



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

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



Rapport

R86:1978

**En undersökning av
betongens
utmattningshållfasthet**

Ralejs Tepfers



601228947

601228947

Byggforskningen

R86:1978

EN UNDERSÖKNING AV BETONGENS
UTMATTNINGSHÅLLFASTHET

Ralejs Tepfers

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 771296-2
från Statens råd för byggnadsforskning till Avdelningen
för husbyggnadsteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg

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

Nyckelord:

betong
lätballastbetong
utmattning
hållfasthet

UDK 691.327.32
620.178.3

R86:1978

ISBN 91-540-2922-8
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1978 857797

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	5
SAMMANFATTNING	7
1. ANVÄNDA BETECKNINGAR	11
2. PROJEKTETS UPPLÄGGNING I TRE DELPROJEKT	12
3. ANALYS AV UTTRYCK FÖR BETONGS UTMATTNING VID TRYCKPÅKÄNNINGAR	14
3.1 Bakgrund och målsättning	14
3.2 Underlag	16
3.3 Bestämning av materialkoefficienten β	16
3.4 Analys av ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$	20
3.5 Sammanfattning och slutsatser	31
4. UNDERSÖKNING AV BETONGENS DRAGHÅLLFASTHET VID UTMATTNING	32
4.1 Inledning och målsättning	32
4.2 Försöksprogram	34
4.3 Betongens sammansättning och provkropparnas tillverkning	38
4.4 Betongens statistiska hållfasthet	39
4.5 Belastningsapparat	42
4.6 Resultat från utmattningsförsöken	43
4.7 Analys av utmattningsförsöken	47
4.8 Sammanfattning och slutsatser	58
5. UNDERSÖKNING AV BETONGENS UTMATTNINGSHÅLL- FASTHET VID MELLAN TRYCK OCH DRAG VÄXLANDE PÅKÄNNINGAR	59
5.1 Inledning och målsättning	59
5.2 Försöksprogram	64
5.3 Betongens sammansättning	71

5.4	Betongens statiska hållfasthet	73
5.5	Provningsanordning för utmattningsförsök	78
5.6	Resultat från utmattningsförsöken	81
5.7	Sammanfattning och slutsatser	99
6.	REFERENSER	101
7.	BILAGA	105-121

FÖRORD

De undersökningar, för vilka redogöres i denna skrift, ingår som delprojekt i den forskning rörande betongens utmattningssegenskaper, vilken bedrivs vid Avdelningen för Husbyggnadsteknik vid Chalmers Tekniska Högskola.

Hittills utförda undersökningar inom forskningsprogrammet vid avdelningen berör ordinära betongens och lättballastbetongens utmattningsbenägenhet vid tryckpåkänning, inverka av lastpulsformen på betongens utmattningshållfasthet och deformationsförlopp vid tryckpåkänningar och Palmgren-Miners delskadehypotes användbarhet för att bedöma betongens utmattningsbenägenhet. Dessa har rapporterats i publikationer som återfinnes i referenslistan.

I föreliggande skrift behandlas tre undersökningar. I den första utredes betongens utmattningsbenägenhet för tryckpåkänningar med egna prov och försök redovisade i tillgänglig litteratur. Resultatet från denna utredning används i analyserna i den andra undersökningen, där betongens utmattning undersöks för dragpåkänningar alstrade i kubspräckprov. I den tredje och sista undersökningen redovisas forskningsresultat, där de utmattande påkänningarna växlar mellan drag och tryck i kubspräckprov.

Bearbetningen av försöksmaterialet och rapporteringen av detta i dessa tre undersökningar har stötts av Statens Råd för Byggnadsforskning inom ramen för projekt nr 771296-2. Utan detta stöd hade resultaten i dessa undersökningar svårligen kunnat bringas till kännedom.

För undersökningarnas genomförande har Avdelningen för Husbyggnadstekniks och Avdelningen för Byggnadsmaterials resurser ställts till förfogande genom tillmötesgående av professor Lars-Erik Larsson och bitr. professor Roman Malinowski.

För det stöd föreliggande undersökningar rönt uttryckes härmed ett stort tack.

Till avdelningarnas personal, som genom sina arbetsinsatser främjat tillkomsten av undersökningarnas resultat, liksom till sekreteraren Marianne Hedfors, som maskinskrivit skriften och lab.ass. Valborg Ekman som ritat figurerna framföres ett varmt tack.

Göteborg i juni 1978

Ralejs Tepfers

SAMMANFATTNING

Undersökningen omfattar tre delprojekt. Det första behandlar betongens och lättballastbetongens utmattningsbenägenhet för tryckpåkänningar. Det andra penetrerar betongens utmattningsbenägenhet för dragpåkänningar. I det tredje projektet undersöks betongens utmattning när påkänningarna växlar mellan drag och tryck.

Projekt 1

Betongens utmattningsbenägenhet vid tryckpåkänningar kan principiellt beskrivas med en ekvation föreslagen av Aas-Jacobsen (1970). Ekvationen stipulerar att Wöhlerdiagram för betong upprättas för konstanta värden på $R = \sigma_{cc}^{\min} / \sigma_{cc}^{\max}$. I undersökningen har utmattningssegenskaper vid tryckpåkänningar för ordinär betong med densitet 2250 kg/m^3 jämförts med lättballastbetonger med densiteter ned till 1500 kg/m^3 . Osäkerheter i utmattningsresultaten inträffar för $\sigma_{cc} / f_{ccc} \geq 0,8$. Detta beror på svårigheter att exakt kunna bestämma de enskilda provkropparnas statistiska tryckhållfastheter samt på tillkommande krypeffekter. Med försök rapporterade i litteraturen, totalt 475 utmattningsprov, har den i Aas-Jacobsens ekvation ingående materialparametern β bestämts till 0,0685. Inga skillnader i utmattningsbenägenhet föreligger mellan betongerna, varför ekvationen kan användas för båda betongtyperna och skrivas:

$$\frac{\sigma_{cc}^{\max}}{f_{ccc}} = 1 - 0,0685(1 - R) \log_{10} N;$$

där

$$\sigma_{cc}^{\max} = \text{övre tryckspänningsgräns}$$

$$\sigma_{cc}^{\min} = \text{undre tryckspänningsgräns}$$

$$f_{ccc} = \text{statisk tryckhållfasthet}$$

$$R = \sigma_{cc}^{\min} / \sigma_{cc}^{\max}$$

$$N = \text{antal lastcykler vid utmattningsbrott}$$

Ekvationen gäller för $0 \leq R \leq 1,0$.

Projekt 2

De utförda försöken har gett att betongens utmattningsbenägenhet vid dragpåkänningar kan principiellt beskrivas med samma ekvation som för tryckpåkänningar. Den skrives

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 1 - 0,0685 (1 - R) \log_{10} N$$

där

$$\sigma_{ct}^{\max} = \text{övre dragspänningsgräns}$$

$$\sigma_{ct}^{\min} = \text{undre dragspänningsgräns}$$

$$f_{ct} = \text{statisk draghållfasthet}$$

$$R = \sigma_{ct}^{\min} / \sigma_{ct}^{\max}$$

$$N = \text{antal lastcykler vid utmattningsbrott}$$

Ekvationen gäller för $0 \leq R \leq 1,0$,

Ekvationen betyder att Wöhler-kurvor måste upprättas för konstanta R-värden.

Utmattningsförsöken har utförts på kubspräckprov med en ej helt väldefinierad dragspänningsfördelning. Spänningsfördelningen påverkar dock inte resultatet, då redovisning sker dimensionslöst genom att sätta utmattande spänning i relation till statisk spänning. Båda spänningarna har samma fördelning varvid i båda fallen brottet utlöses av maximala dragspänningen i fördelningen. Två betonghållfastheter har provats och utmattningsbenägenheten för dragpåkänningar har konstaterats vara oberoende av dessa hållfasthetsnivåer. Försöken har utförts med $R = 0,20, 0,30$ och $0,40$. Totala antalet försök har varit 81 uppdelade på sex serier.

Projekt 3

Brott i betong vid uniaxiella påkänningar kan nämligen uppfattas vara orsakade av enbart dragpåkänningar. Vid dragbelastning sker brott på grund av överskridande av draghållfasthet i belastningsriktningen och vid tryckbelastning vinkelrätt emot belastningsriktningen av samma orsak, som yttrar sig som betongprovets uppspaltning av sprickor i lastangreppsriktningen. Då dessa dragspänningar verkar vinkelrätt emot varandra och ej uppträder samtidigt, kan det antas att de icke ger samverkande brotteffekter. Hypotesen stödes av Crepps (1923) undersökningar.

Utmattningsundersökningen med mellan drag och tryck växlande spänningar ger att sannolikt bestämmas betongens utmattning av den utmattande maximala påkänning, antingen tryck eller drag, som utgör den största andelen av respektive statistiska hållfasthet. Oberoende av faktiska värdet uppfattas undre spänningsgränsen därvid alltid vara noll. Då kan betongens utmattningsbenägenhet uppskattas med ovan angivna ekvationer för tryckpåkänningar och för dragpåkänningar. Ekvationerna kan sammanfattas för mellan drag och tryck växlande påkänningar på följande sätt.

$$\frac{\sigma_C^{\max}}{f_C} = 1 - 0,0685 (1 - R) \log_{10} N$$

där

$$\sigma_C^{\max} = \text{övre tryck- eller dragspänningsgräns}$$

$$f_C = \text{statisk tryck- eller draghållfasthet}$$

$$\frac{\sigma_C}{f_C} = \text{insättes med det högsta värdet gällande för drag eller tryck}$$

$$R = 0$$

$$N = \text{antalet lastväxlingar vid utmattningsbrott}$$

Försöken i detta projekt har utförts med kubspräckprov i vilka en tryckspänning införts med en konstant verkande last. Den pulserande dragspänningen har vid utmattningsförsöken bringats att överlagra tryckspänningen. Genom att

välja lasternas storlek har önskade spänningsgränser erhållits. Totala antalet försök är 85.

Utmattningsförsöken med mellan tryck och drag växlande påkänningar uppvisar stor spridning, som antagligen beror på ofullkomlighet i belastningsanordningarna. Dock kan iakttagas grupperingar i försöksvärdepopulationen, som tyder på att den anförda hypotesen är riktig. Emellertid så länge absolut visshet icke råder över orsakerna till den konstaterade spridningen i försöksvärdena måste ovan skisserat beräkningsförfarande fortfarande anses vara osäkert.

1. ANVÄNDA BETECKNINGAR

N	antal belastningscykler vid utmattningsbrott
N_C	teoretiskt beräknat värde på N
N_m	uppmätt värde på N vid utmattningsbrott
P	vertikalt verkande linjelast (spräcklast)
Q	horisontellt verkande, jämnt över hela kubsidan fördelad last
a	betongkubens kantlängd
f_{cc}	statisk kubtryckhållfasthet, objekthållfasthet
f_{ccc}	statisk cylindertryckhållfasthet
f_{ct}	statisk spräckdraghållfasthet
σ_{cc}^{max}	övre tryckspänningsgräns vid pulsering
σ_{cc}^{min}	undre tryckspänningsgräns vid pulsering
σ_{cc}^m	$(\sigma_{cc}^{max} + \sigma_{cc}^{min})/2$
σ_{ct}	spräckdragspänning
σ_{ct}^{max}	övre spräckdragspänningsgräns vid pulsering
σ_{ct}^{min}	undre spräckdragspänningsgräns vid pulsering
σ_{ct}^m	$(\sigma_{ct}^{max} + \sigma_{ct}^{min})/2$
R	$\frac{\sigma_{cc}^{min}}{\sigma_{cc}^{max}}$ eller $\frac{\sigma_{ct}^{min}}{\sigma_{ct}^{max}}$
r	regressionskoefficient
n	antal försöksvärden
C, m	koefficienter för rät regressionslinje $y = mx + C.$
s	standardavvikelse

2. PROJEKTETS UPPLÄGGNING I TRE DELPROJEKT

Föreliggande skrift behandlar tre delprojekt av vilka det andra är kopplat till det första och det sista till de två föregående.

