 |
| L1-L6 | Cylinder | 50 | 100 | - | 0.7 | 5 |
| 1 - 5 | Cylinder | 75 | 150 | - | 0.7 | 5 |
| F - J | Cylinder | 50 | 100 | - | 0.7 | 5 |
| K - O | Cylinder | 75 | 150 | - | 0.7 | 5 |
| | | | | | | 20 |
| Kub 1-9 | Kub | 150 | 150 | 150 | 0.5 | 9 |
| Kub 10-20 | Kub | 150 | 150 | 150 | 0.7 | 11 |
| 25-1,9BD | Balk | 100 | 150 | 800 | 0.7 | 9 |
| 50-1,9BD | Balk | 100 | 150 | 800 | 0.5 | 9 |

3.4 Efterbehandling av provkroppar

Dagen efter gjutningen placerades provkropparna i vatten. Denna lagring varade över 60 dygn, vilket är mer än dubbelt så lång tid än vad som normalt är fallet.

Efter vattenlagring förvarades provobjekten i rumsluft under cirka 30 dygn.

En härdningstid på mer än 90 dygn under gynnsamma förhållanden innebär en hållfasthet som överstiger den som erhålls efter 28 dygn. Skillnaden bör emellertid vara liten eftersom den största hållfasthetstillväxten sker under de första veckorna.

Vid provning av cylindrar har deformationen som funktion av pålagd belastning registreras. Detta har skett på ett liknande sätt som anges enligt Svensk Standard vid bestämning av elasticitetsmodul.

Vid detta utförande var två ringar skruvade mot cylinderns yta på det sätt som framgår av fig 4.2.0. Mellan dessa två ringar mättes deformationen med tre deformationsgivare på längden 100 mm. Deformationsgivarna, typ PI-5-100, fabrikat TOKYO SOKKI KENKYUJO CO.,LTD, hadde en deformationskapacitet på 5 mm ($\pm 0.5\%$) och med kontinuerlig upplösning.

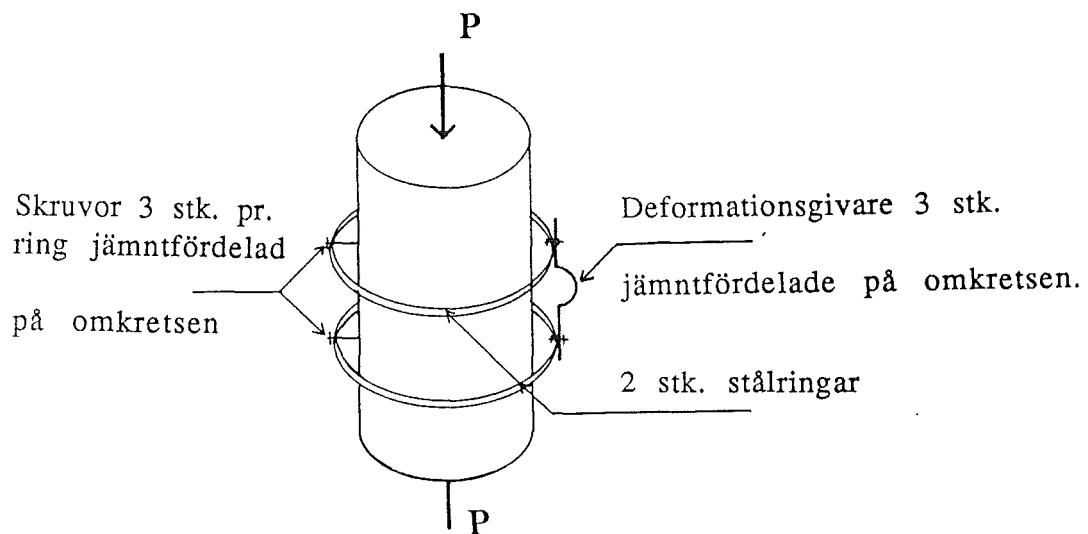


Fig4.2.0 Prinsipskiss av försöksupställning vid cylinderprov.

För påläggning av last används tryckprovningssmaskin av fabrikat MAN med tre olika mätområde, 1000, 2000, 3000 KN. Mätnoggrannheten är $\pm 1\%$ av inställt mätområde.

Vid provningar märkta L1 - L10 användes, förutom tryckprovningssmaskinen, lastcell för registrering av pålagd last, fabrikat AB BOFORS, med max last 500 KN $\pm 0.21\%$, datalog med 63 kanalers ingång, type Schumberger, fabrikat Solatron och datorn Hewlett-Packard 85. Ett program finns utvecklad på denna som behandlar all mätdata och styr mätningen. Fig 4.2.1 visar typisk utskrift från HP 85.

```
EXP 08--SCAN 45---00:01:04:03  
"50 MPa 100 mm L5"
```

```
ch: 00 +44031.00 KN  
ch: 01 -22.88 KN  
ch: 02 -17.99 KN  
ch: 03 +21.99 KN.
```

Fig 4.2.1 Utskrift från HP 85

För vidare bearbete lästes data manuellt till en Macintosh Plus dator.

För andra cylinderprov gäller samma utrustning förutom att lastsellen byts ut för tryckgivare för mätning av oljetrycket i tryckpressen, typ TDS - 2, fabrikt AB BOFORS och HP 85 datorn byts ut för Jet 80 dator. Fig 4.2.2 visar typisk utskrift från Jet 80.

```
SCAN 21 FRE. 3 OKT. 1986 11:55:01
```

```
Ø: 427.99 KN 1: -.065 KN 2: -.068 KN 3: -.070 KN
```

```
SCAN 22 FRE. 3 OKT. 1986 11:56:01
```

```
Ø: 449.93 KN 1: -.065 KN 2: -.072 KN 3: -.073 KN
```

Fig 4.2.2 Exampel på utskrift från Jet 80 dator.

Informationen skickades sedan via en IBM PC till en VAX minidator, sorterades med hjälp av ett FORTRAN datorprogram och sändes vidare till en Macintosh Plus dator för bearbetning.

4.2.2 PROVNINGSRESULTAT

På efterföljande 16 sidor visas försöksresultat från de 8 försöksgrupperna i cylinderprovningen.

Försök: L1-L5

Belastningshastighet = 0.017 MPa/s (1 MPa/min)
Cylinderstorlek : d=100mm, h=200mm
vct =0.5

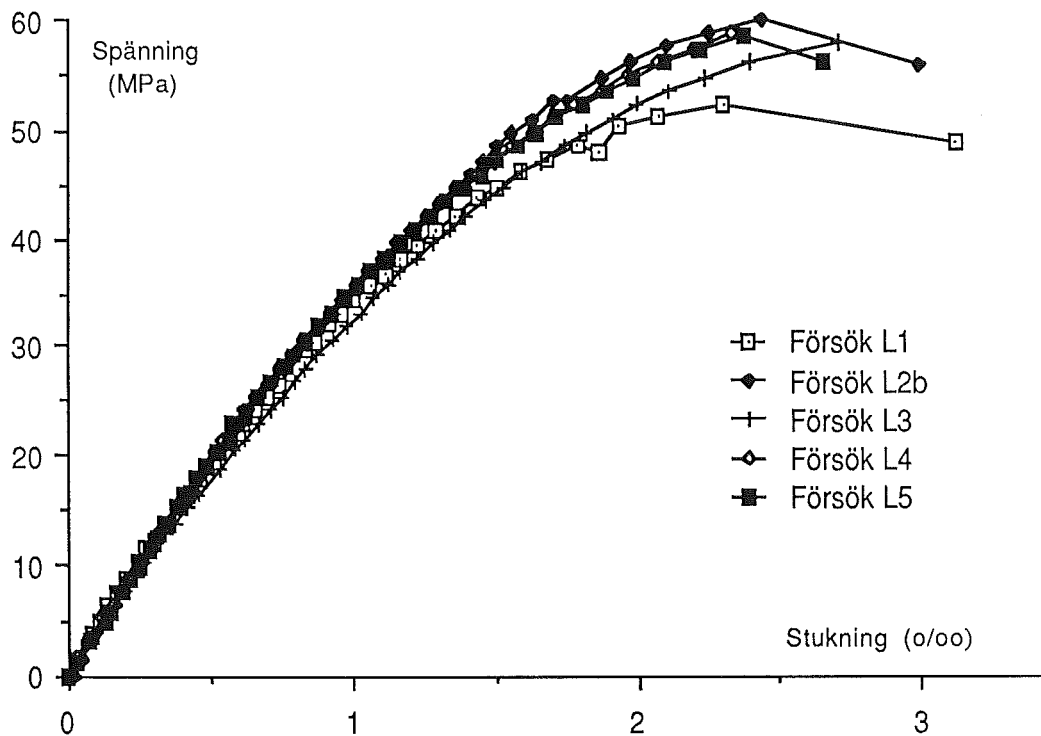


Fig : 4.2.3 Spännings-deformationskurvor för försök: L1-L5.

Tabell : 3.2.1 Hållfasthet för försök L1-L5, samt medelhållfasthet och Std. av.

| Försök | Hållfasthet MPa | Medelhållfasthet MPa | Std. av. MPa |
|--------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| L1 | 52.247 | 57.52 | 3.03 |
| L2b | 59.948 | | |
| L3 | 57.946 | | |
| L4 | 58.775 | | |
| L5 | 58.668 | | |

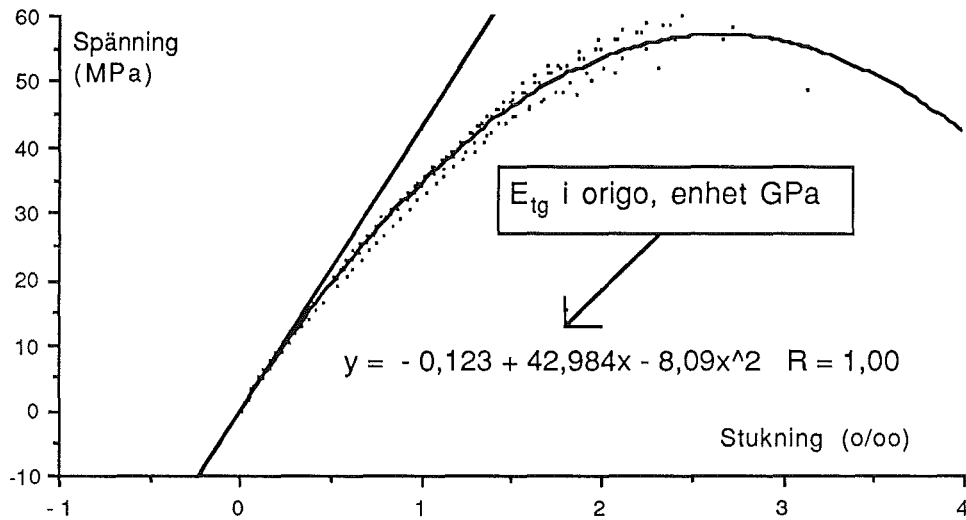


Fig : 4.2.4 Medelvärde av spännings-deformationskurva försöksserie L1-L5, samt tangentlinja i origo.

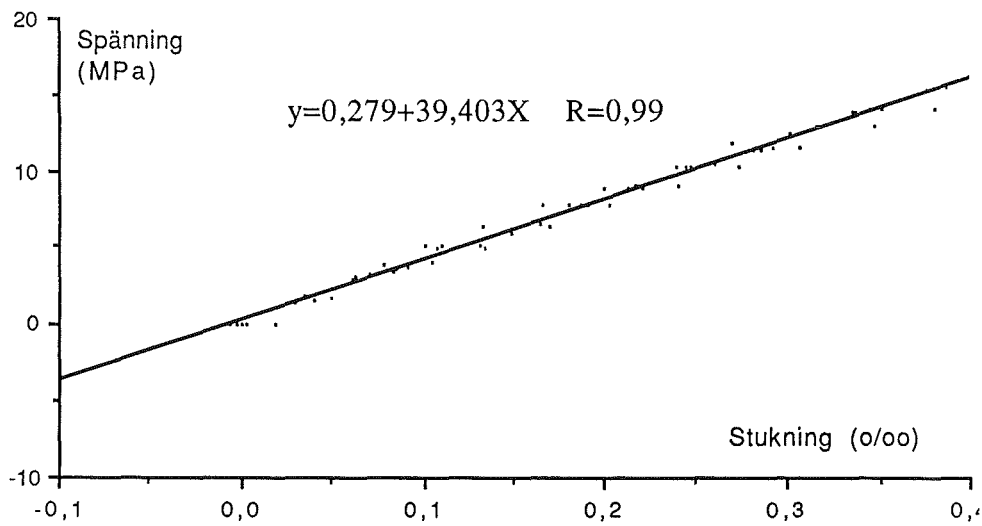


Fig : 4.2.5 Första delen av kurvan i fig : 4.2.4, linjärt anpassat.