Det första projektet utreder möjligheter att använda en av Aas-Jacobsen (1970) föreslagen ekvation för betongens utmattning vid tryckpåkänningar. I ekvationen ingående materialkonstant bestämmas med hjälp av egna och i litteraturen redovisade resultat. Analysförfarandet vid utvärdering av resultat från utmattningsprovning diskuteras därvid. Ekvationens tillämplighet påvisas och därmed införas ett systematiskt betraktelsesätt vid provning och analys av resultat från utmattningsprovning av oarmerad betong utsatt för tryckpåkänningar.

I det andra projektet undersöks betongens utmattningsbenägenhet för dragpåkänningar. På grund av sin enkelhet i belastning och robusthet väljes kubspräckprovning som testmetodik. Eftersom detta prov ej har ett väldefinierat spänningstillstånd, så är det otvetydigt att brottet både statistiskt och i utmattning orsakas av draghållfasthetens överskridande i analoga spänningstillstånd. Då utmattningsbenägenheten relateras till den statistiska hållfastheten kommer betongens utmattning för dragpåkänningar ej att störas av spänningstillståndets komplexitet. I undersökningen bestämmas betongens utmattningsbenägenhet för dragpåkänningar och jämföres med den för tryckpåkänningar fastställd i det första projektet.

Den tredje undersökningen behandlar utmattningsbenägenhet hos oarmerad betong, då den utsättes för mellan tryck och drag växlande påkänningar. Även här användes kubspräckprovet som testmetod, därför att lastpåläggningsen är enkel. Resultaten i de båda föregående projekten lägges till grund för analys av resultaten i detta projekt. Undersökningens bashypotes utgår från antagandet att i spänningsamplituden ingående tryckspänningar ej påverkar betongens dragutmattningsbenägenhet.

ning. Denna orsakas enbart av i spänningsamplituden ingående dragpåkänningar. Motsvarande gäller för betongens tryckutmattning. Hypotesen stöds på undersökningar av Crepps (1923).

3. ANALYS AV UTTRYCK FÖR BETONGS UTMATTNING VID TRYCKPÅKÄNNINGAR

3.1 Bakgrund och målsättning

Med betongens Wöhler-kurva, eller som den även kallas S-N-diagram, menas sambandet mellan pålagd maximal spänning σ_{cc}^{\max} och det antal lastpulser N som leder till utmattningsbrott hos provet. Vid bestämning av en Wöhler-kurva hålls vanligen den pulserande spänningens minimivärde konstant, medan den maximala spänningen varieras för olika prov. Ibland bestäms dock Wöhler-kurvan för konstanta spänningsamplituder. Dessa förfaranden är sinsemellan ej jämförbara. Båda används emellertid och ofta sätts felaktigt ett likhetstecken dem emellan. I enkellogaritmiska koordinatsystem har betongens utmattningskurvor i båda fallen kunnat approximativt uppfattas som rätlinjiga. Man har även slutit sig till att utmattningsbenägenheten är oberoende av betongens hållfasthet och därför kunnat redovisa Wöhler-kurvans spänningskoordinat dimensionslös som maximal spänning i relation till statiska hållfastheten $\sigma_{cc}^{\max}/f_{ccc}$.

Med värden hämtade ur Wöhler-kurvor, vilka framställts på ovan beskrivna sätt, visar Aas-Jacobsen (1970) att sambandet mellan $\sigma_{cc}^{\max}/f_{ccc}$ och $\sigma_{cc}^{\min}/f_{ccc}$ är ungefär rätlinjigt för utmattningsbrott vid $N = 2 \cdot 10^6$ lastrepetitioner. Detta samband och Wöhler-kurvans räta linje har Aas-Jacobsen (1970) kombinerat i formeln

$$\frac{\sigma_{cc}^{\max}}{f_{ccc}} = 1 - \beta(1 - R) \log_{10} N \quad \dots (3.1)$$

Aas-Jacobsen anger $\beta = 0,064$.

Ekvationen kan användas för $0 \leq R \leq 1,0$ och ej för mellan tryck och drag växlande utmattande påkänningar. Som framgår av FIG. 3.1. a) och b) beskriver ekvation (3.1) samtidigt Wöhler-kurvan och Smith-diagrammet. Om ekvation (3.1) gäller skall Wöhler-kurvor ej baseras på mätningar där amplituden eller undre spänningen σ_{cc}^{\min} hålls konstant, utan på ett konstant $R = \sigma_{cc}^{\min} / \sigma_{cc}^{\max}$. I fortsättningen kommer att visas, dels med egna försöksvärden och dels med försöksmaterial framlagt av andra forskare, att betraktelsesättet med ekvation (3.1) med stor sannolikhet är det riktiga.

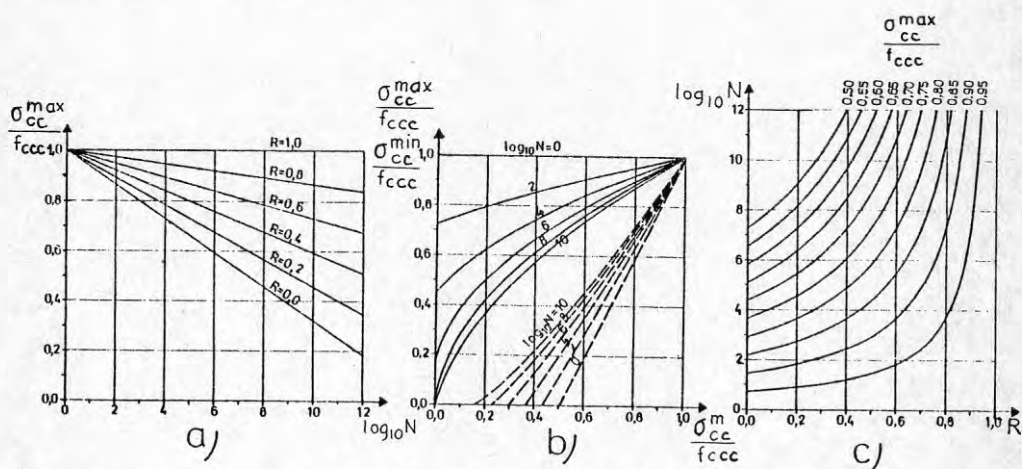


FIG. 3.1 Samband som ekvation (3.1) representerar,

a) Wöhler-kurvor för olika R-värden

b) Smith-diagram för olika $\log_{10} N$ -värden

c) Sambandet $\log_{10} N = f(R)$ för olika $\sigma_{cc}^{\max} / f_{ccc}$ -värden.

3.2 Underlag

I ekvation (3.1) ingår en materialkoefficient, β . För ordinär betong har Aas-Jacobsen (1970) angivit dess värde till 0,064 och baserat det på de Smith-diagram som Graf & Brenner (1934) och (1936) samt Gaede (1962) presenterade. För att få en mer nyanserad uppfattning om koefficienten β analyseras nu resultat från ett antal tillgängliga undersökningar för ordinär betong och lättballastbetong.

För ordinär betong används försöksvärden givna av Graf & Brenner (1934) och (1936), Antrim & Mc Laughlin (1959), Assimacopoulos, Warner and Ekberg (1959), Gaede (1962), Bennett & Muir (1967), Tepfers, Görlin and Samuelsson (1973), Tepfers, Fridén och Georgsson (1977) samt försöksresultat ur serie 1 i Tepfers & Kutti (1977).

De använda försöksvärdena för lättballastbetong är hämtade från Gray, Mc Laughlin och Antrim (1961), Weigler & Freitag (1975) samt från serie 2 och 3 i Tepfers & Kutti (1977).

Försöksvärdena återges i BILAGA, TABELL 3.1 t o m 3.13. I Bennett & Muirs undersökning har försöksvärden avlästs ur Wöhler-diagram. I övriga undersökningar har de hämtats direkt från tabeller. Gray, Mc Laughlin & Antrim har ej angivit densiteten för sin lättballastbetong, men den antas ligga inom intervallet 1500 - 1800 kg/m³.

3.3 Bestämning av materialkoefficienten β .

Med i BILAGA, TABELL 3.1 t o m 3.13 angivna värden på $\sigma_{cc}^{max}/f_{ccc}$, R och $\log_{10} N_m$ beräknas för varje enskilt försök koefficienten β . Resultaten från dessa beräkningar presenteras med hjälp av histogram, i FIG. 3.3.1 för ordinär betong och i FIG. 3.3.2 för lättballastbetong. Av normalfördelningskurvorna som inlagts i varje histogram framgår att spridningen i β -värdena är betydande.

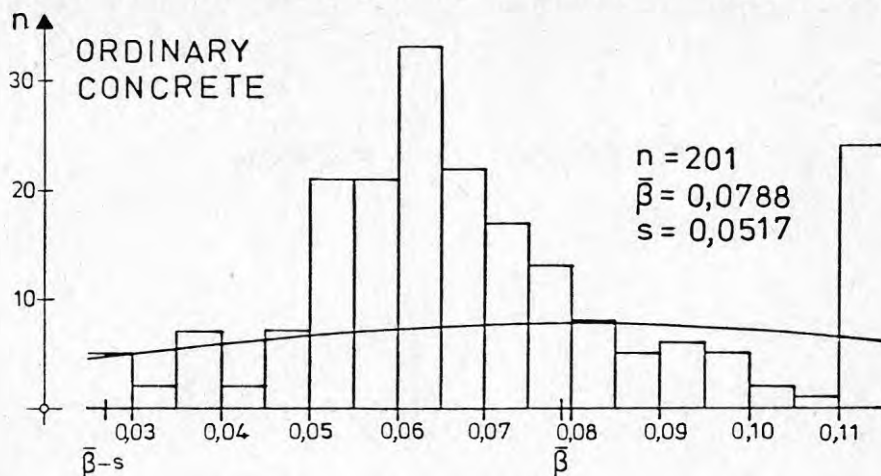


FIG. 3.3.1 Histogram över samtliga β -värden med ekvation (3.1) för ordinär betong. Försöksantal = 201. Medelvärde $\bar{\beta} = 0,0788$ och standardavvikelse $s = 0,0517$. $n =$ antal värden.

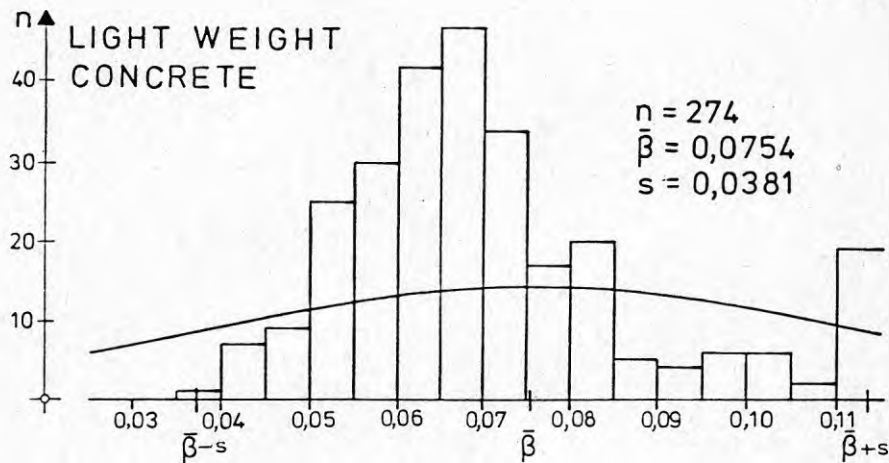


FIG. 3.3.2 Histogram över samtliga β -värden med ekvation (3.1) för lättballastbetong. Försöksantal = 274. Medelvärde $\bar{\beta} = 0,0754$ och standardavvikelse $s = 0,0381$. $n =$ antal värden.

Då det för närvarande saknas teknik att icke förstörande exakt bestämma de enskilda provernas f_{CCC} -värden måste man vid utmattningsförsöken arbeta med medelvärden på f_{CCC} , bestämda på andra provkroppar inom samma serie än de som utmattningsprovas. Avvikelse på 5% från medelvärdet för statistiska tryckhållfastheten f_{CCC} inom samma serie förekommer. Utmattningsbenägenheten är emellertid känslig för sådana avvikelser, speciellt för $\sigma_{CC}^{max}/f_{CCC}$ -värden $\geq 0,8$. Av FIG. 3.1c framgår att en förändring av $\sigma_{CC}^{max}/f_{CCC}$ från 0,95 till 0,90, vilket motsvarar en ~5%-ig avvikelse mellan antaget och sant f_{CCC} , ger för $R = 0$ en ökning av $\log_{10} N$ på 100%. En ökning i $\log_{10} N$ orsakad av 5%-ig avvikelse i f_{CCC} , då $\sigma_{CC}^{max}/f_{CCC}$ ändras från 0,80 till 0,76 är endast 20%. Histogram över β -värden, där försök med $\sigma_{CC}^{max}/f_{CCC} \geq 0,8$ ej medtagits, måste därför ge en mer rättvisande bild.

I FIG. 3.3.3 och 3.3.4 presenteras β -värden för $\sigma_{CC}^{max}/f_{CCC} < 0,8$. Spridningen är reducerad och β -populationernas normalfördelning börjar framträda. Medelvärdet $\bar{\beta}$ för båda betongtyperna är praktiskt taget detsamma, 0,0679 för ordinär betong och 0,0694 för lättballastbetong. Standardavvikelserna för de olika betongerna, $\sigma = 0,0127$ resp. 0,0108, skiljer sig emellertid något från varandra. För lättballastbetong är standardavvikelsen något mindre, vilket torde bero på att försöksmaterialet är hämtat ur enbart tre källor. Dessutom är försöken med denna betongtyp av yngre datum, vilket möjliggjort användandet av modernare belastningsmaskiner med större precision. Det är därför rimligt att påstå att materialkoefficienten β är densamma för ordinär betong och lättballastbetong inom densitetsintervallet 1500 - 1800 kg/m³. Med stor sannolikhet gäller påståendet alla betonger, vars densiteter varierar mellan 1500 och 2250 kg/m³.

En sammanställning av β -värdena för båda betongtyperna redovisas i histogrammet, FIG. 3.3.5. Medelvärdet $\bar{\beta} = 0,0687$ svarar då mot en för dessa betonger gemensam materialkoefficient. I fortsättningen har dock valts att arbeta med $\beta = 0,0685$.

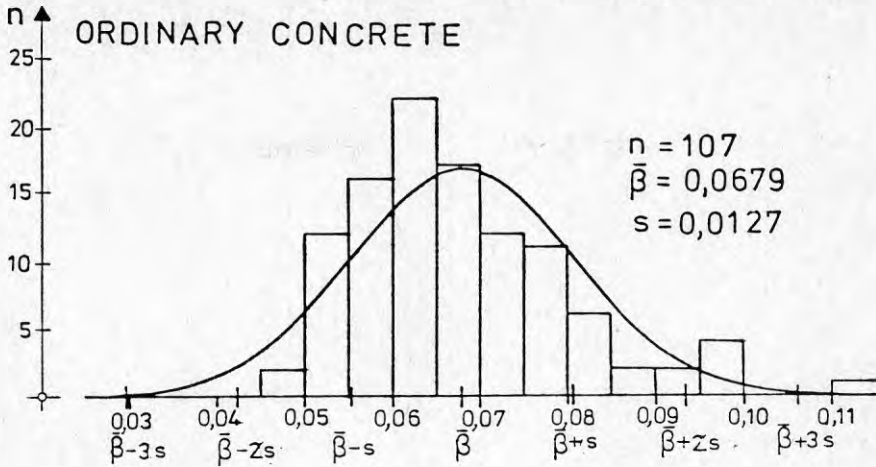


FIG. 3.3.3 Histogram över samtliga β -värden beräknade med ekvation (3.1) när $\sigma_{cc}^{\max}/f_{ccc} < 0,8$ för ordinär betong. Försöksantal = 107. Medelvärde $\bar{\beta} = 0,0679$ och standardavvikelse $s = 0,0127$. n = antal värden.

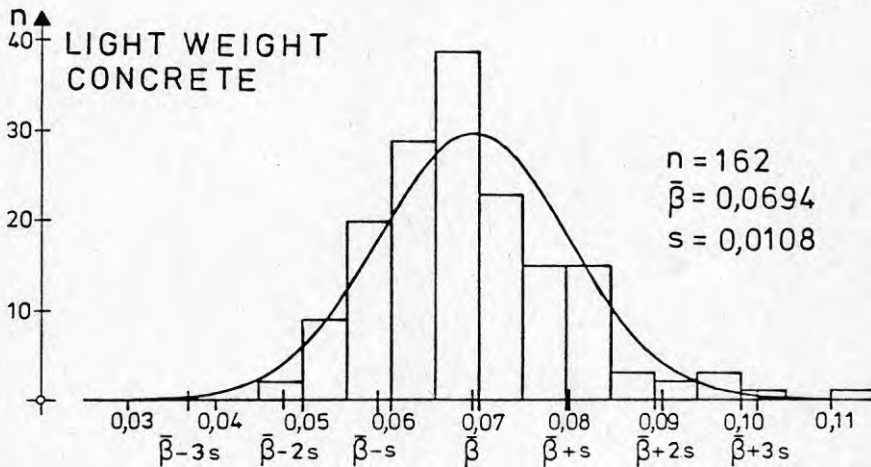


FIG. 3.3.4 Histogram över samtliga β -värden beräknade med ekvation (3.1) när $\sigma_{cc}^{\max}/f_{ccc} < 0,8$ för lättballastbetong. Försöksantal = 162. Medelvärde $\bar{\beta} = 0,0694$ och standardavvikelse $s = 0,0108$. n = antal värden.

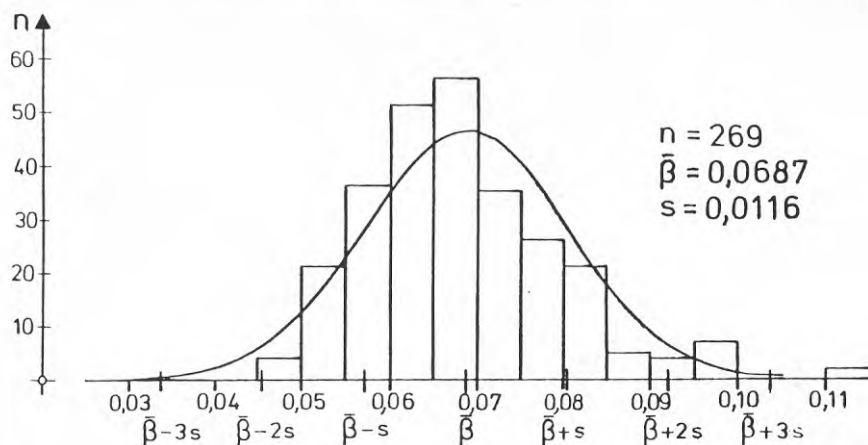


FIG. 3.3.5 Histogram över samtliga β -värden beräknade med ekvation (3.1) när $\sigma_{cc}^{\max}/f_{ccc} < 0,8$ för ordinär betong och lättballastbetong. Försöksantal = 269. Medelvärde $\bar{\beta} = 0,0687$ och standardavvikelse $s = 0,0116$. n = antal värden.

3.4 Analys av ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$

Sambanden mellan, med ekvation (3.1) och $\beta = 0,0685$, beräknade och uppmätta värden på N visas för enskilda utmattningsprov i FIG. 3.4.1 - 3.4.4. FIG. 3.4.1 och 3.4.3 representerar ordinär betong och FIG. 3.4.2 och 3.4.4 lättballastbetong. Rätlinjig regressionsanalys har utförts och 95%-igt konfidensband angivits. Streckade linjer i 45° :s lutning har inlagts och svarar mot fullständig överensstämmelse mellan ekvation (3.1) och försök.

I FIG. 3.4.1 och 3.4.2 där prov med $\sigma_{cc}^{\max}/f_{ccc} \geq 0,8$ ej medtagits, grupperar sig försökspunkterna tämligen väl kring 45° :s linjerna. Linjen i FIG. 3.4.1. ligger dock inte inom konfidensbandet. Detta beror huvudsakligen på att försöksvärdepopulationen är koncentrerad och därigenom svagt riktningsbestämmande för konfidensbandet.

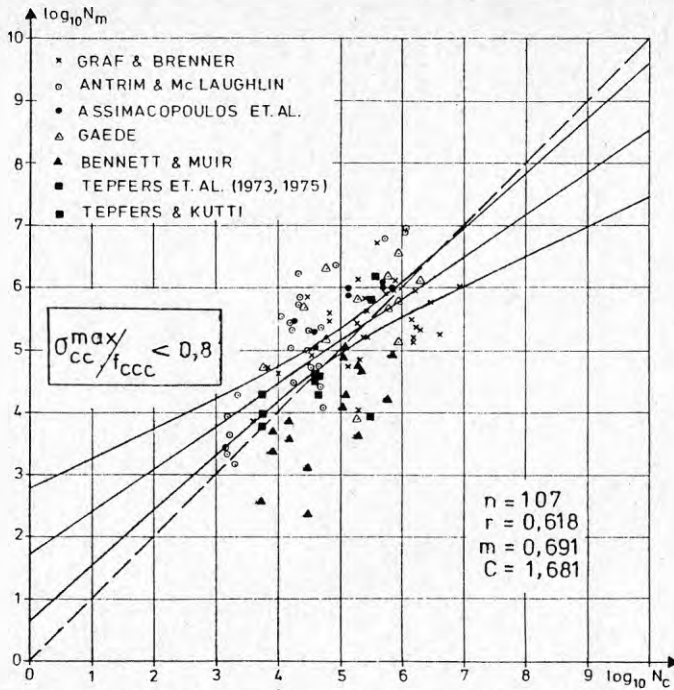


FIG. 3.4.1 Samband mellan beräknat antal lastpulser vid brott N_c och uppmätt N_m för ordinär betong.