Försök: 6 - 10

Belastningshastighet = 0.017 MPa/s (1 MPa/min)

Cylinderstorlek : d=150mm, h=300mm

vct =0.5

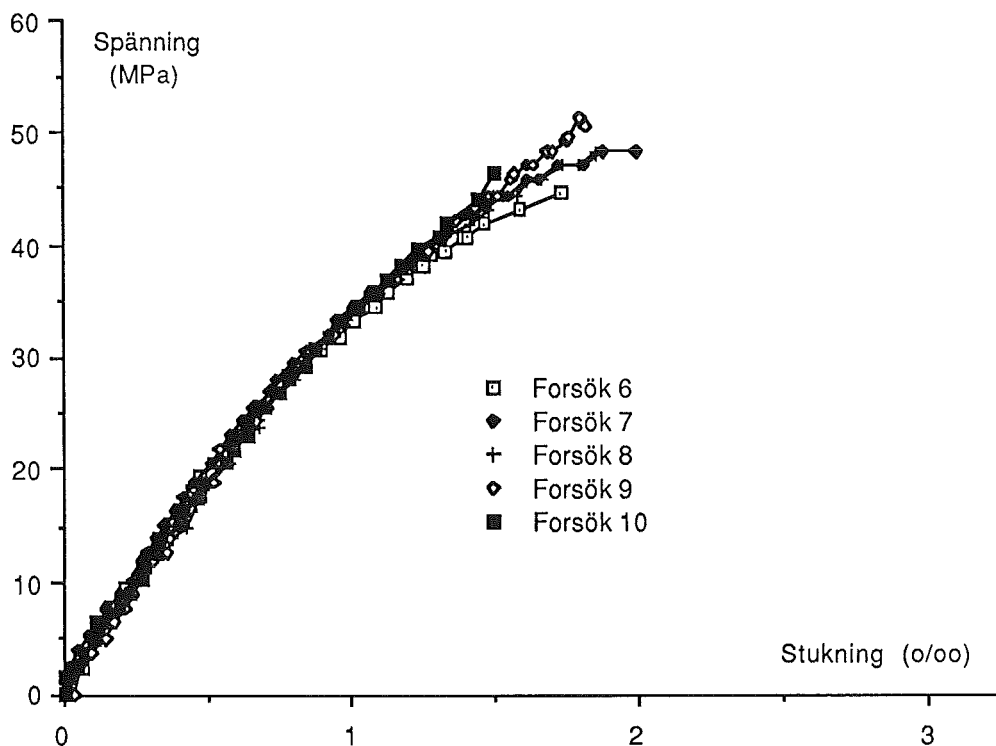


Fig : 4.2.6 Spännings-deformationskurvor för försök: 6-10.

Tabell : 4.2.2 Hållfasthet för försök 6-10, samt medelhållfasthet och Std. av.

| Försök | Hållfasthet MPa | Medelhållfasthet MPa | Std. av. MPa |
|--------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| 6 | 44.712 | 48.38 | 2.38 |
| 7 | 48.438 | | |
| 8 | 48.127 | | |
| 9 | 51.233 | | |
| 10 | 49.396 | | |

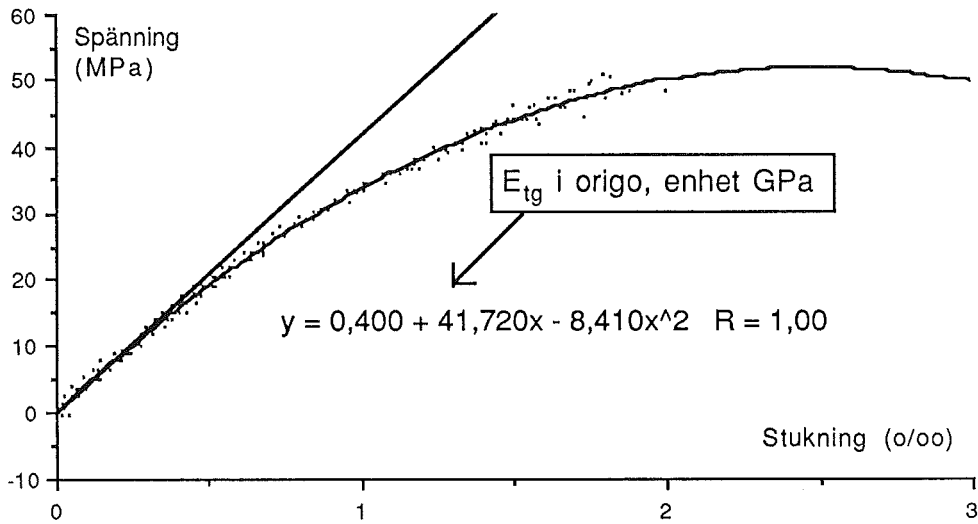


Fig : 4.2.7 Medelvärde av spännings-deformationskurva försöksserie 6 - 10, samt tangentlinja i origo.

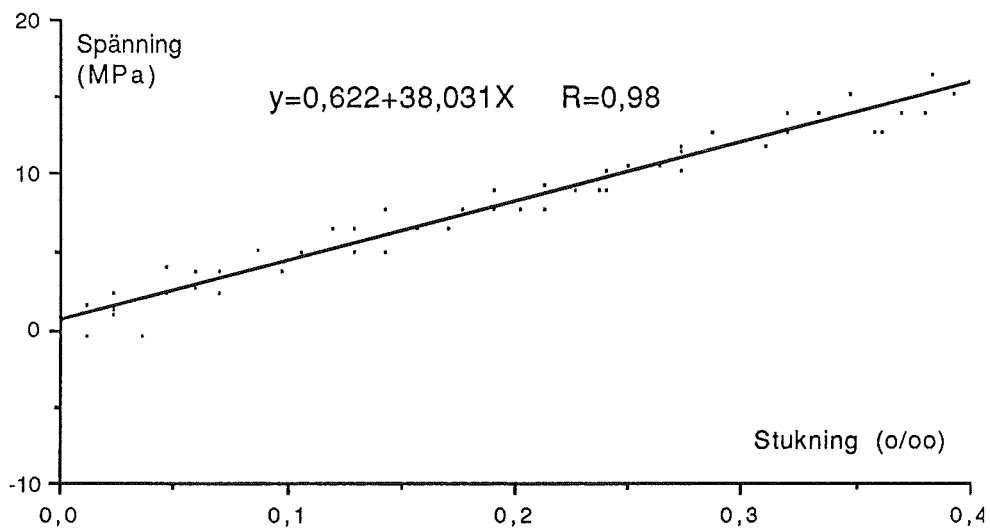


Fig :4.2.8 Första delen av kurvan i fig: 4.2.7, linjärt anpassat.

Försök: A- E

Belastningshastighet = 0.6-0.8 MPa/s
Cylinderstorlek : d=100mm, h=200mm
vct =0.5

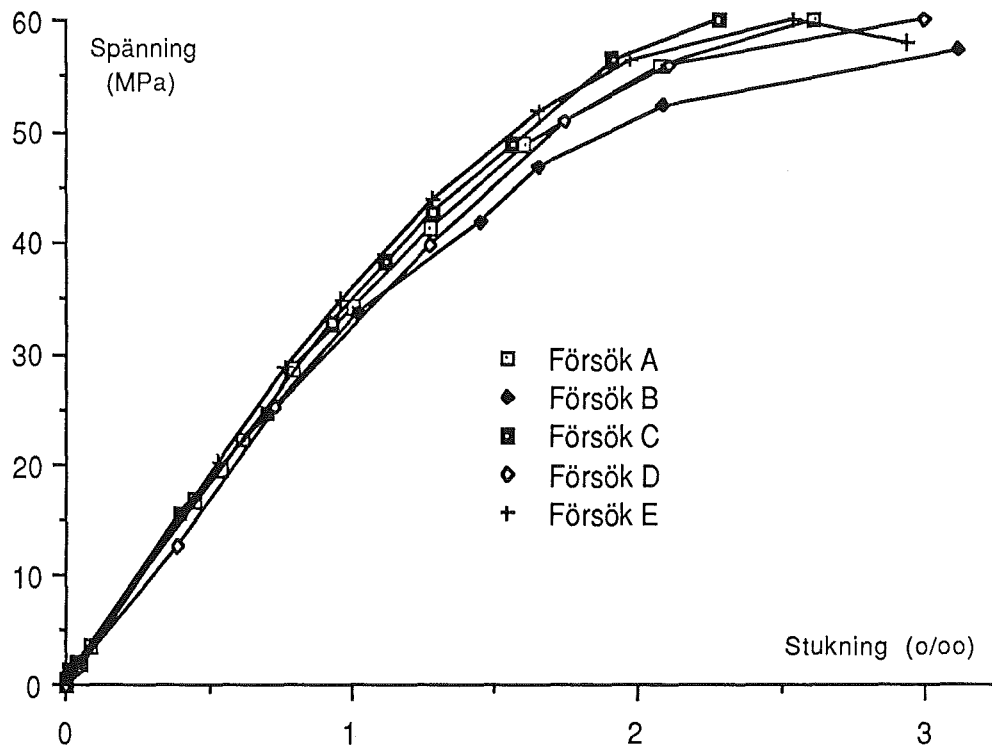


Fig : 4.2.9 Spännings-deformationskurvor för försök: A-E.

Tabell : 4.2.3 Hållfasthet för försök A-E, samt medelhållfasthet och Std. av.

| Försök | Hållfasthet MPa | Medelhållfasthet MPa | Std. av. MPa |
|--------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| A | 60.082 | 60.09 | 1.66 |
| B | 57.287 | | |
| C | 61.480 | | |
| D | 61.115 | | |
| E | 60.479 | | |

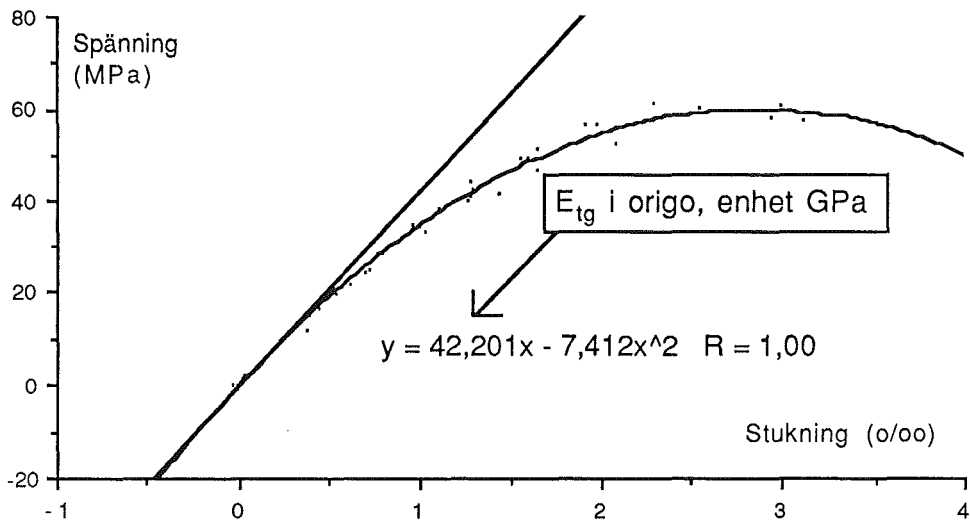


Fig : 4.2.10 Medelvärde av spännings-deformationskurva försöksserie A -E, samt tangentlinja i origo.

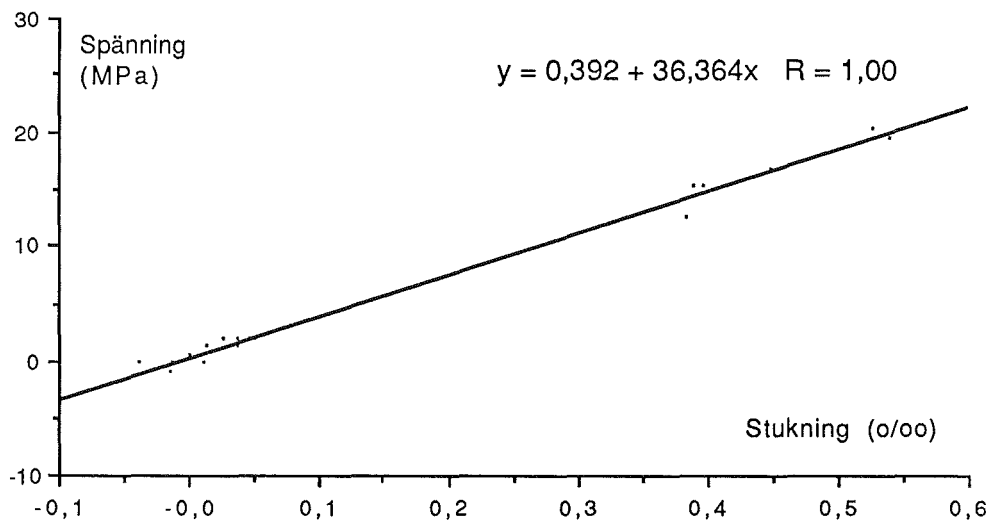


Fig : 4.2.11 Första delen av kurvan i fig: 4.2.10, linjärt anpassat.