$$\sigma_{cc}^{\max} / f_{ccc} < 0,8.$$

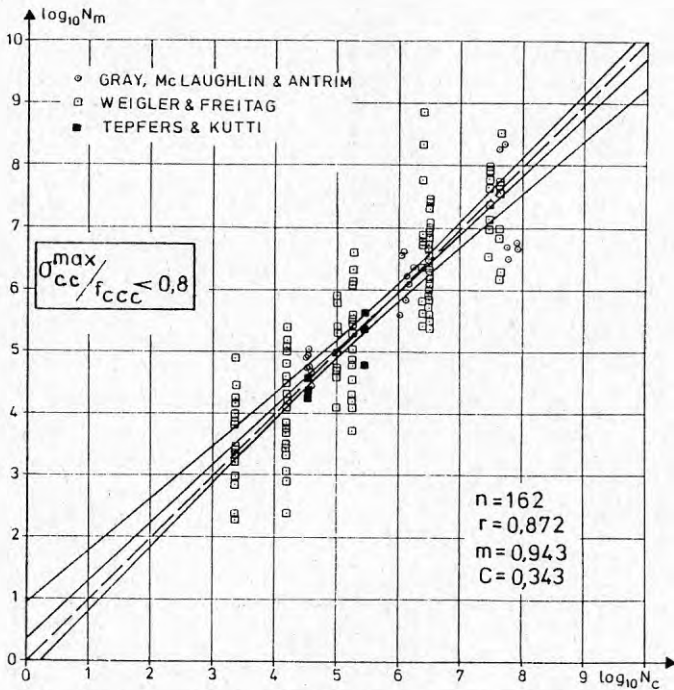


FIG. 3.4.2 Samband mellan beräknat antal lastpulser vid brott N_c och uppmätt N_m för lättballastbetong.

$$\sigma_{cc}^{\max} / f_{ccc} < 0,8.$$

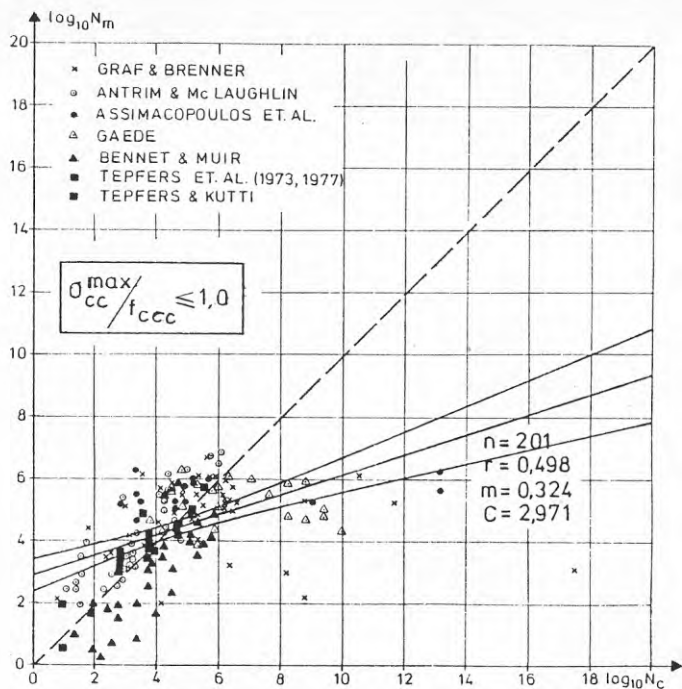


FIG. 3.4.3 Samband mellan beräknat antal lastpulser vid brott N_c och uppmätt N_m för ordinär betong. Alla värden.

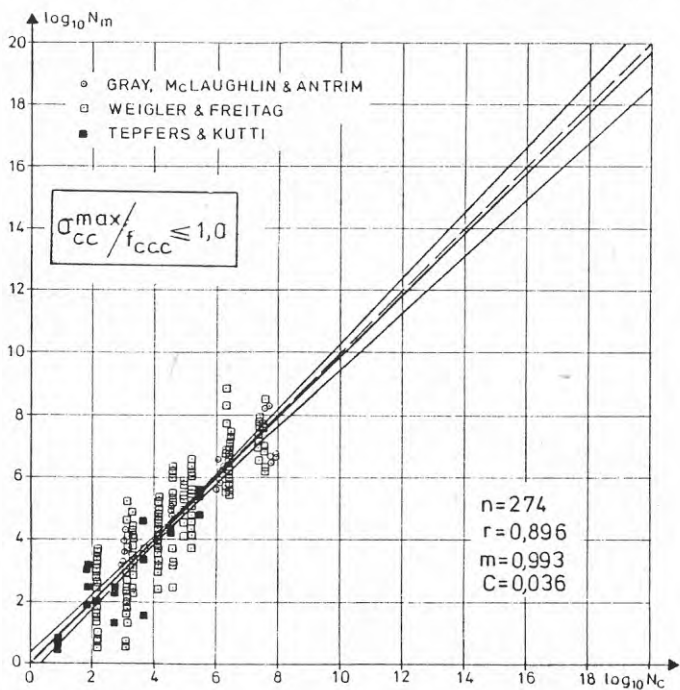


FIG. 3.4.4 Samband mellan beräknat antal lastpulser vid brott N_c och uppmätt N_m för lättballastbetong. Alla värden.

I FIG. 3.4.3 och 3.4.4 har motsvarande analys utförts, men med samtliga försöksvärden medtagna, dvs även dem, som ej använts för bestämning av β till 0,0685. För ordinär betong orsakar några försöksvärden med mycket markerad avvikelse från försöksvärdepopulationens allmänna tendens att konfidensbandet kraftigt avviker från 45° linjen. Dessa värden har $\sigma_{cc}^{max}/f_{ccc} > 0,8$ och $R > 0,75$ och är därför mycket känsliga för störningar i f_{ccc} -värde. För lättballastbetong är överensstämmelse mellan konfidensbandet och 45° -linjen utomordentlig.

En närmare granskning av försöksvärdena i diagrammen visar en tendens till att olika forskare har sina värden grupperade i olika delar i punktskarorna. Till exempel kan det observeras att Bennett & Muirs (1967) försök är koncentrerade under och Antrim & Mc Laughlin (1959) över 45° -linjerna i FIG. 3.4.1 och 3.4.3 för ordinär betong. Provningsmetodiken, apparaturen samt precisionen med vilken den statistiska tryckhållfastheten f_{ccc} uppskattas för de enskilda proven utgör emellertid svårkontrollerade parametrar, vilka lätt förorsakar systematiska avvikelser.

För att vidare undersöka samstämmigheten mellan ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ och försöksvärdena upprättas Wöhlerkurvor för konstanta R-värden. Då de tillgängliga försöken är utförda med ett stort antal R-värden grupperas försöksvärdena i följande R-värdeintervall.

Ordinär betong:

R = 0,01 - 0,07 med R-medelvärde = 0,03 i FIG. 3.4.5
 R = 0,13 - 0,21 med R-medelvärde = 0,18 i FIG. 3.4.6
 R = 0,23 - 0,28 med R-medelvärde = 0,26 i FIG. 3.4.7
 R = 0,35 - 0,40 med R-medelvärde = 0,38 i FIG. 3.4.8
 R = 0,56 - 0,58 med R-medelvärde = 0,57 i FIG. 3.4.9
 R = 0,70 - 0,76 med R-medelvärde = 0,75 i FIG. 3.4.10
 R = 0,84 - 0,95 med R-medelvärde = 0,90 i FIG. 3.4.11

Lättballastbetong:

$R = 0,02 - 0,09$ med R -medelvärde = $0,06$ i FIG. 3.4.12

$R = 0,20 - 0,24$ med R -medelvärde = $0,22$ i FIG. 3.4.13

$R = 0,25 - 0,31$ med R -medelvärde = $0,27$ i FIG. 3.4.14

$R = 0,45 - 0,51$ med R -medelvärde = $0,48$ i FIG. 3.4.15

I Wöhler-diagrammen har linjär regression använts och 95%-iga konfidensband beräknats. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ har inlagts som streckad linje. Trots att den i de flesta fall ej helt ligger inom konfidensbanden är försöksvärdena väl samlade kring ekvationen.

Försök med höga $\sigma_{cc}^{\max}/f_{ccc}$ -värden har ibland för låga $\log_{10} N_m$ -värden. Eftersom belastningsfrekvenserna vid sådana försök vanligen är låga och lasterna höga sker krypning. Långtidshållfastheten för betong är $0,75$ å $0,80 f_{ccc}$, enligt Rüsç et al. (1968) och Tepfers, Görlin och Samuelsson (1973). Vid utmattningsprov över denna