Försök: P-U

Belastningshastighet = 0.6-0.8 MPa/s
Cylinderstorlek : d=150mm, h=300mm
vct =0.5

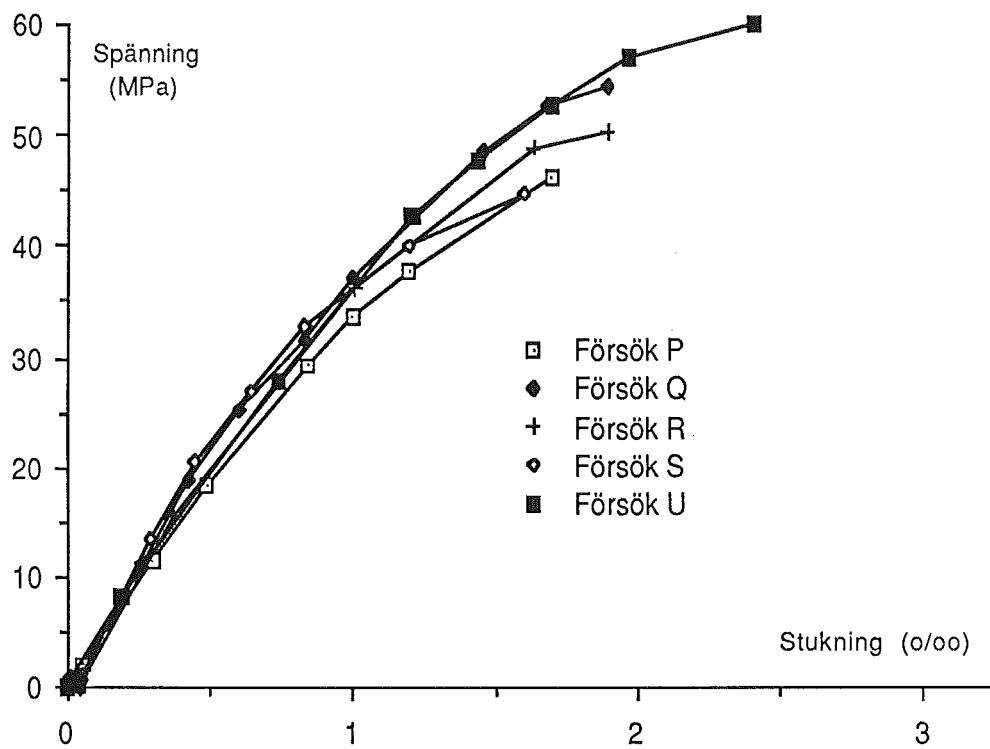


Fig : 4.2.12 Spännings-deformationskurvor för försök: P-U.

Tabell : 4.2.4 Hållfasthet för försök P-U, samt medelhållfasthet och Std. av.

| Försök | Hållfasthet MPa | Medelhållfasthet MPa | Std. av. MPa |
|--------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| p | 46.360 | 51.2 | 6.28 |
| Q | 54.325 | | |
| R | 50.364 | | |
| S | 44.705 | | |
| U | 60.238 | | |

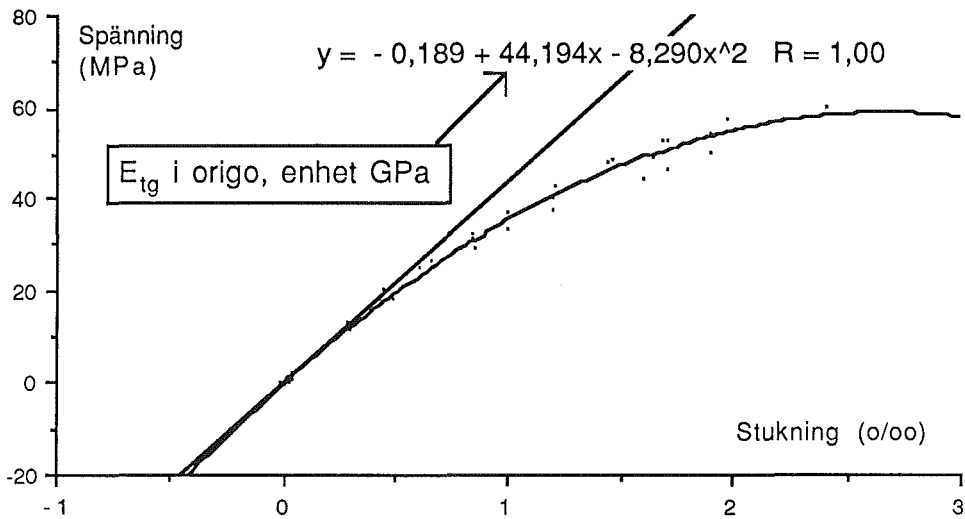


Fig : 4.2.13 Medelvärde av spännings-deformationskurva försöksserie P-U, samt tangentlinja i origo.

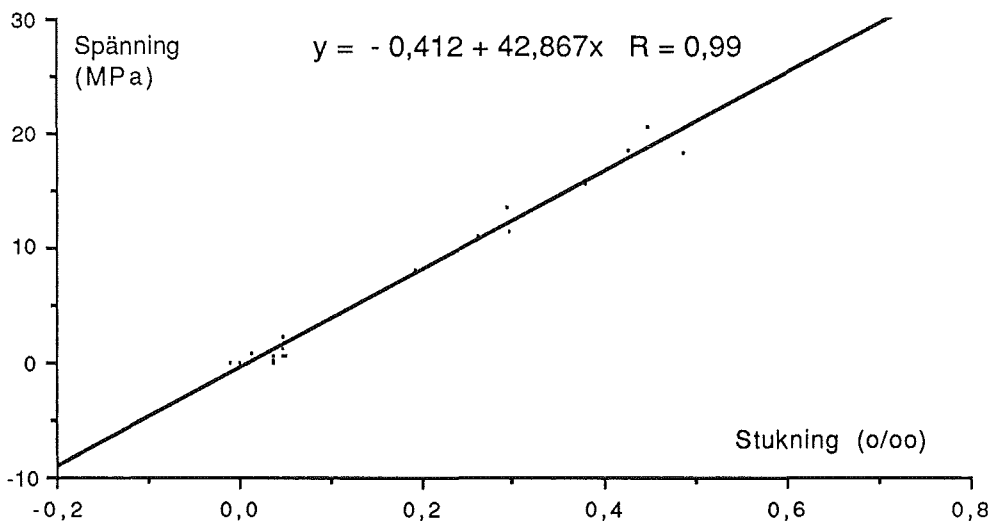


Fig :4.2.14 Första delen av kurvan i fig: 4.2.13, linjärt anpassat.

Försök: L6-L10

Belastningshastighet = 0.017 MPa/s (1 MPa/min)

Cylinderstorlek : d=100mm, h=200mm

vct =0.7

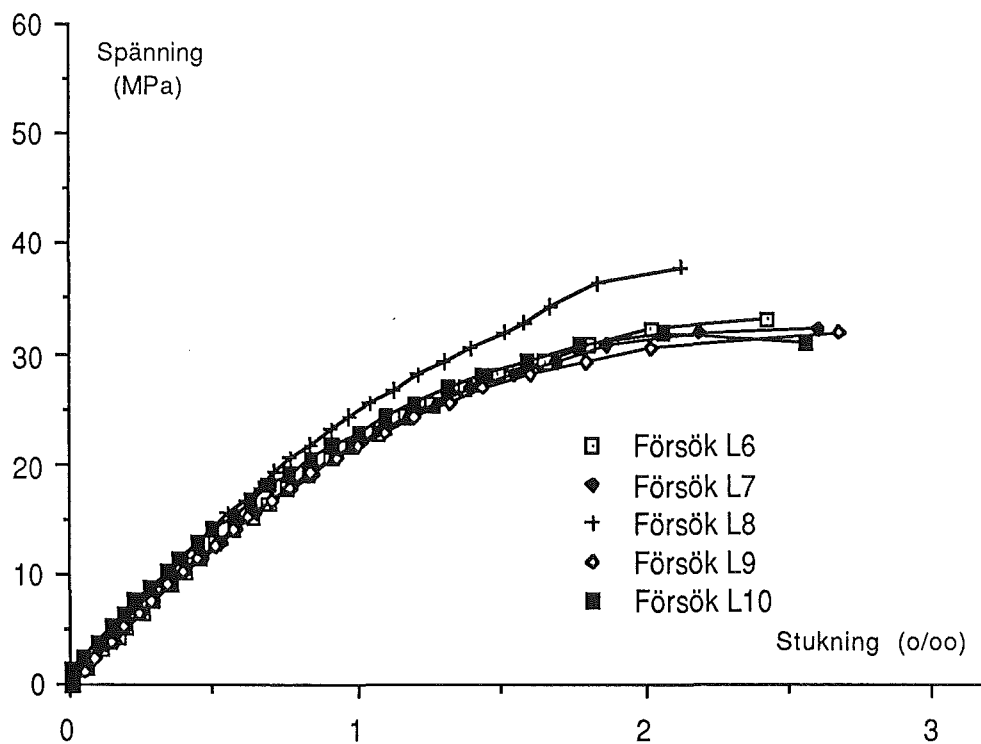


Fig : 4.2.15 Spännings-deformationskurvor för försök: L6 -L10

Tabell : 4.2.5 Hållfasthet för försök L6-L10, samt medelhållfasthet och Std. av.

| Försök | Hållfasthet MPa | Medelhållfasthet MPa | Std. av. MPa |
|--------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| L6 | 33.144 | 33.2 | 2.74 |
| L7 | 32.106 | | |
| L8 | 37.898 | | |
| L9 | 31.891 | | |
| L10 | 30.946 | | |

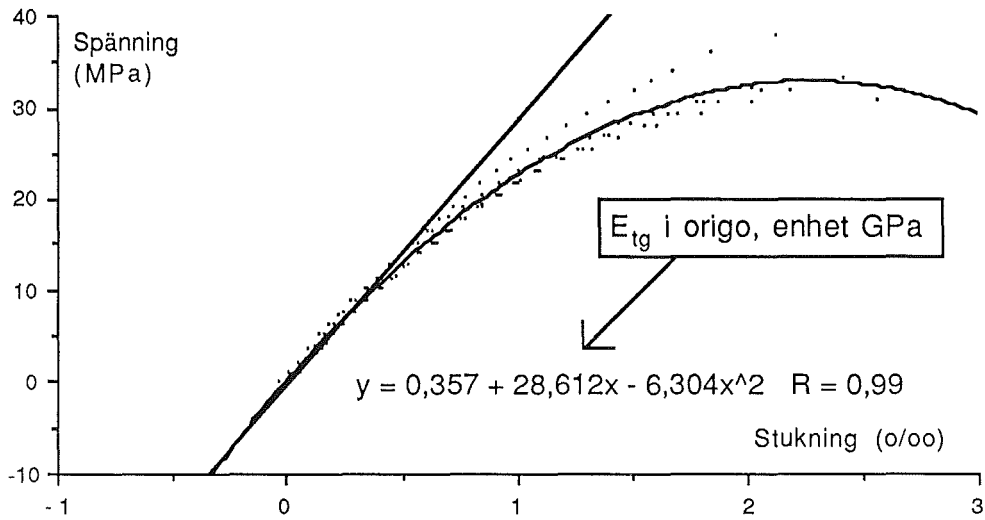


Fig : 4.2.16 Medelvärde av spännings-deformationskurva försöksserie L6-L10, samt tangentlinja i origo.

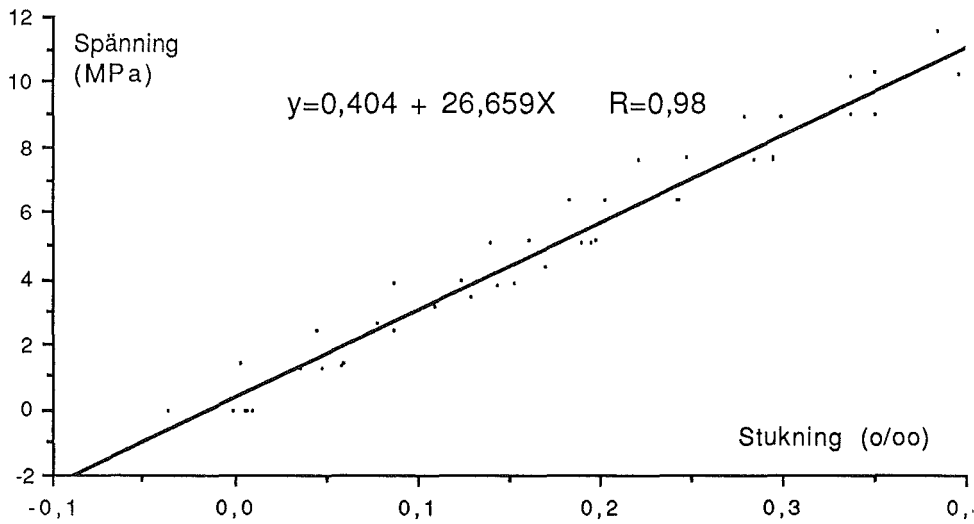


Fig : 4.2.17 Första delen av kurvan i fig : 4.2.16, linjärt anpassat.