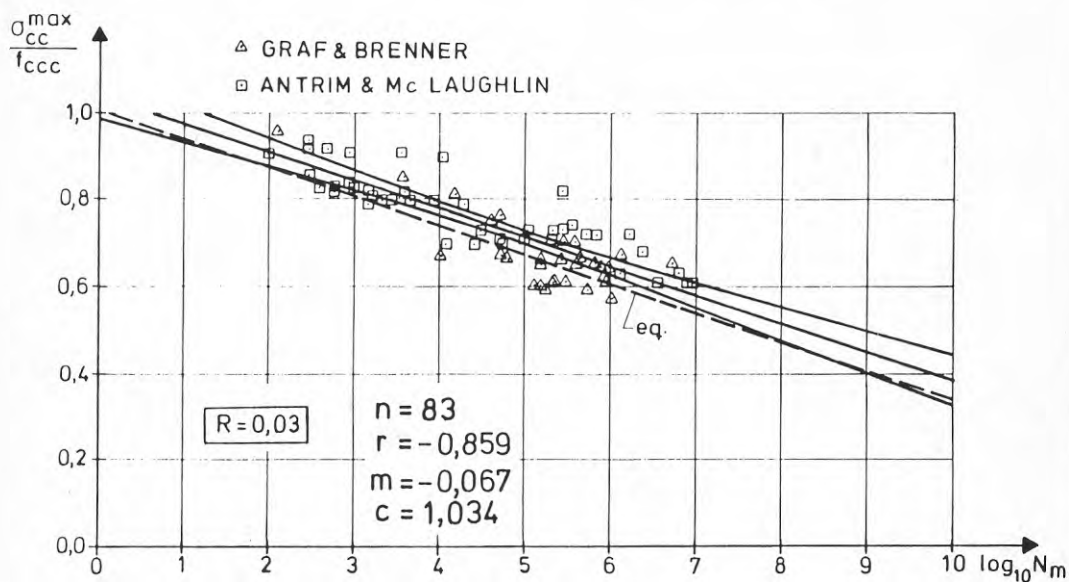


FIG. 3.4.5 Ordinär betong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

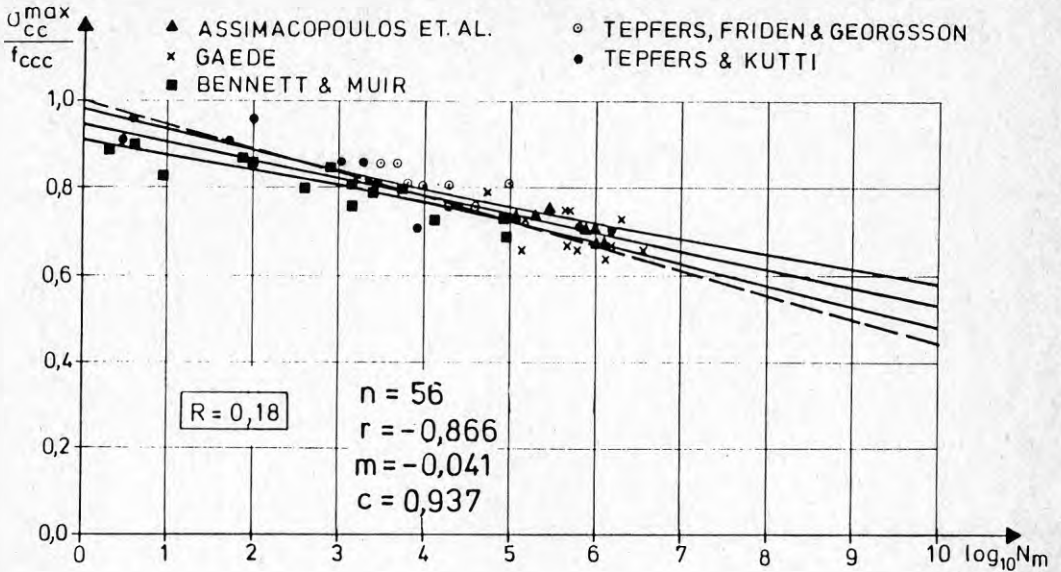


FIG. 3.4.6 Ordinär betong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

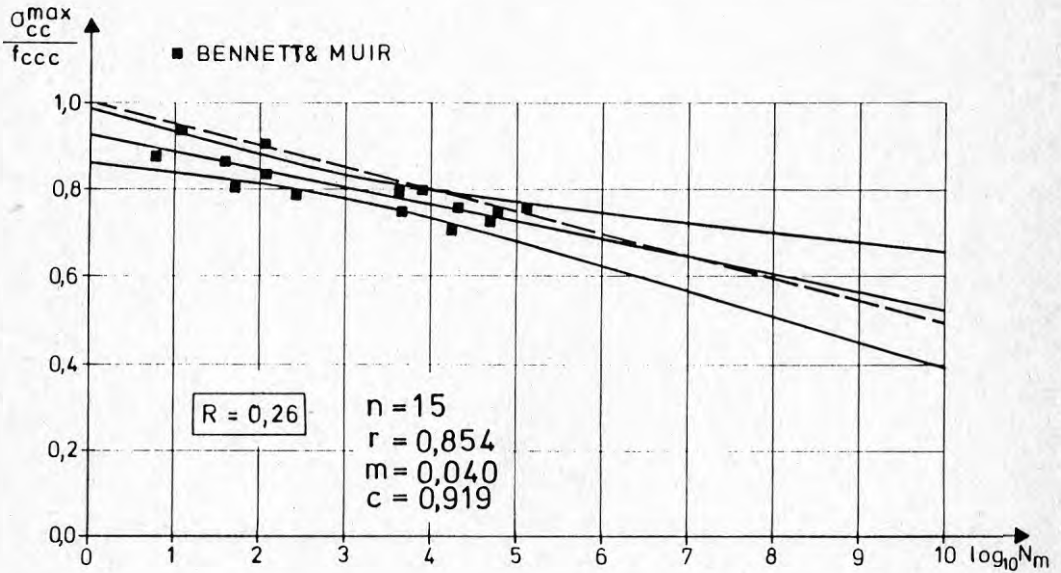


FIG. 3.4.7 Ordinär betong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

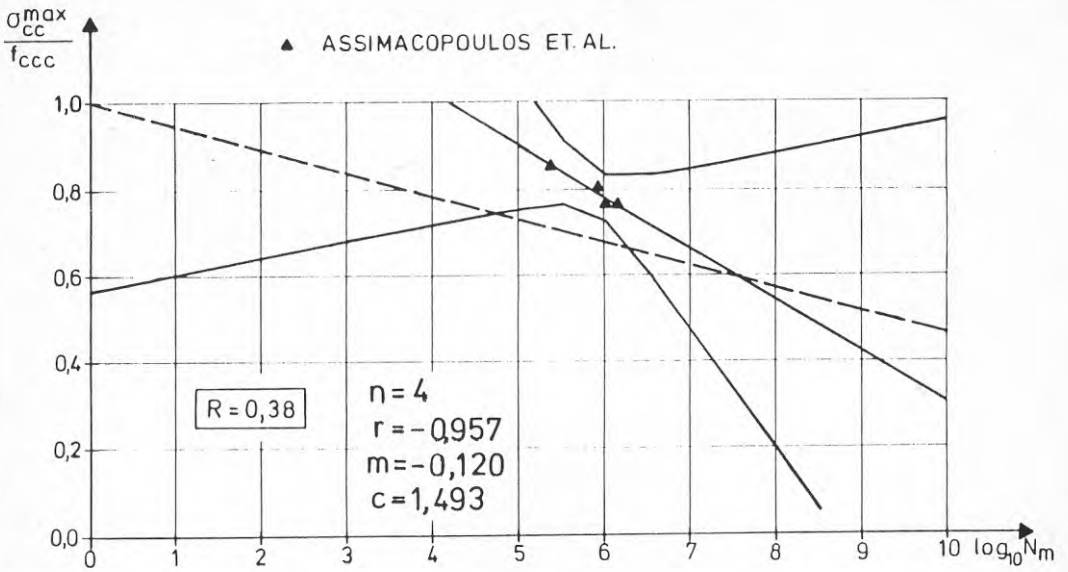


FIG. 3.4.8 Ordinär betong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

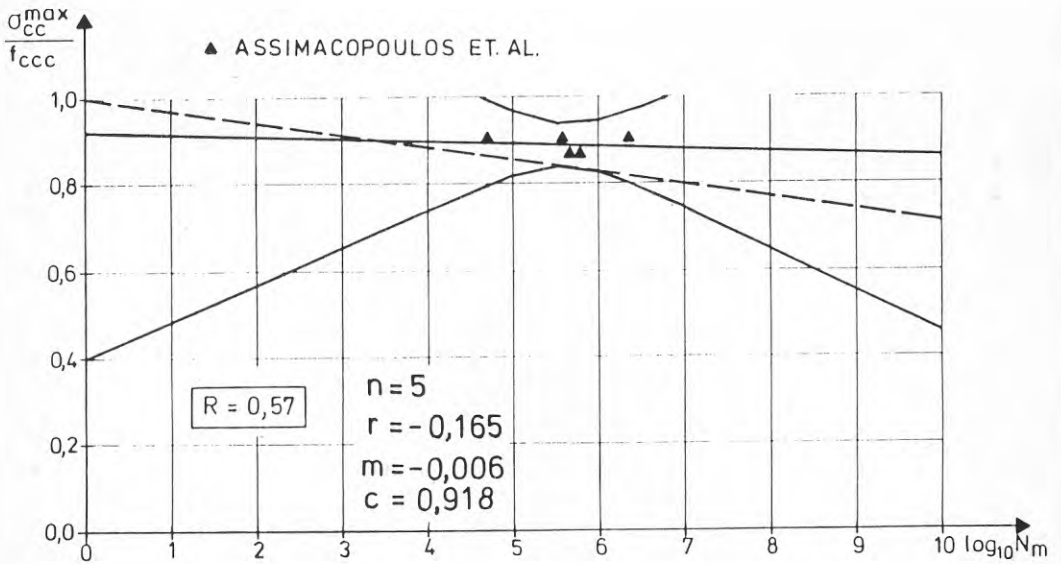


FIG. 3.4.9 Ordinär betong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

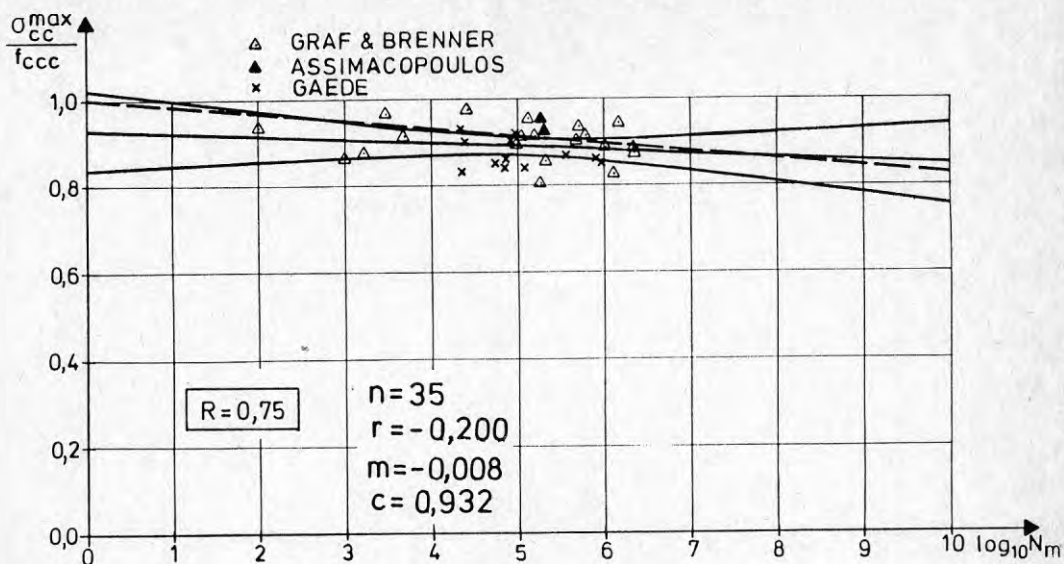


FIG. 3.4.10 Ordinär betong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

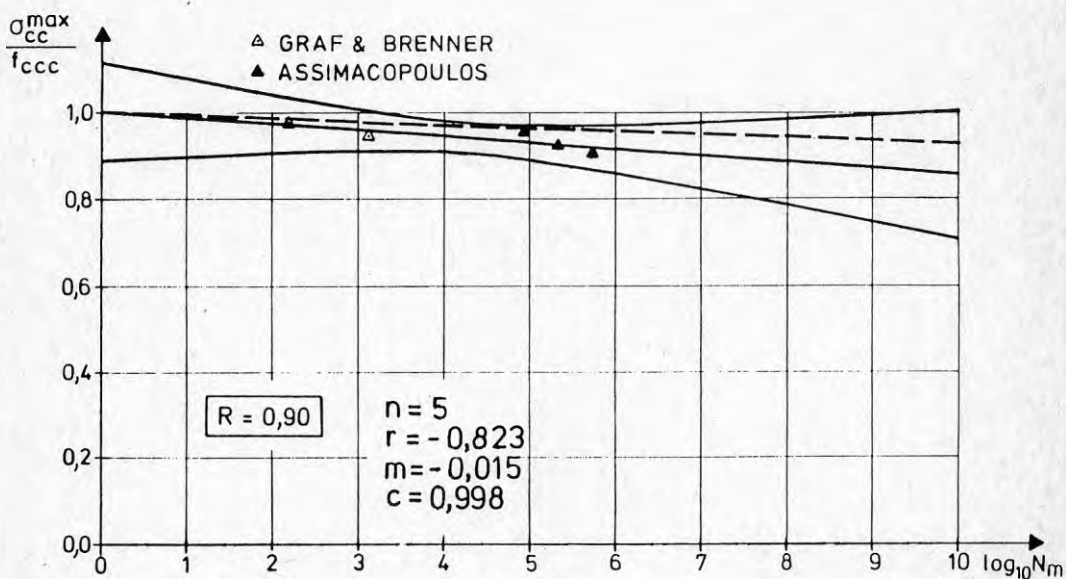


FIG. 3.4.11 Ordinär betong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

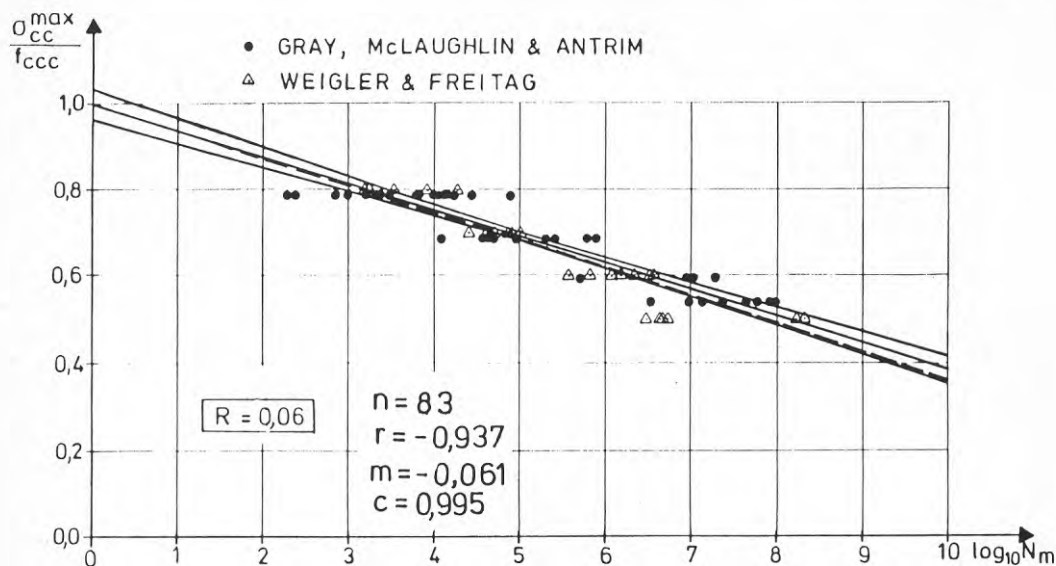


FIG. 3.4.12 Lättballastbetong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

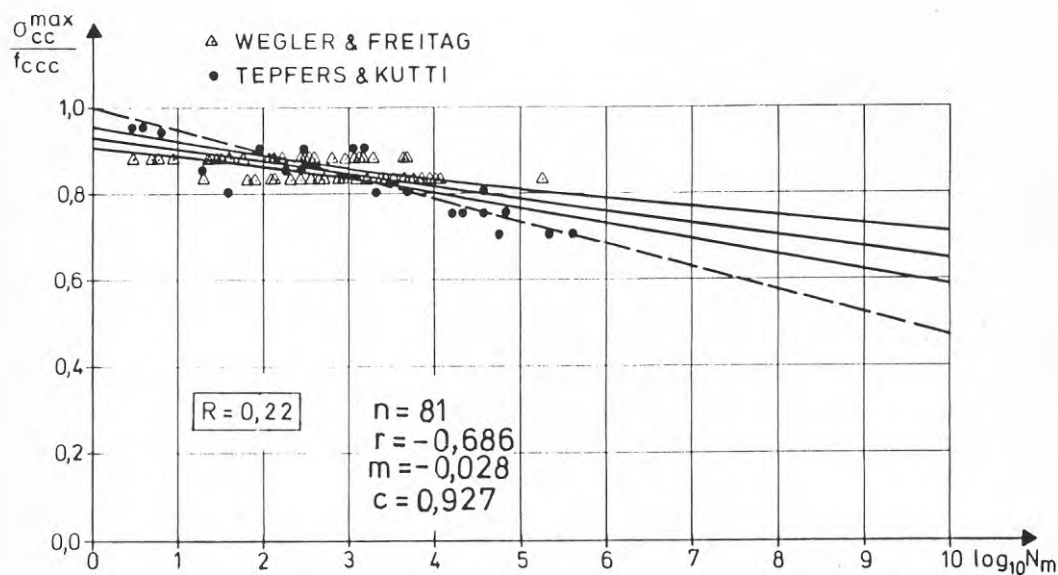


FIG. 3.4.13 Lättballastbetong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

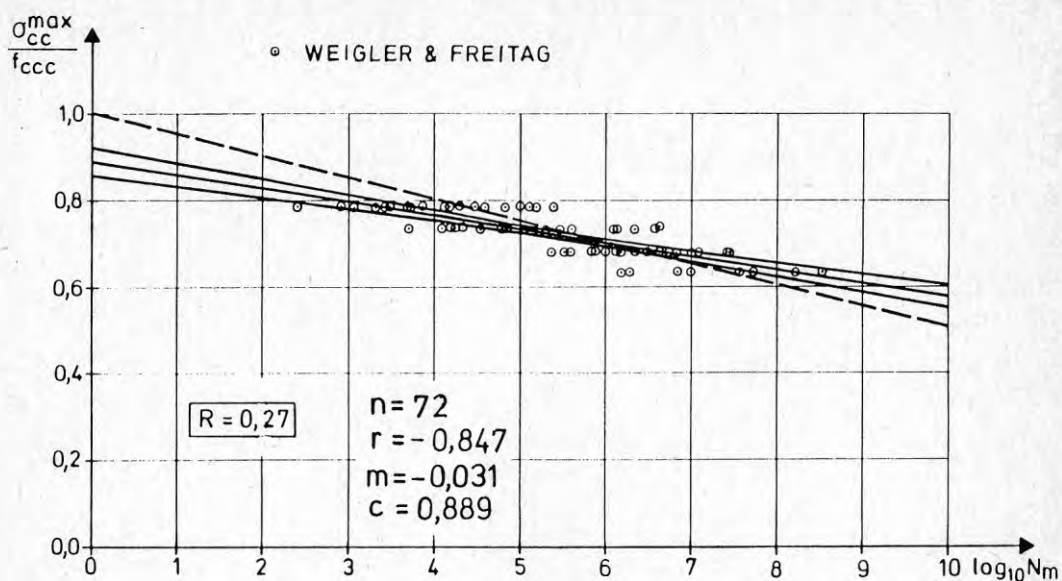


FIG. 3.4.14 Lättballastbetong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

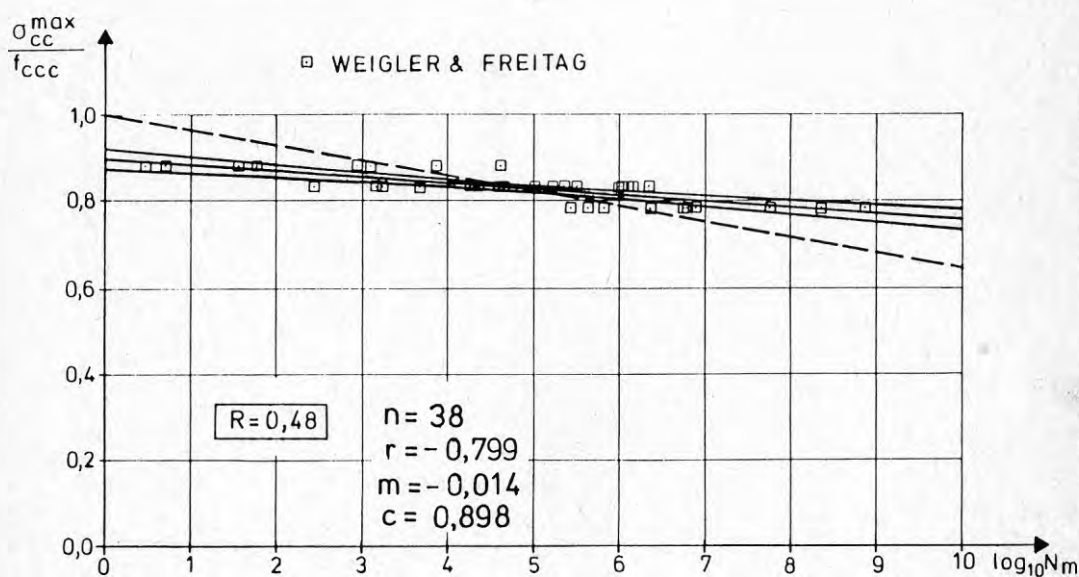


FIG. 3.4.15 Lättballastbetong. Wöhler-diagram med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