Försök: 1 - 5

Belastningshastighet = 0.017 MPa/s (1 MPa/min)
Cylinderstorlek : d=150mm, h=300mm
vct =0.7

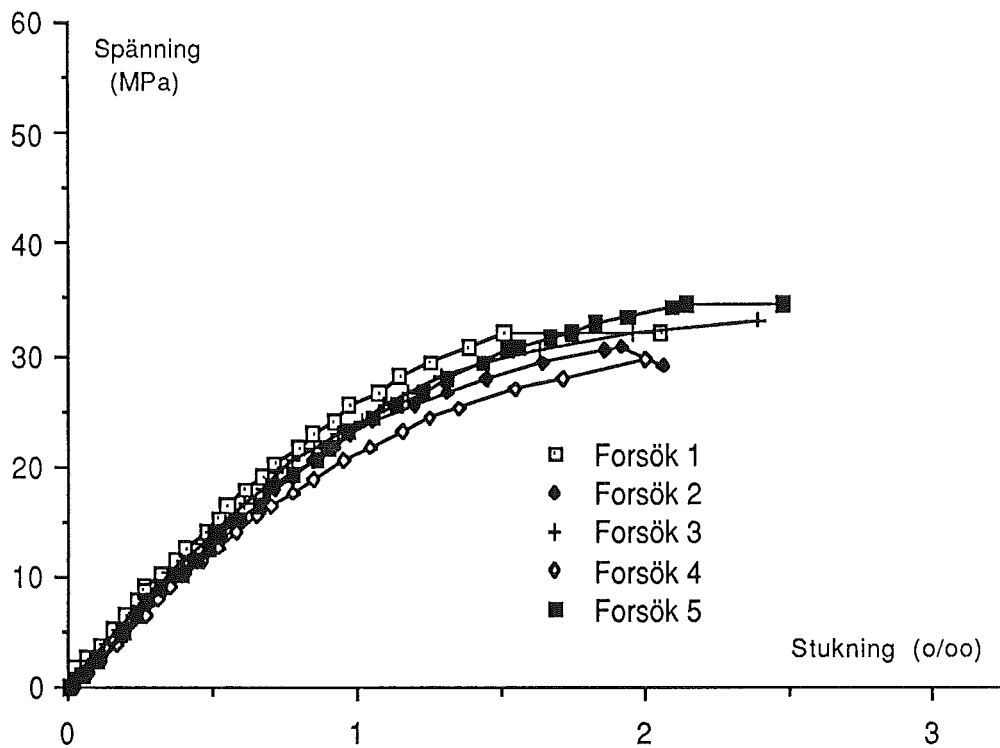
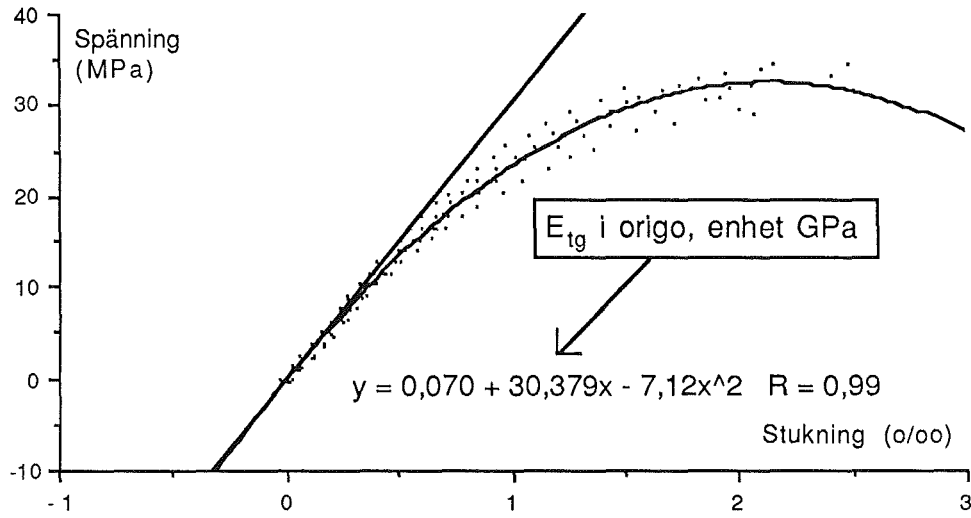


Fig : 4.2.18 Spännings-deformationskurvor för försök: 1-5.

Tabell : 4.2.6 Hållfasthet för försök 1-5, samt medelhållfasthet och Std. av.

| Försök | Hållfasthet MPa | Medelhållfasthet MPa | Std. av. MPa |
|--------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| 1 | 31.965 | 31.94 | 1.92 |
| 2 | 30.798 | | |
| 3 | 32.978 | | |
| 4 | 29.497 | | |
| 5 | 34.465 | | |



4.2.19 Medelvärde av spännings-deformationskurva försöksserie 1-5, samt tangentlinja i origo.

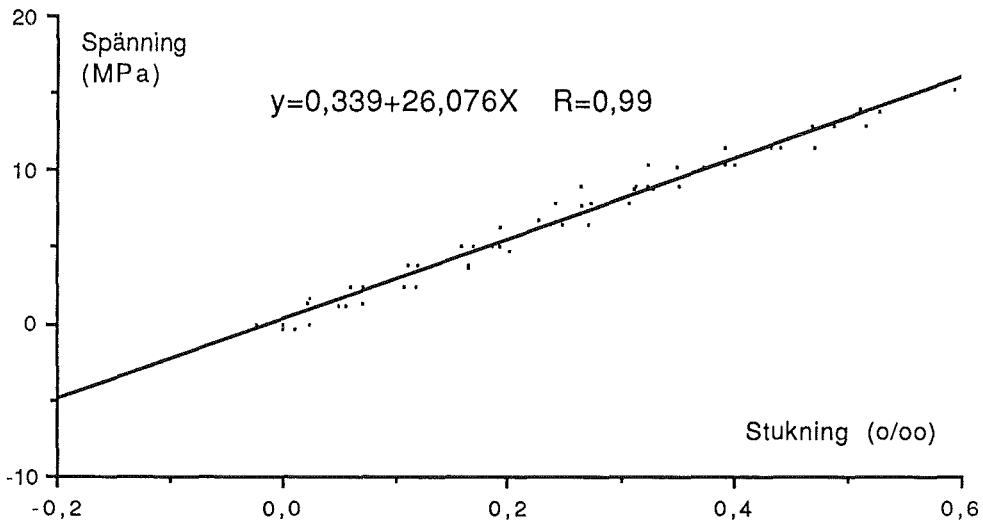


Fig : 4.2.20 Första delen av kurvan i fig : 4.2.19, linjärt anpassat.

Försök: F - J

Belastningshastighet = 0.6-0.8 MPa/s
Cylinderstorlek : d=100mm, h=200mm
vct =0.7

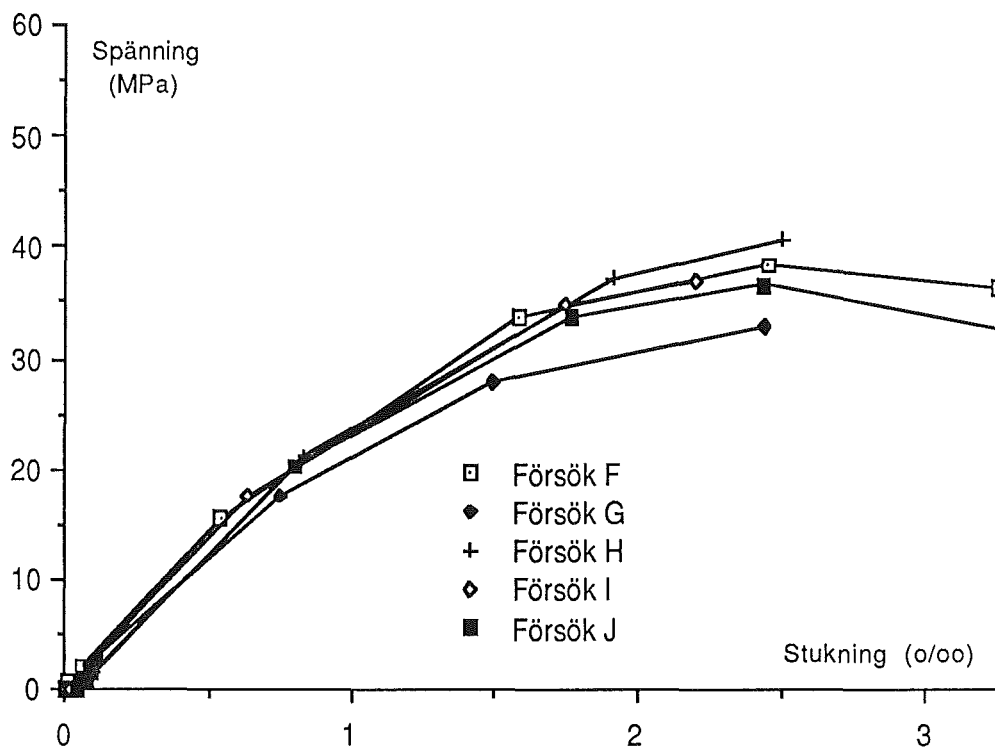


Fig : 4.2.21 Spännings-deformationskurvor för försök: F - J.

Tabell :4.2.7 Hållfasthet för försök F-J, samt medelhållfasthet och Std. av.

| Försök | Hållfasthet MPa | Medelhållfasthet MPa | Std. av. MPa |
|--------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| F | 38.197 | 37.03 | 2.88 |
| G | 30.798 | | |
| H | 40.744 | | |
| I | 36.924 | | |
| J | 36.452 | | |

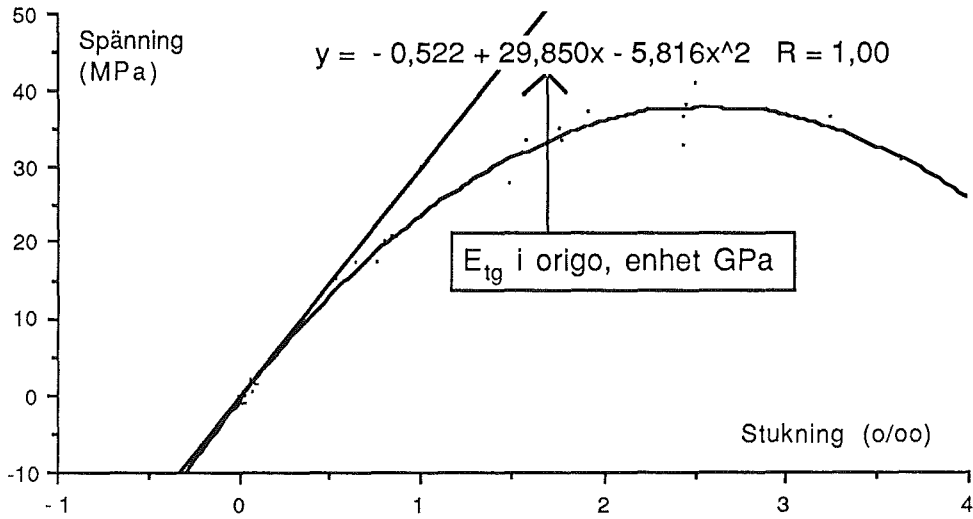


Fig : 4.2.22 Medelvärde av spännings-deformationskurva försöksserie F-J, samt tangentlinja i origo.

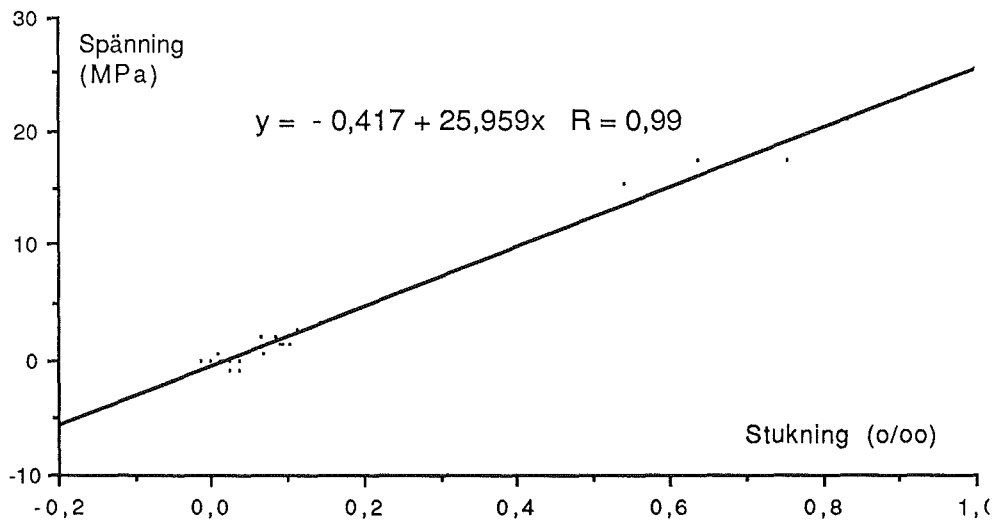


Fig : 4.2.23 Första delen av kurvan i fig : 4.2.22, linjärt anpassat.

Försök: K-O

Belastningshastighet = 0.6-0.8 MPa/s
Cylinderstorlek : d=150mm, h=300mm
vct =0.7

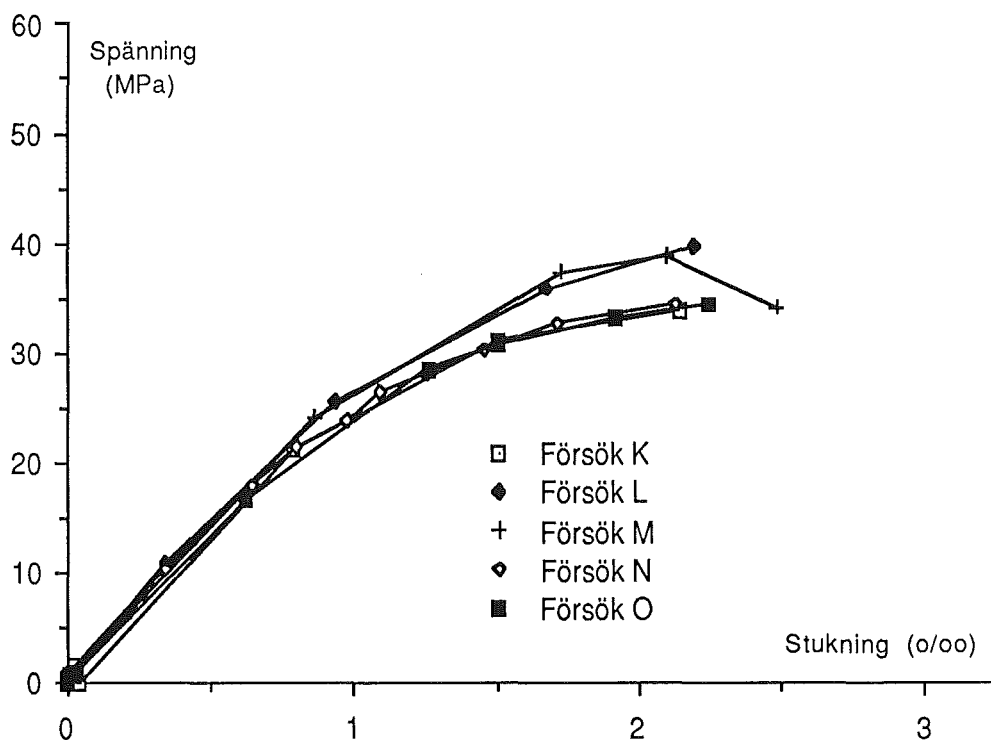


Fig : 4.2.24 Spännings-deformationskurvor för försök: K - O.

Tabell :4.2.8 Hållfasthet för försök K - O, samt medelhållfasthet och Std. av.

| Försök | Hållfasthet MPa | Medelhållfasthet MPa | Std. av. MPa |
|--------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| K | 33.952 | 36.26 | 2.7 |
| L | 39.612 | | |
| M | 38.763 | | |
| N | 34.466 | | |
| O | 34.519 | | |

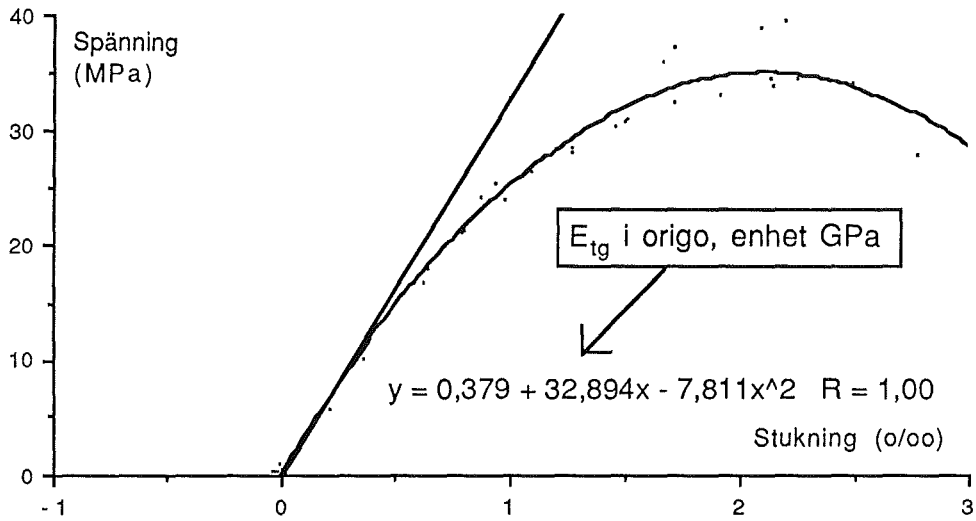


Fig : 4.2.25 Medelvärde av spännings-deformationskurva försöksserie K-O, samt tangentlinja i origo.

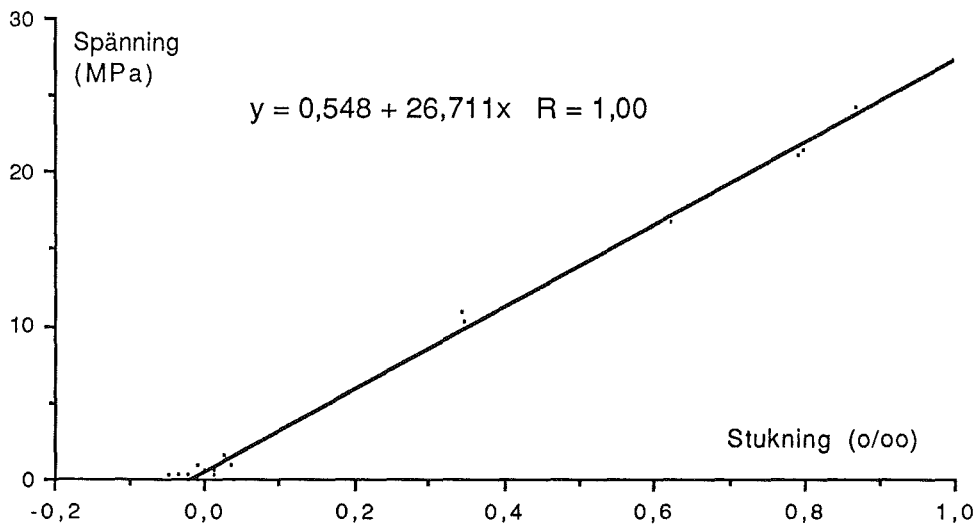


Fig : 4.2.26 Första delen av kurvan i fig : 4.2.25, linjärt anpassat.