spänning kan man därför inte bortse från betydande kryp-effekter. Utmattningsresultatet bör därför vara belast-frekvenskänsligt inom området $\sigma_{cc}^{max}/f_{ccc} \sim 0,75$ till 1,0, vilket undersökningar av Sparks och Menzies (1973) bekräftar. Frekvenskänsligheten för $\sigma_{cc}^{max}/f_{ccc}$ -värden under betongens långtidshållfasthet förefaller ringa, då den icke framträder i det analyserade försöksmaterialet, trots belastningsfrekvensvariationer från 0,1 till 200 Hz.

För att få en sammanfattande jämförelse mellan de empiriska regressionslinjerna i Wöhler-diagrammen och ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ utföres följande analys. Regressionslinjevärden för $N_m = 10^6$ i Wöhler-diagrammen, FIG. 3.4.5 t o m 3.4.15, avsätts i ett modifierat Goodman-diagram FIG. 3.4.16 och jämförs där med ekvation (3.1). Av figuren framgår att värdena ansluter sig väl till ekvation (3.1). Då ekvationen nära nog är rätlinjig i ett sådant

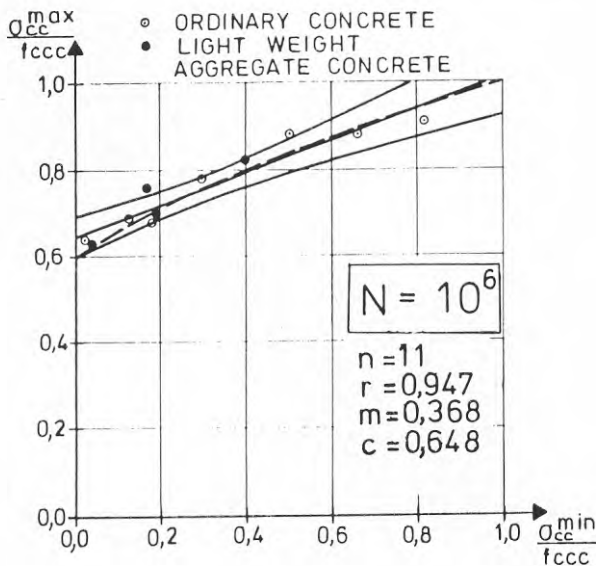


FIG. 3.4.16 Modifierat Goodman-diagram. Linjär regression med 95%-igt konfidensband. Ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

diagram, har rätlinjig regression utförts och 95%-igt konfidensband inlagts. Linjen för ekvation (3.1) ligger helt inom konfidensbandet. Det förefaller därför riktigt att använda ekvation (3.1) med $\beta = 0,0685$ för betongers tryckutmattning, varvid Wöhler-diagram måste upprättas för konstanta värden på R.