4.2.3 SAMMANFATTAT RESULTAT AV CYLINDERFÖRSÖK.

Fig 4.2.27 och fig 4.2.28 visar resultat från cylinderförsök 0.5 resp. 0.7

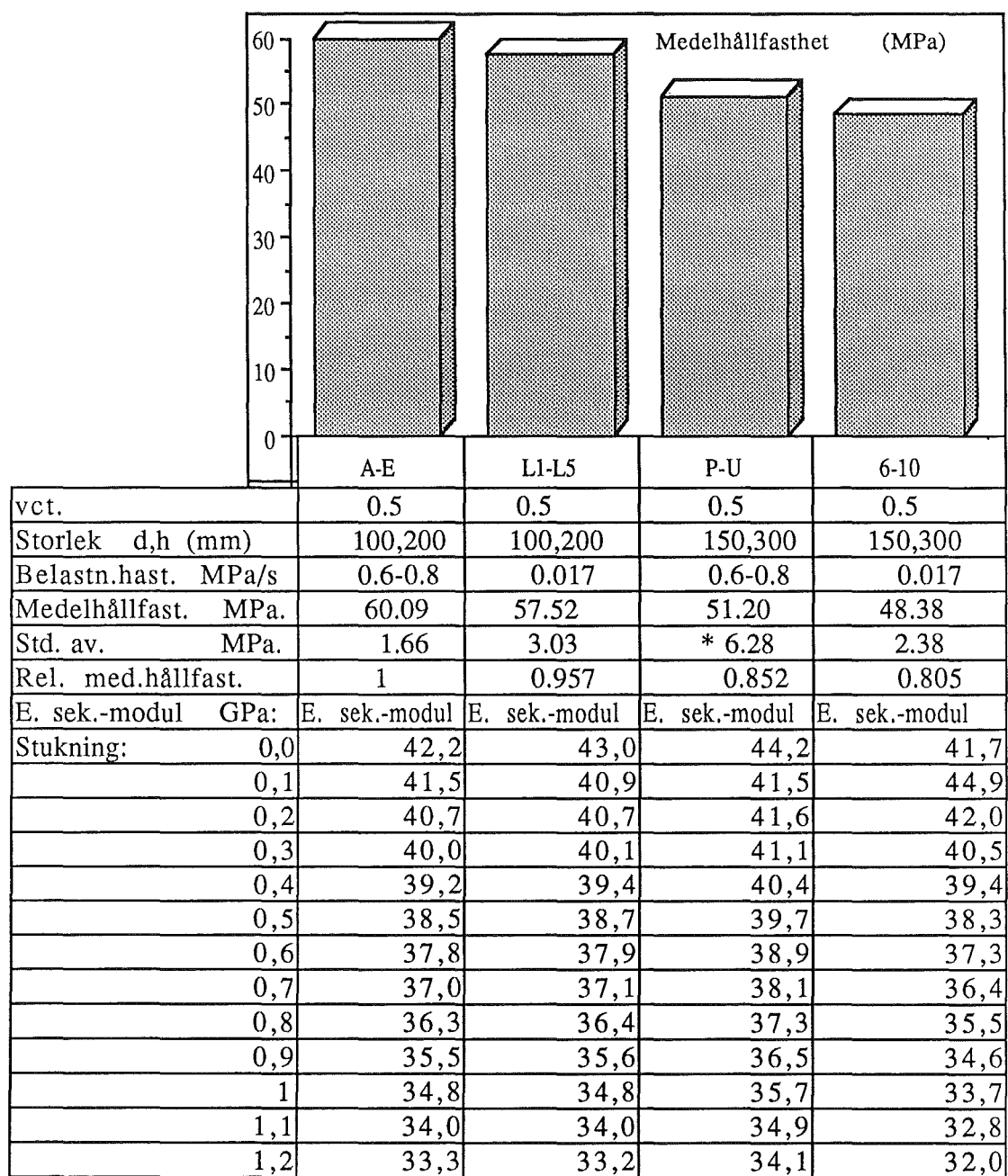


Fig 4.2.27 Sammanfattat resultat av cylinderförsök med vct=0.5

* Std. av. i försök P-U rel. hög se fig 4.2.27

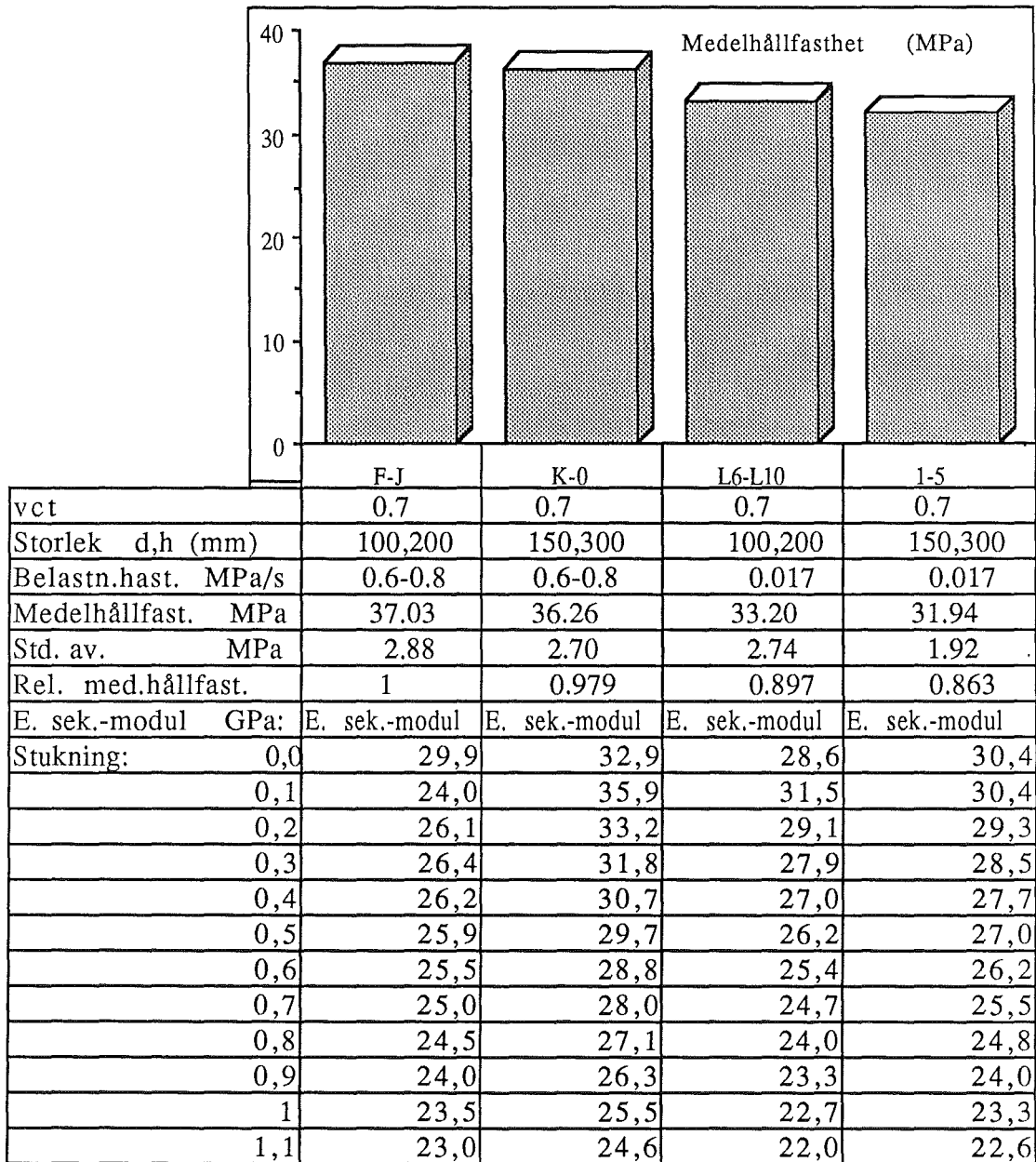


Fig 4.2.28 Sammanfattat resultat av cylinderförsök med vct=0.7

4.3 Kubprovning-tryck

4.3.1 ALLMÄNT

Kubarnas geometri (l,b,h) är enligt standard 150,150,150 mm.

Mätning och mätutrustning:

För provningen används tryckprovningssmaskin av fabrikat MAN med tre olika mätområde, 1000, 2000,3000 KN. Mätnoggrannheten är +1% av inställt mätområde.

Syfte: Jämf. mellan hållfasthet hos cylinder och kuber.

Vid provning av kuberna används enbart tryckprovningssmaskinen samt dess Kontrollenhet (Manöverskåp). Kraften lästes från last-indikerningsvisaren (Pendelmanometer) och överfördes manuellt till datorbehandling.

Fig 4.3.1 ger resultat från provningen samt jämförelse med cylindrar med samma belastningshastighet.

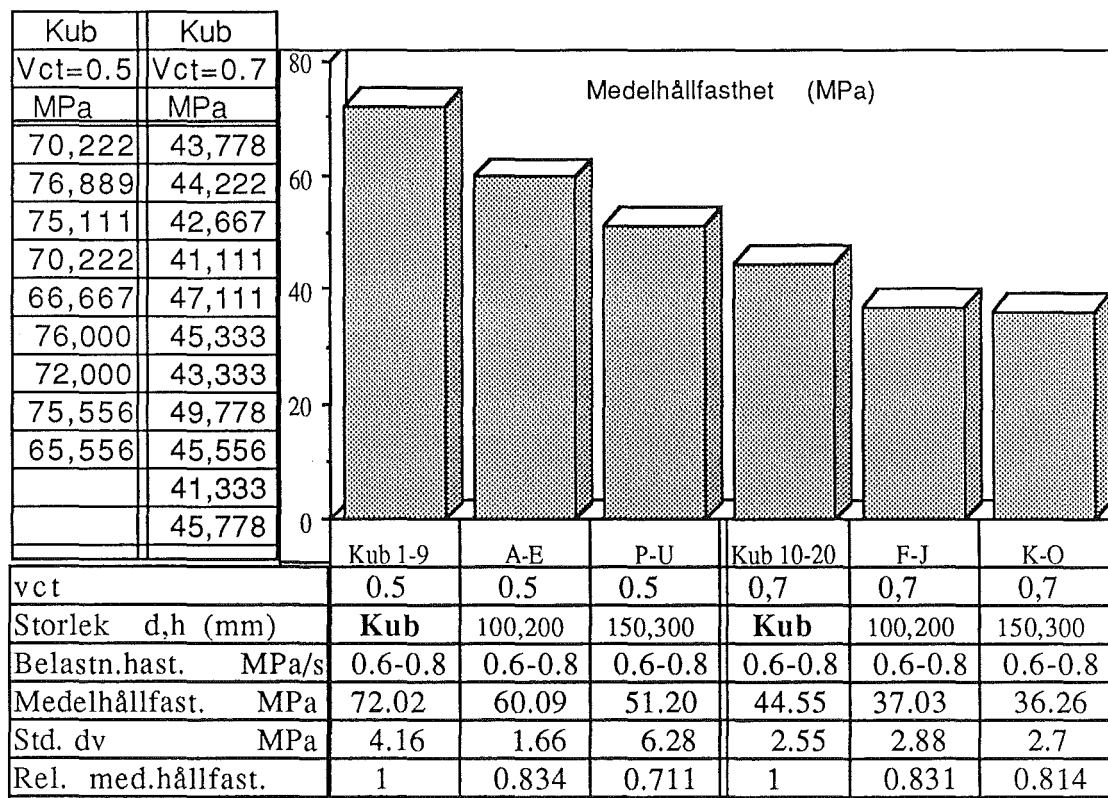


Fig. 4.3.1 Resultat av kubförsök.

4.4 Provning böj-drag.

4.4.1 MATERIAL OCH GEOMETRI

Alla balkar som anges i tabell 3.3.2 används vid dragprovningen.

4.4.2 MÄTNING, MÄTUTRUSNING OCH SYFTE

Syfte: Jämf. mellan drag resp. tryckhållfasthet samt sambandet mellan spänning och deformation. Alla balkar provades på samma sätt, försöksuppställning visas på fig 4.4.1

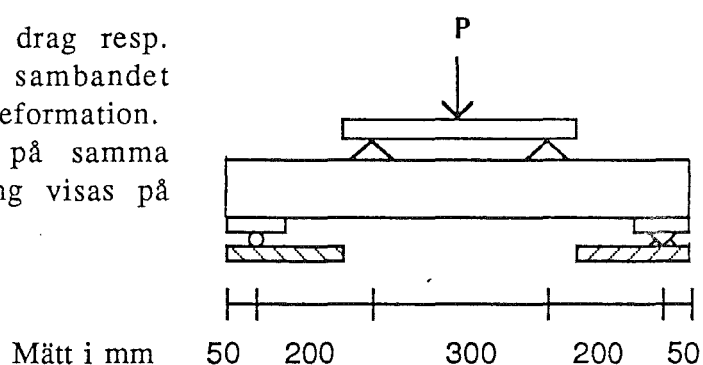


Fig 4.4.1 Försöksuppställning vid böj dragprov.

Lasten P registrerades med en lastcell LSK -2, fabrikat AB BOFORS, med max last 19.62 KN +/- 0.19%, Kopplingslåda, datalogg typ Schlumberger, fabrikat Solatron och datorn Jet 80. Deformationen registrerades 50 mm från balkens mittnitt med en potentialmeter. Fig 4.4.2 visar typisk utskrift från Jet 80.

SCAN 1Ø MAN. 3 NOV. 1986 15:50:39

Ø: 8.593 KN 1: .36Ø *K

Fig 4.4.2 Exampel på utskrift från böj-dragprov

För vidare bearbete lästes data manuellt till en Macintosh Plus dator.

4.4.3 RESULTAT

4.4.4.1 Resultat av prov med $vct. = 0.7$

Figur 4.4.2 visar resultat av böj-drag försök av balkar med $vct=0.7$.

Tabell 4.4.1 visar böj-drag hållfasthet, nedböjning vid brott 50mm från mitten av balken samt $E_{\text{böj-drag}}$ -modul beräknad enligt /11/ sid 637 (162:909). I tabellen visas också samma resultat utan prov märkta 25-2BD och 25-6BD.

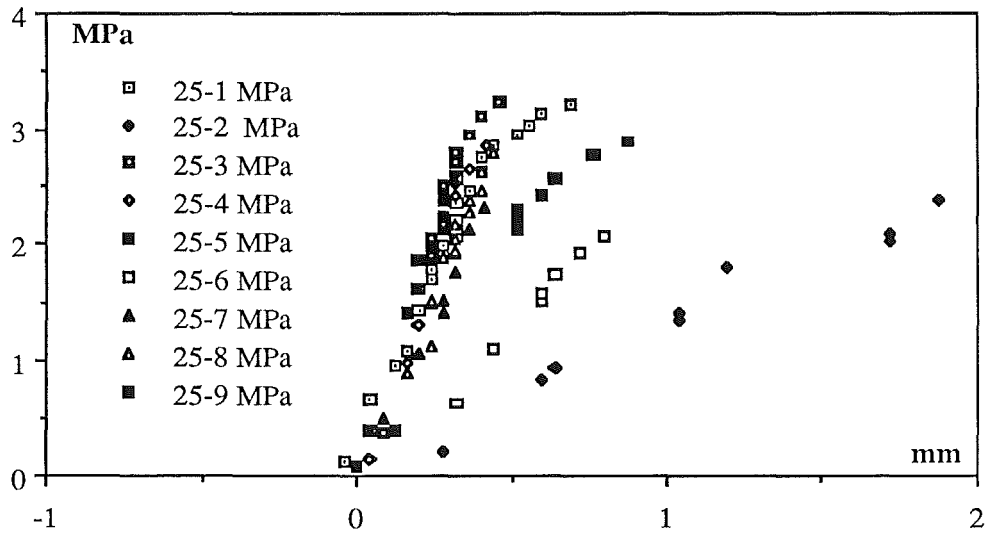


Fig 4.4.2 Resultat av Böj-Drag försök med $vct=0.7$

Tabell 4.4.1 Resultat av Böj-Drag försök med $vct=0.7$

| Prov nr. | y vid brott mm | Hållfasthet MPa | E - modul GPa | Hållfasthet MPa | E - modul GPa |
|----------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| 25-1BD | 0,690 | 3,212 | 4,500 | 3,212 | 4,500 |
| 25-2BD | 1,880 | 2,386 | 0,860 | | |
| 25-3BD | 0,460 | 3,246 | 5,520 | 3,246 | 5,520 |
| 25-4BD | 0,420 | 2,856 | 4,940 | 2,856 | 4,940 |
| 25-5BD | 0,880 | 2,892 | 2,830 | 2,892 | 2,830 |
| 25-6BD | 0,799 | 2,070 | 1,710 | | |
| 25-7BD | 0,410 | 2,310 | 3,870 | 2,310 | 3,870 |
| 25-8BD | 0,440 | 2,790 | 4,280 | 2,790 | 4,280 |
| 25-9BD | 0,320 | 2,564 | 5,720 | 2,564 | 5,720 |
| Medeltal | 0,700 | 2,703 | 3,804 | 2,839 | 4,523 |
| Std.av | 0,483 | 0,402 | 1,682 | 0,333 | 0,998 |

4.4.4.2 Resultat av prov med vct. =0.5

Figur 4.4.3 visar resultat av böj-drag försök av balkar med vct=0.5.

Tabell 4.4.2 visar böj-drag hållfasthet, nedböjning vid brott 50mm från mitten av balken samt $E_{\text{böj-drag}}$ -modul beräknad enligt /11/ sid 637 (162:909). I tabellen visas också samma resultat utan prov märkta 50-1BD och 50-9BD.

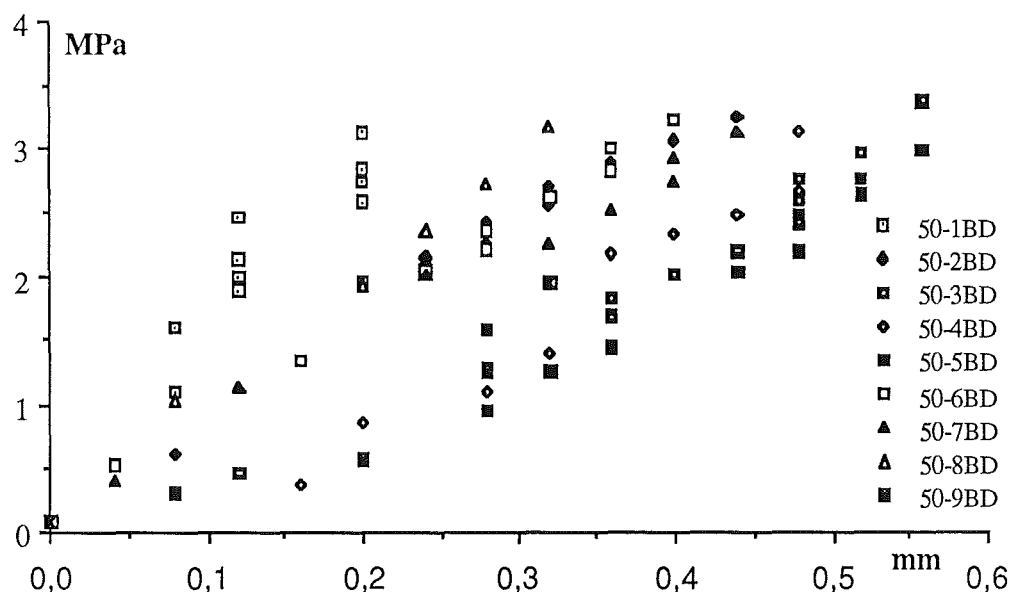


Fig 4.4.3 Resultat av Böj-Drag försök med vct=0.5

Tabell 4.4.2 Resultat av Böj-Drag försök med vct=0.5

| Prov nr. | y vid brott mm | Hållfasthet MPa | E - modul GPa | Hållfasthet MPa | E - modul GPa |
|----------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| 50-1BD | 0,200 | 3,131 | 9,879 | | |
| 50-2BD | 0,440 | 3,246 | 5,584 | 3,246 | 5,584 |
| 50-3BD | 0,560 | 3,376 | 3,511 | 3,376 | 3,511 |
| 50-4BD | 0,480 | 3,119 | 3,529 | 3,119 | 3,529 |
| 50-5BD | 0,560 | 2,973 | 3,104 | 2,973 | 3,104 |
| 50-6BD | 0,400 | 3,229 | 5,674 | 3,229 | 5,674 |
| 50-7BD | 0,440 | 3,122 | 5,041 | 3,122 | 5,041 |
| 50-8BD | 0,320 | 3,173 | 6,786 | 3,173 | 6,786 |
| 50-9BD | 0,320 | 1,951 | 3,503 | | |
| medeltal | 0,413 | 3,036 | 5,179 | 3,177 | 4,747 |
| Std.av | 0,118 | 0,421 | 2,171 | 0,126 | 1,385 |

5. Resultatbearbetning

5.1 Allmänt

De resultat som erhållits vid de försök som redovisats i kapitel 4 bör beaktas med utgångspunkt från de förutsättningar som gällt vid försöken. Detta gäller speciellt avvikelser från normal provningsmetodik men också andra aspekter som har påverkat provningsresultaten. Detta är väsentligt dels för att förklara erhållna resultat dels vid jämförelser med andra provningsresultat.

Den provade betongen har speciella egenskaper. Cementet som är av Portland typ har 5% tillsats av silika vilket påverkar betongegenskaperna genom att göra den tätare vilket förbättrar hållfasthetsegenskaperna vid goda härdningsförhållanden. Ballasten är typisk för Island och är dels porös dels alkalisk i sin karaktär. Det senare öppnar möjligheter för alkali kiselsyra reaktioner som genom sina expansiva egenskaper bryter ner betongen inifrån. Detta reducerar speciellt draghållfastheten.

Betongen har inte provats efter 28 dygns härdning vilket är normal praxis. Alla provobjekt fick en vattenlagring på cirka två månader följt av luftlagring i en till två månader beroende på när provning kunde ske. Den förlängda härdningen i vatten har ökat tryckhållfastheten, något som blir speciellt markant vid närvaro av silika. Detta avspeglar knappast verkliga förhållanden vilket i och för sig 28 dygns vattenlagring ej gör i heller. Den efterföljande luftlagringen är däremot något som avspeglar verkliga förhållanden vilket gör provningsresultaten intressanta ur praktisk synvinkel. Men detta avviker från vad som betraktas som normala standardiserade provningsbetingelser.

I ett laboratorium skiljer sig oftast förutsättningarna från verkliga förhållanden genom att det mesta kan utföras så perfekt som det är möjligt. Detta är knappast fallet vid användning av betong i industriell skala. De parametervärden som kan bestämmas från dessa provningar behöver därför inte nödvändigtvis avspegla de egenskaper som erhålls vid produktion av stora konstruktionselement.

5.2 Betongs tryckhållfasthet

De egenskaper som associeras med betongs tryckhållfasthet är långt ifrån något exakt vilket framgån från de provningsresultat som redovisats i föregående kapitel. Formen på ett provobjekt, kub eller cylinder, provningsobjektets volym och provningshastigheten har ett direkt inflytande på resultaten. Dessutom har temperatur och fuktförhållande också betydelse, något som inte beaktats vid dessa provningar. Inverkan av sådana faktorer kan antingen beaktas vid provningar genom ett lämpligt val av provnings- förutsättningar eller ignoreras genom att speciella referensvärden utnyttjas, något som är fallet vid standardiserad provning.

5.2.1 VISCOELASTISKA EGENSKAPER

Betong har, precis som alla andra material, både ett storleksberoende och ett tidsberoende. Om betong karakteriseras som ett viscoelastiskt material kan inverkan av dessa faktorer på betongens egenskaper uttryckas i form av en storleksparameter och en tidsparameter på det sätt som redovisades i Kapitel 2. Dessa parametrar avspeglar förekomsten av fel i betongen, något som finns naturligt men som också introduceras vid hantering, vibrering och härdning genom ett mindre bra utförande.

Alla tryckprovningar har skett med samma relation mellan diameter och höjd. Påkänningsfördelningen bör därför ha varit relativt likartad vid alla försöken. Vid en relation på $h \times d = 2$ blir den radiella töjningen den som visas i Fig 5.2.1. Inspänningseffekten vid belastningsytorna medför att enbart de centrala delarna utsätts för full påkänning. Vid bestämningen av volymen under påkänning försummas denna variation och en approximativ jämnt fördelad töjning antas gälla. Vid den långsamma belastningen höjdes lasten i små steg tills ett brott inträffade. Detta beaktas inte här utan belastningen antas ha ökat kontinuerligt tills brott uppstått. De förenklade belastnings- antagandena motsvaras av streckade linjer i Fig 5.2.1. Detta innebär att volymen under påkänning enbart blir beroende av provkropparnas dimension och att varaktigheten direkt beroende på belastningshastigheten i förhållande till brottlasten.

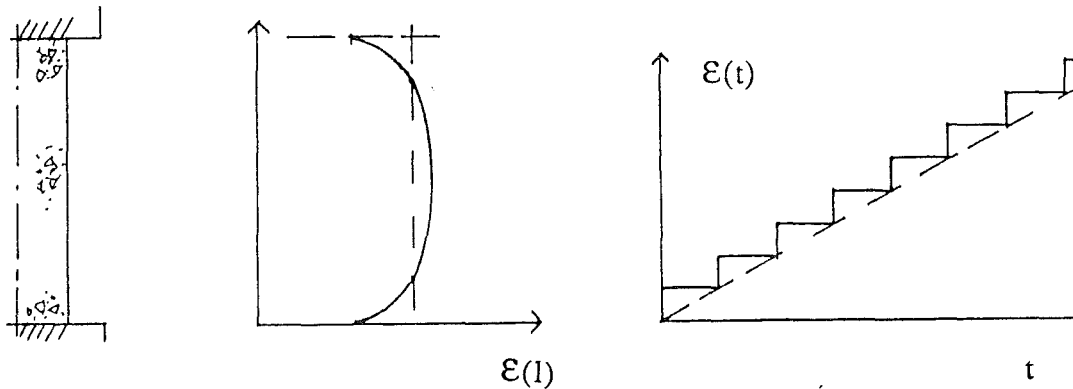


Fig 5.2.1 Töjningsfördelningen i längsled och den tidsberoende ökningen. Streckade linjer motsvarar en linjär approximation.

Inverkan av storleks- och tidsparametern bestäms primärt genom uttrycket

$$R = R_0 \{ a + b(V_0/V)^{1/k} (D_0/D)^{1/h} \}$$

som gör det möjligt att direkt bestämma värdet på k eller h för varierande V och D i förhållande till referensvärdena V_0 och D_0 . De två variablerna a och b , vars summa är ett, avspeglar typen av brott. För ett volymstöjningsbrott är $a \approx 0$ medan $a > 0$ för ett distortionstöjningsbrott där värdet på a avspeglar skjuvhållfastheten hos betongen. Parametervärdena på k och h kan också bestämmas från variationskoefficienten i vissa speciella fall då denna är uppskattad från ett stort underlag.

Från resultaten i Fig 4.2.27 kan storleks- och tidsparametrarna för betong med $v_{ct} = 0.5$ uppskattas. Vid dessa försök skedde brotten explosivt vilket indikerar att det var volymstöjningsbrott. Detta innebär att $a \approx 0$ vid dessa försök. Från medelvärdena kan följande skattningar av parametervärden göras:

| | | |
|-------------------------------|----------|-------------------------------|
| $dxh = 100 \times 200$ | ← | $dxh = 100 \times 200$ |
| $v = 0.7 \text{ MPa/s}$ | $h = 84$ | $v = 0.017 \text{ MPa/s}$ |
| $R = 60.09 \text{ MPa}$ | → | $R = 57.52 \text{ MPa}$ |
| $cov = 0.027$ | | $cov = 0.053$ |
| $\uparrow\downarrow k = 7.60$ | | $\uparrow\downarrow k = 7.03$ |

| | | |
|-------------------------|----------|---------------------------|
| $dxh = 150 \times 300$ | ← | $dxh = 150 \times 300$ |
| $v = 0.7 \text{ MPa/s}$ | $h = 64$ | $v = 0.017 \text{ MPa/s}$ |
| $R = 51.20 \text{ MPa}$ | → | $R = 48.38 \text{ MPa}$ |
| $cov = 0.122$ | | $cov = 0.049$ |

Från dessa resultat framgår att storleksparametern k är cirka 7.3 och att tidsparametern är i storleksordningen 65 – 85. En storleksparameter på cirka 7.3 är lite låg för en betong med denna hållfasthet, men inte orealistiskt. Det relativt låga värdet på storleksparametern avspeglar förmodligen effekten av mindre väl vibrerad betong eller, vilket är troligast, inverkan av alkali kiselsyra reaktioner som får betongen att spricka upp.

Från resultaten i Fig 4.2.28 kan storleks- och tidsparametrarna för betong med $v_{ct} = 0.7$ uppskattas på samma sätt som ovan. Vid dessa provningar framstod brottet som mer segt och cylindrarna hade ofta en timglasform efter brottet. Detta indikerer att det slutliga brottet är mer eller mindre av distortionstöjningskaraktär. I vilken omfattning är svårt att avgöra. Vid bestämning av parametervärden sätts även här $a \approx 0$. Från medelvärdena kan följande skattningar av parametervärden göras:

| | | |
|-----------------------------|----------|-----------------------------|
| $dxh=100 \times 200$ | ← | $dxh=100 \times 200$ |
| $v = 0.7 \text{ MPa/s}$ | $h = 35$ | $v = 0.017 \text{ MPa/s}$ |
| $R = 37.03 \text{ MPa}$ | → | $R = 33.20 \text{ MPa}$ |
| $cov = 0.078$ | | $cov = 0.083$ |
| $\uparrow\downarrow k = 57$ | | $\uparrow\downarrow k = 31$ |

| | | |
|-------------------------|----------|---------------------------|
| $dxh=150 \times 300$ | ← | $dxh=150 \times 300$ |
| $v = 0.7 \text{ MPa/s}$ | $h = 28$ | $v = 0.017 \text{ MPa/s}$ |
| $R = 36.26 \text{ MPa}$ | → | $R = 31.94 \text{ MPa}$ |
| $cov = 0.074$ | | $cov = 0.060$ |

För denna betong är resultaten lite märkliga eftersom det inte är

rimligt med storleksparametrar i storleksordningen 55 – 60. Detta motsvarar en variationskoefficient på cirka 2 procent vilket inte är normalt för betong med $v_{ct} = 0.7$. Med tanke på resultaten för betong med $v_{ct} = 0.5$ så skulle betydligt lägre värden ha förväntats. Men det finns inget uppenbart i provningarna som indikerar på att något fel har begåtts. I stället är det rimligt att anta att det begränsade provningsunderlaget i detta fall är en starkt bidragande orsak till de något märkliga resultaten. Även relativt små förändringar i brottlaster skulle påverka parametervärdena på k och h vilket skulle leda till mer realistiska parametervärden.

Storleksparametern k bör ha ett betydligt lägre värde än det som redovisats ovan. Baserat på variationskoefficienten, vilket också är en tveksam metod, blir storlekskoefficienten cirka 16 vilket i sig är mer rimligt. Tidsparametern h är minst cirka 35 och kanske till och med något högre.

Betongs elasticitetsmodul är egentligen enbart definierad som tangentmodulen för en belastning som går mot noll. För all annan belastning är det bättre att referera till en deformationsmodul som är både storleks- och tidsberoende. Detta framgår av resultaten i Fig 4.2.27 och Fig 4.2.28 där sekantmodulen för olika belastningsnivåer är given. Denna effekt kan bli än mer märkbar vid krypning under konstant spänning.