3.5 Sammanfattning och slutsatser

Betongens utmattningsbenägenhet vid tryckpåkänningar kan principiellt beskrivas med ekvation (3.1) föreslagna av Aas-Jacobsen (1970). Ekvationen stipulerar att Wöhler-diagram för betong upprättas för konstanta värden på $R = \sigma_{cc}^{\min} / \sigma_{cc}^{\max}$. I undersökningen har utmattningsegenskaper vid tryckpåkänningar för ordinär betong med densitet 2250 kg/m^3 jämförts med lättballastbetonger med densiteter ned till 1500 kg/m^3 . Osäkerheter i utmattningsresultaten inträffar för $\sigma_{cc} / f_{ccc} \geq 0,8$. Detta beror på svårigheter att exakt kunna bestämma de enskilda provkropparnas statistiska tryckhållfastheter samt på tillkommande krypeffekter. Med försök rapporterade i litteraturen, totalt 475 utmattningsprov har den i ekvation (3.1) ingående materialparametern β bestämts till 0,0685. Inga skillnader i utmattningsbenägenhet föreligger mellan betongerna, varför ekvationen kan användas för båda betongtyperna och skrivas:

$$\frac{\sigma_{cc}^{\max}}{f_{ccc}} = 1 - 0,0685(1 - R) \log_{10} N; \quad \dots (3.2)$$

4. UNDERSÖKNING AV BETONGENS DRAGHÅLLFASTHET VID UTMATTNING

4.1 Inledning och målsättning

Tidigare genomförda undersökningar behandlar betongens utmattningsegenskaper vid tryck- och böjpåkänningar. Betongens utmattningsegenskaper vid rena dragpåkänningar har icke undersökts främst beroende på de stora svårigheter som lastexcentriciteter - externa vid lastpåföring och interna vid variationer i elasticitetsmodul - ojämn uttorkning med variabla krympspänningar och mikrokrackelering medför redan vid statisk belastning, Krenchel, Gravesen (1972). Vid pulserande belastning kommer problemen ej att avta. En möjlighet att undersöka betongens draghållfasthet erbjuder spräckprovet. Detta är mindre känsligt för de störningar det rena dragprovet är behäftat med.

Vid en jämförelse av draghållfastheter bestämda i spräckprov och i rena dragprov har de förra i stort en påtvingad testsektion där dragsprickan kommer att tränga fram, medan de senare brister alltid i sin svagaste sektion som bestämmas även av inre krympspänningar och areareduktion på grund av mikrosprickning. Spräckprovets hållfasthetsvärde måste följaktligen ha högre nivå än det rena dragprovets.

I jämförelse med det rena dragprovet är spräckprovet ett robust prov och kan utföras även på betongkuber, Nilsson (1961) med samma resultat som på liggande cylindrar. I föreliggande undersökning har på grund av de nämnda skälen just kubspräckprovet valts för undersökning av betongens utmattningsegenskaper vid dragpåkänningar. Lastapplikationen, FIG. 4.1.1, är enkel att utföra.

Spänningstillståndet vid belastning av ett kubspräckprov är ej så väldefinierat som vid ett rent dragprov utan störningsspänningar och sprickor. Brottet hos ett kubspräckprov initieras dock alltid av att draghållfastheten överskrides och detta både vid statisk som

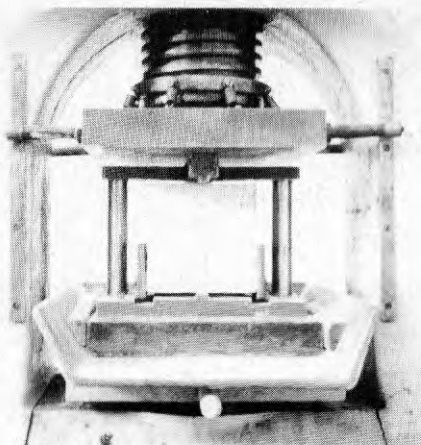


FIG. 4.1.1 Kubspräckprov.

utmattande last. I föreliggande undersökning avses bestämmas nedsättningen av draghållfasthet på grund av utmattande last, dvs man studerar relationen mellan maximal dragspänning vid pulserande last, som ger brott efter ett visst antal lastväxlingar, och statisk draghållfasthet. När brottet hos en studerad provkroppstyp orsakas av att draghållfastheten överskrides vid statisk belastning likaväl som för utmattande last, måste den nämnda relationen spegla betongens utmattningsbenägenhet för dragpåkänningar.

Målsättningen med föreliggande undersökning är att bestämma Wöhler-kurvor för ordinär oarmerad betong utsatt för pulserande dragpåkänningar och jämföra Wöhler-kurvorna med de samband som har bestämts för tryckpåkänningar.

Provobjekten utgörs av $0,15^3 \text{ m}^3$ betongkuber. Två betonghållfastheter f_{ct} undersökes. Tre nivåer på R provas, nämligen 0,20, 0,30 och 0,40 inom varje betonghållfasthet. För varje betonghållfasthet och R-värde upprättas en Wöhler-kurva med ca tre prov på varje av sex $\sigma_{ct}^{\max}/f_{ct}$

nivåer. Följande σ_{ct}^{max}/f_{ct} -nivåer provas, nämligen 0,95, 0,90, 0,85, 0,80, 0,75 och 0,70. Emellertid på grund av maskinfel eller annan orsak kommer några prov att saknas på vissa σ_{ct}^{max}/f_{ct} -nivåer.

4.2 Försöksprogram

Försöksprogrammet baseras på hypotesen att ekvation 4.1, som i kapitel 3 har visats ha giltighet för betongens utmattning vid tryckpåkänningar även principiellt gäller vid dragpåkänningar

$$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} = 1 - \beta(1 - R) \log_{10} N \quad \dots (4.1)$$

Ekvationens allmänna överensstämmelse och tillämplighet avses undersökas. Om denna är tillfredsställande kommer värdet på koefficienten β att bestämmas.

För att genomföra detta varierar faktorerna σ_{ct}^{max}/f_{ct} och R var för sig i flera steg enligt TABELL 4.2.1. Två betonghållfastheter provas.

Av varje betong tillverkas 60 st $0,15^3 \text{ cm}^3$ kuber. 12 kuber användes för bestämning av respektive betongs statiska tryck- och spräckdraghållfasthet vid två tillfällen. De återstående kuberna utmattningsprovas. Vilken typ av provning som har företagits på de enskilda kuberna respektive vilken utmattningsprovserie de tillhör framgår av TABELL 4.2.2 och 4.2.3. Några provkuber förlorades på grund av belastningsmaskinfel, sned belastning och dylikt och har markerats med streck i provningstypkolumnerna.

Spräckdragspänningen i betongkuberna beräknas med formeln $\sigma_{ct} = 2P/\pi a^2$.

TABELL 4.2.1.

<u>Serie 1</u>	$f_{cc} = 40,8 \text{ MPa}$	$f_{ct} = 3,38 \text{ MPa}$
$R = 0,20$	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} = 0,95, 0,90, 0,85, 0,80, 0,75$	
<u>Serie 2</u>	$f_{cc} = 40,8 \text{ MPa}$	$f_{ct} = 3,38 \text{ MPa}$
$R = 0,30$	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} = 0,95, 0,90, 0,85, 0,80, 0,75$	
<u>Serie 3</u>	$f_{cc} = 40,8 \text{ MPa}$	$f_{ct} = 3,38 \text{ MPa}$
$R = 0,40$	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} = 0,95, 0,90, 0,85, 0,80$	
<u>Serie 4</u>	$f_{cc} = 56,7 \text{ MPa}$	$f_{ct} = 3,99 \text{ MPa}$
$R = 0,20$	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} = 0,95, 0,90, 0,85, 0,80, 0,75, 0,70$	
<u>Serie 5</u>	$f_{cc} = 56,7 \text{ MPa}$	$f_{ct} = 3,99 \text{ MPa}$
$R = 0,30$	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} = 0,95, 0,90, 0,85, 0,80, 0,75$	
<u>Serie 6</u>	$f_{cc} = 56,7 \text{ MPa}$	$f_{ct} = 3,99 \text{ MPa}$
$R = 0,40$	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} = 0,95, 0,90, 0,85, 0,80$	

TABELL 4.2.2

Betongsats A $f_{cc} = 40,8 \text{ MPa}$; $f_{ct} = 3,38 \text{ MPa}$;

Kub Nr	Utmattnings- provning Serie	Statisk provning	Kub Nr	Utmattnings- provning Serie	Statisk provning
1	-	x	31	3	-
2	-	x	32	3	-
3	-	x	33	3	-
4	-	x	34	1	-
5	-	x	35	1	-
6	-	x	36	1	-
7	-	-	37	1	-
8	-	-	38	2	-
9	1	-	39	-	-
10	1	-	40	-	-
11	1	-	41	3	-
12	1	-	42	2	-
13	2	-	43	3	-
14	2	-	44	3	-
15	2	-	45	3	-
16	2	-	46	1	-
17	1	-	47	3	-
18	-	x	48	1	-
19	-	x	49	1	-
20	-	x	50	1	-
21	-	x	51	1	-
22	-	x	52	2	-
23	-	x	53	2	-
24	-	-	54	2	-
25	-	-	55	2	-
26	-	-	56	2	-
27	1	-	57	3	-
28	2	-	58	2	-
29	2	-	59	-	-
30	3	-	60	2	-

TABELL 4.2.3.

Betongsats B $f_{cc} = 56,7$ MPa; $f_{ct} = 3,99$ MPa;

Kub Nr	Utmattnings- provning Serie	Statisk provning	Kub Nr	Utmattnings- provning Serie	Statisk provning
1	-	x	31	5	-
2	-	x	32	5	-
3	-	x	33	5	-
4	-	x	34	5	-
5	-	x	35	5	-
6	-	x	36	5	-
7	4	-	37	4	-
8	4	-	38	4	-
9	4	-	39	6	-
10	4	-	40	6	-
11	4	-	41	6	-
12	4	-	42	6	-
13	5	-	43	6	-
14	5	-	44	6	-
15	5	-	45	-	-
16	5	-	46	4	-
17	5	-	47	-	x
18	6	-	48	-	x
19	6	-	49	-	x
20	6	-	50	-	x
21	6	-	51	-	x
22	4	-	52	-	x
23	4	-	53	4	-
24	4	-	54	-	-
25	4	-	55	6	-
26	4	-	56	6	-
27	4	-	57	6	-
28	4	-	58	-	-
29	5	-	59	-	-
30	5	-	60	-	-

4.3 Betongens sammansättning och provkropparnas tillverkning

Utmattningsförsöken genomfördes med två betonghållfastheter. Provkropparna i serie 1, 2 och 3 göts från en sats betong med avsedd 28-dygns kubhållfasthet $f_{cc28} = 20$ MPa och provkropparna i serie 4, 5 och 6 från en annan med avsedd 28-dygns kubhållfasthet $f_{cc28} = 45$ MPa.

Betongerna proportionerades enligt Alexandersson & Buö (1970) och hade följande sammansättning:

Betongsats A Serie 1, 2 och 3

Standard Portlandcement	236 kg/m ³
Kvartssand, finhetsmodul $M = 2,76$	1101 "
Kubisk granitmakadam, finhetsmodul $M = 6,35$, maximal stenstorlek 16 mm	710 "
Vatten	210 "
vct = 0,890	
Konsistens 4 VB	
Avsedd 28-dygns kubhållfasthet	20 MPa

Betongsats B Serie 4, 5 och 6

Standard Portlandcement	365 kg/m ³
Kvartssand, finhetsmodul $M = 3,22$	1025 "
Kubisk granitmakadam, finhetsmodul $M = 6,56$, maximal stenstorlek 16 mm	737 "
Vatten	187 "
vct = 0,512	
Konsistens 4 VB	
Avsedd 28-dygns kubhållfasthet	45 MPa

Med varje sats betong göts 60 st $0,15^3$ m³ kuber i stålformar med planslipade ytor om tre kuber i varje. Vibrering utfördes på vibrobord under 120 sekunder, varvid betongens överyta hade blivit blank.