5.2.2 NORMALISERAD CYLINDERTRYCKHÅLLFASTHET

Referensegenskaper hos betong anges vid provning av cylindrar med dimensionen $d_{xh} = 100 \times 200$ mm vid belastningshastigheten 0.8 MPa/s efter härdning på normenligt sätt i 28 dygn. På grund av en förlängd härdningstid ska de värden som redovisats ovan reduceras med en faktor på 0.9 baserat på tidigare erfarenheter från provningar med Isländsk betong /2/. Detta påverkar direkt brottlasten men inte på samma sätt E -modulen eftersom den bestäms vid en låg påkänningsnivå. För de två kvaliteterna som provats kan följande tryckhållfasthetsegenskaper uppskattas från provningarna:

Tab 5.2.1

| Vattencementtal | Brottlast MPa | Elasticitetsmodul GPa |
|-----------------|------------------------|--------------------------|
| 0.5 | $0.9 \times 60 = 54$ | 39.6 |
| 0.7 | $0.9 \times 37 = 33.3$ | 26.3 |

Elasticitetsmodulen är här bestämd som sekantmodulen vid en tryckpåkänning som motsvarar 30 – 40 % av brotthållfastheten vid standardiserad provning /3/. Förmodligen kan en lägre E- modul i relation till tryckhållfastheten (se fig 5.2.2) förklaras av ballastens egenskaper dvs. poröst ballast ger lägre E-modul än tät ballast (se tab. 3.2.1 och 3.2.2).

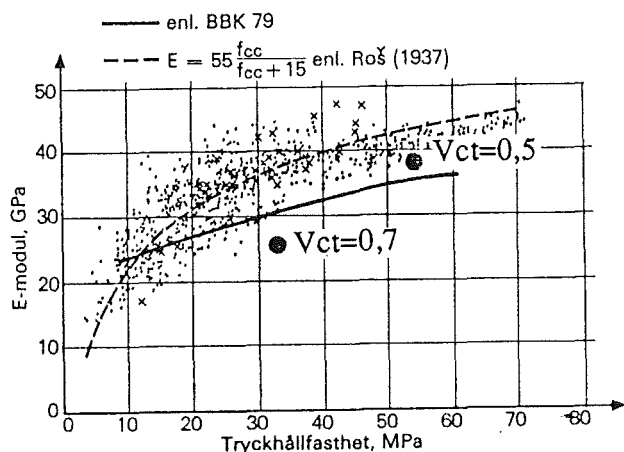


Fig 5.2.2 E- modulen som funktion av tryckhållfastheten för betong med normal Portlandcement från en stor mängd provningar /1/ och resultaten från dessa provningar.

5.2.3 NORMALISERAD CUBTRYCKHÅLLFASTHET

Resultaten från kubprovningarna visas i Fig 5.2.3 i ett diagram som redovisar vilken hållfasthet som kan förväntas för ett givet vct med Portlandcement efter 28 dygn. Det framgår klart att tryckhållfastheterna för ett givet vct med Isländsk betong ligger klart över den medelkurva som anges. Detta beror som tidigare nämnts på inblandning av silika, som ökar hållfastheten med cirka 10 % och en förlängd härdning på mer än 90 dygn, som ökar hållfastheten med cirka 10- 15%.

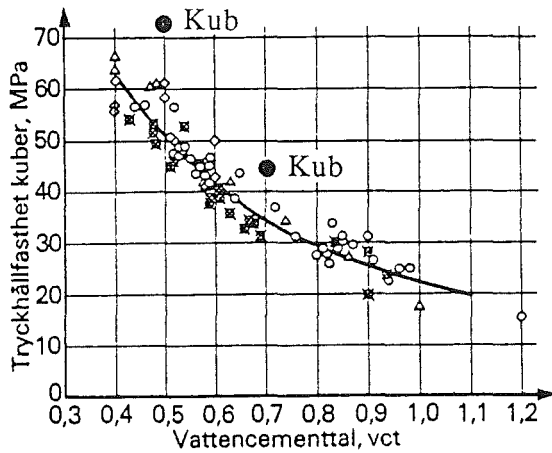


Fig 5.2.3 Samband mellan vct och förväntad tryckhållfasthet med Portlandcement efter 28 dygn. /1/

5.2.4 RELATIONEN CYLINDER - KUBHÅLLFASTHET

Cylinderhållfastheten är normalt alltid lägre än kubhållfastheten för en given betongkvalitet, ofta i storleksordningen 80%. I Fig 5.2.4 visas de relationer som ofta utnyttjas för att transformera resultat uppnådda med en provningsmetod till en annan. De resultat som erhållits vid dessa försök finns också redovisade och överensstämelsen är mycket god. Det bör påpekas att jämförelsen är baserad på torr cylinder och torr kub. Relationen tycks alltså bli lika vare sig provobjekten är våta eller torra.

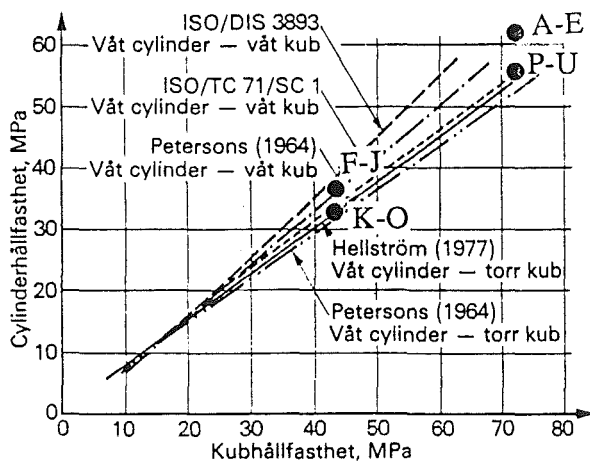


Fig 5.2.4 Samband mellan cylinder- och kubhållfasthet. /1/

5.3. Betongs draghållfasthet

Betongs draghållfasthet är också en viktig egenskap. Förr ansågs draghållfastheten vara cirka 10% av tryckhållfastheten medan det idag har visat sig vid provning av höghållfast betong (75 – 150 MPa) att draghållfastheten är proportionell mot roten ur tryckhållfastheten eller något liknande.

Draghållfastheten som är låg påverkas lätt av parasitmoment på grund av miljöpåverkan. Till exempel så sjunker draghållfastheten markant vid uttorkning på grund av sprickbildning i ytan. På grund av självläkning kan det mesta av hållfasthetsförlusten återfås när fuktgradienten försvunnit. Men vid upprepade temperatur och fuktvariationer finns ofta en tendens för draghållfastheten att sjunka med antalet cykler, en effekt som ofta karakteriseras som statisk utmattnings.

En reduktion av draghållfastheten erhålls också vid inre förstörelse av betongen. Detta sker till exempel vid frysskador och vid alkali kiselsyra reaktioner. För Isländsk betong är den senare effekten direkt påtaglig genom att ballasten är reaktiv.

Vid provningarna fanns inga synliga effekter av alkali kiselsyra reaktioner. Men överblivna cylindrar visade klara indikationer på alkali kiselsyra reaktioner senare genom att ett fint sprickmönster var synligt på ytan. Det är därför rimligt att anta att denna reaktion startade direkt efter gjutningen och att den förlängda härdningstiden medfört att inre skador hunnit att uppstå. Detta bör beaktas vid utvärderingen av provningsresultaten för böjdragprovningen.

5.3.1 BÖJDRAGPROVNING

Böjdragprovningarna som redovisats Kapitel 4.4 visade att böjdraghållfastheten var avsevärt lägre än förväntat. Även spridningen var större än vad som normalt förväntas. Båda dessa effekter tyder på att alkali kiselsyra reaktioner ägde rum vilket kontinuerligt påverkar draghållfastheten negativt. Resultatet från böjdragprovningarna tillsammans med förväntad böjdraghållfasthet för normal Portlandcement visas i Fig 5.3.5. Det framgår att reduktionen av böjdraghållfastheten är störst för betong med vct 0.5.

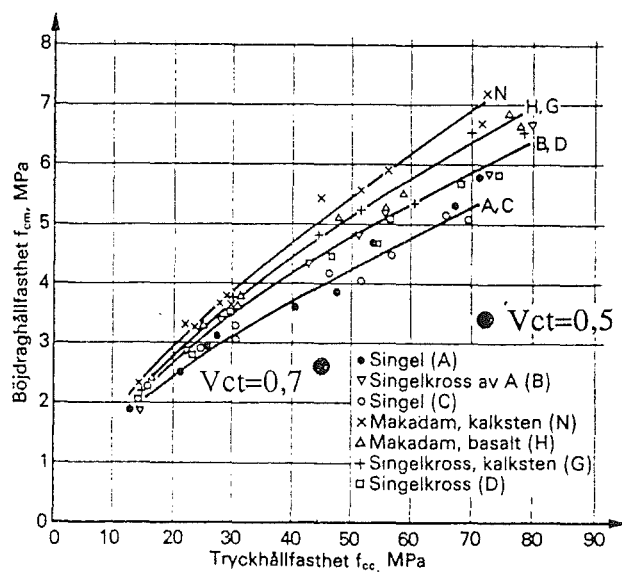


Fig 5.3.5 Jämförelse mellan uppnådda resultat vid böjdragprovning och de samband som normalt gäller för betong med Portlandcement med olika ballast. /1/

5.4 Sammanfattning

Isländsk betong har precis som all annan betong sina fördelar och nackdelar. Till fördelarna hör att en exceptionellt hög tryckhållfasthet kan uppnås vida goda härdningsförhållanden. Även draghållfastheten är förmodligen mycket bra initieilt. Men risken för alkali kiselsyra reaktioner är högst påtaglig vilket medför att både tryckhållfastheten och draghållfastheten påverkas. Detta är mest markant vid provning av draghållfastheten men även tryckhållfastheten blir påverkad.

Då alkali kiselsyrareaktioner sker i betong blir effekterna direkt påtagliga. Den expansion som uppstår vid alkali kiselsyra reaktionen kan ses som en generering av nya fel i en betong. Detta innebär att effekterna ökar med ökande volym under påkänning och ökande varaktighet av en belastning. Detta innebär att både storlekseffekten och tidseffekten blir mer påtaglig.

Effekten av alkali kiselsyra reaktioner är mest markant för betong med lågt vct. Detta är naturligt eftersom denna betong är tätast vilket innebär att mycket litet utrymme finns för de kemiska produkter som bildas vid alkali kiselsyra reaktionen. I och för sig skulle en tät betong ha ett högt diffusionsmotstånd vilket skulle

fördröja inträngningen av vatten i betong. Detta är möjligt men fördröjningen är inte större än att högst påtagliga effekter av alkali kiselsyra reaktioner är fullt märkbara efter några månader. Effekterna blir förmodligen likartade för all betong oavsett vilket vct som en betong har om den kemiska reaktionen bara får pågå tillräckligt lång tid. Denna undersökning har visat att för betong med vct på 0.5 påverkas inte bara draghållfastheten utan också tryckhållfastheten medan för betong med vct på 0.7 så är det i första hand draghållfastheten som påverkas. Förmodligen kommer ett ökat storleksberoende också att visa sig här också för tryckhållfastheten. Eftersom effekterna av alkali kiselsyra reaktioner utvärderas bäst genom försök så finns det anledning att fortsätta denna verksamhet.

LITTERATURFÖRTEKNING.

- / 1 / Betonghandbok, Material. AB Svensk Byggtjänst, 2:e uppl, Stockholm, 1982.

- / 2 / Sementseftirlit 1985, Ransoknarskýrsla nr. H86-02. Ransoknarstofnun byggingaridnadarins, Keldnaholti 112 Reykjavík, 1986.

- / 3 / Hillerborg, A: Allmän kurs i byggnadsmateriallära. Tekniska Högskolan i Lund, 1983.

- / 4 / Ransoknir a ahrifum ksilriks a eiginleika sements og steinsteypu, Ransoknarstofnun byggingaridnarins, Linuhönnun hf. Reykjavík, 1985.

- / 5 / Petursson,P: Steinefni i bundin slitlög, tilraunakaflar. Reykjavík 1986.

- /6/ Tjalniefni i steinsteypu, Ransoknarstofnun byggingaridnadarins. Keldnaholti 112 Reykjavík,1986.

- /7/ Rb-blöd, Ransoknarstofnun byggingaridnadarins. Keldnaholti 112 Reykjavík.

- /8/ Sentler,L: A strength theory for viscoelastic materials, Document D9:1987, Swedish Council for Bulding Research, Stockholm, 1987.

- / 9 / Timoshenko, S.P and Goodier,J.N: Theory of elasticity, McGraw-Hill, New York, 1970.

- / 10 / BYGG, del 1. Allmänna grunder. 3:e uppl, Stockholm, 1959.

- / 11 / Petursson,P: Steinefni i bundin slitlög, tilraunakaflar og efnisprofanir. Reykjavík 1987.

- / 12 / Hillerborg, A: Kompendium i byggnadsmateriallära FK. Tekniska Högskolan i Lund, 1986.