Efter gjutningen förvarades kuberna

	<u>Sats A</u>	<u>Sats B</u>	
Under våta filter i form	6	6	dygn
I vatten	8	8	"
Under våta filter	6	6	"
Fritt i laborationslokal ~20°C, ~r.f. 60%	63 till 112	32 till 43	"
Ålder vid provning av statistisk kubhållfasthet	83 till 132	52 till 63	"

4.4 Betongens statistiska hållfasthet

Betongens statistiska objektkubhållfasthet, både tryck- och spräckdraghållfasthet, bestämdes några veckor före och omedelbart innan utmattningsförsöken. Det sist bestämda värdet användes som basvärde vid de efterföljande utmattningsprovningarna. Spräckdraghållfasthet och tryckhållfasthet bestämdes på samma kub enligt Nilsson (1962). I de fall kuberna föll i två delar vid spräckdragprovningen utfördes icke tryckhållfasthetsbestämning på denna kub. De erhållna resultaten från hållfasthetsbestämningarna är sammanställda i TABELL 4.4.1. Hållfasthetsutvecklingen i tiden för betongerna visas i FIG. 4.4.1, där det framgår att hållfasthetsförändringen under tidsintervallerna då utmattningsprovning utfördes kan försummas.

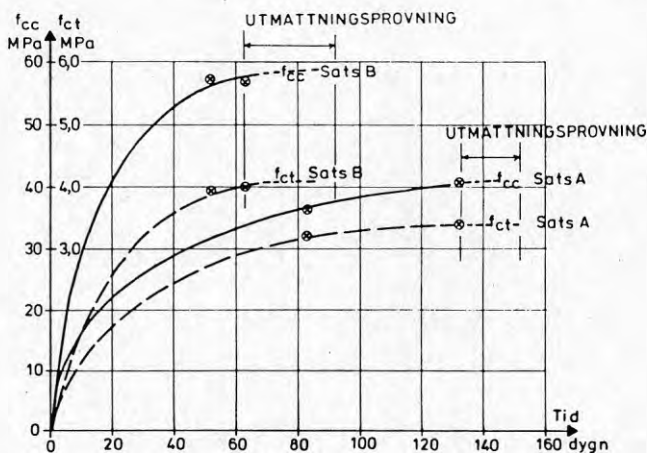


FIG. 4.4.1 Betongens tryck- och draghållfasthetsutveckling i tiden.

TABELL 4.4.1 Betongens statistiska hållfasthet.

Betongsats A, Serie 1, 2 och 3. Ålder 83 dygn			
Kub Nr	Densitet kg/m ³	f _{ct} MPa	f _{cc} MPa
1	2,309	3,29	36,0
2	2,323	2,97	36,2
3	2,300	2,94	35,5
4	2,294	3,40	36,4
5	2,311	3,01	38,5
6	2,254	3,56	34,8
MV	2,299	3,20	36,2
s	0,024	0,26	1,3

Betongsats A, Serie 1, 2 och 3. Ålder 132 dygn			
18	2,327	3,74	38,6
19	2,302	3,43	41,4
20	2,291	3,22	40,4
21	2,308	3,38	43,1
22	2,293	3,35	39,4
23	2,342	3,17	42,1
MV	2,311	3,38	40,8
s	0,020	0,20	1,7

Inrutade värden utgör basvärden på statistisk hållfasthet vid utmattningsprovingarna av serierna 1, 2 och 3.

TABELL 4.4.1 (forts) Betongens statistiska hållfasthet.

Betongsats B, Serie 4, 5 och 6. Ålder 52 dygn			
Kub Nr	Densitet kg/m ³	f _{ct} MPa	f _{cc} MPa
1	2,330	3,48	-
2	2,443	4,06	58,1
3	2,443	4,50	57,2
4	2,375	4,17	-
5	2,352	3,68	58,4
6	2,375	3,77	55,3
MV	2,386	3,94	57,3
s	0,047	0,37	1,4

Betongsats B, Serie 4, 5 och 6. Ålder 63 dygn.			
47	2,433	4,00	54,9
48	2,418	3,94	-
49	2,402	4,19	58,1
50	2,403	4,11	-
51	2,423	3,88	-
52	2,439	3,83	57,1
MV	2,420	3,99	56,7
s	0,015	0,14	1,6

Inrutade värden utgör basvärden på statistisk hållfasthet vid utmattningsprovningarna av serierna 4, 5 och 6.

4.5 Belastningsapparat

Kubernas statiska hållfasthet bestämdes med kubpress typ Richter med belastningskapacitet 600 kN för kubspräckprov och 3000 kN för tryckhållfasthetsbestämning. Vid provningarna var belastningshastigheten 0,1 MPa/s.

Utmattningsprovning utfördes i en servohydraulisk universalprovningssmaskin typ Losenhausen HUS 100 med belastningskapacitet 1000 kN. Provningssmaskinen visas i FIG. 4.5.1. Maskinens servosystem möjliggör pulserande



FIG. 4.5.1 Servohydraulisk universalprovningssmaskin typ Losenhausen HUS 100 med belastningskapacitet 1000 kN.

belastning med avsedd och korrekt lastvåg från den första lastpulsen till den sista, som orsakar utmattningsbrott hos provet. Vid utmattningsprovningarna användes sinusformad belastnings-tids-funktion. Lastpulsfrekvenser valdes mellan 1 till 10 Hz.

Belastningssekvensen av ett utmattningsprov var följande. Först belastades provet till σ_{ct}^m , varpå lastpulserna utlöstes med frekvensen 1 eller 2 Hz. Om allt fungerade väl efter hundratalet lastpulser ökades frekvensen till 5 eller 10 Hz.

4.6 Resultat från utmattningsförsöken

Försöksresultaten från utmattningsprovningarna av betongens spräckdraghållfasthet är sammanställda i TABELL 4.6.1. I tabellen anges för de enskilda proverna i försöksserierna betongens statistiska spräckdraghållfasthet, maximala spänningsnivån i procent av statistiska spräckdraghållfastheten vid vilken utmattningsprovningen utfördes, relationen R mellan lägsta och högsta spänningen vid lastpulseringen och logaritmen av vid utmattningsbrott uppmätta antalet lastcykler N_m . Vidare har i tabellen beräknats β -värdet i ekv (4-1) genom insättning av σ_{ct}^{max}/f_{ct} , R och $\log_{10} N_m$. I nästa kolumn anges med ekv (4-1) genom insättning av σ_{ct}^{max}/f_{ct} , R och $\beta = 0,0685$ beräknat värde på logaritmen av antalet lastcykler vid brott $\log_{10} N_c$. Det här använda β -värdet har bestämts i Kap. 3 vid tryckutmattningsförsök på betong. Därpå anges relationen mellan logaritmen på uppmätt och logaritmen på beräknat antal lastcykler vid utmattningsbrott. Slutligen finns belastningsfrekvenserna angivna.

TABELL 4.6.1

Prov Nr	f_{ct} MPa	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$	Belastnings- frekvens Hz
<u>Serie 1 Betongsats A</u>								
27	3,38	0,95	0,20	1,954	0,03199	0,912	2,141	2
34	"	"	"	2,146	0,02912	"	2,353	2
46	"	"	"	2,000	0,03125	"	2,193	2
9	3,38	0,90	0,20	2,204	0,05627	1,825	1,208	2
35	"	"	"	2,785	0,04488	"	1,460	2
48	"	"	"	2,230	0,05605	"	1,222	2
10	3,38	0,85	0,20	3,957	0,04738	2,737	1,445	2
36	"	"	"	2,663	0,07041	"	0,973	5
49	"	"	"	4,208	0,04456	"	1,538	5
11	3,38	0,80	0,20	3,568	0,07007	3,650	0,978	5
37	"	"	"	4,853	0,05151	"	1,330	5
50	"	"	"	4,718	0,05299	"	1,292	5
12	3,38	0,75	0,20	6,533	0,04783	4,562	1,433	5
17	"	"	"	4,973	0,06284	"	1,091	5
51	"	"	"	4,402	0,07099	"	0,965	10
<u>Serie 2 Betongsats A</u>								
13	3,38	0,95	0,30	1,176	0,06074	1,043	1,127	1
38	"	"	"	1,000	0,07143	"	0,959	1
52	"	"	"	2,342	0,03050	"	2,247	1
14	3,38	0,90	0,30	2,021	0,07069	2,086	0,969	2
16	"	"	"	3,338	0,04280	"	1,600	10
53	"	"	"	3,176	0,04498	"	1,522	10
15	3,38	0,85	0,30	2,832	0,07567	3,128	0,905	10
28	"	"	"	3,340	0,06416	"	1,067	5
54	"	"	"	5,180	0,04137	"	1,656	10
29	3,38	0,80	0,30	5,951	0,04801	4,171	1,427	10
60	"	"	"	4,860	0,05879	"	1,166	10
55	"	"	"	4,471	0,06390	"	1,072	10
42	3,38	0,75	0,30	4,542	0,07863	5,214	0,871	10
56	"	"	"	6,161	0,05797	"	1,182	10
58	"	"	"	5,151	0,06933	"	0,988	10

TABELL 4.6.1 (forts)

Prov Nr	f_{ct} MPa	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$	Belast- nings- frekvens Hz
<u>Serie 3 Betongsats A</u>								
30	3,38	0,95	0,40	1,602	0,05202	1,217	1,316	1
41	"	"	"	2,279	0,03657	"	1,873	2
47	"	"	"	2,301	0,03622	"	1,890	2
31	3,38	0,90	0,40	3,207	0,05197	2,433	1,318	5
43	"	"	"	3,217	0,05181	"	1,323	5
57	"	"	"	2,380	0,07003	"	0,978	2
32	3,38	0,85	0,40	4,831	0,05175	3,650	1,325	10
44	"	"	"	5,346	0,04676	"	1,464	10
33	3,38	0,80	0,40	4,831	0,06900	4,866	0,993	10
45	"	"	"	5,346	0,06235	"	1,099	10
<u>Serie 4 Betongsats B</u>								
7	3,99	0,95	0,20	2,146	0,02912	0,912	2,353	1
22	"	"	"	1,301	0,04804	"	1,427	1
23	"	"	"	1,000	0,06250	"	1,096	1
8	3,99	0,90	0,20	2,415	0,05176	1,825	1,323	1
24	"	"	"	1,903	0,06569	"	1,043	1
25	"	"	"	2,114	0,05913	"	1,159	1
9	3,99	0,85	0,20	3,860	0,04858	2,737	1,410	5
27	"	"	"	3,243	0,05782	"	1,185	5
28	"	"	"	3,949	0,04748	"	1,443	5
10	3,99	0,80	0,20	4,972	0,05028	3,650	1,362	10
37	"	"	"	2,518	0,09929	"	0,690	10
38	"	"	"	3,670	0,06812	"	1,006	10
11	3,99	0,75	0,20	3,412	0,09159	4,562	0,748	10
46	"	"	"	5,860	0,05333	"	1,284	10
53	"	"	"	6,055	0,05161	"	1,328	10
12	3,99	0,70	0,20	4,882	0,07681	5,474	0,892	10
26	"	"	"	5,453	0,06877	"	0,896	10

TABELL 4.6.1 (forts)

Prov	f_{ct}	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$	Belastningsfrekvens Hz
<u>Serie 5 Betongsats B</u>								
17	3,99	0,95	0,30	1,477	0,04836	1,043	1,416	2
29	"	"	"	1,845	0,03871	"	1,770	2
30	"	"	"	1,477	0,04836	"	1,416	2
16	3,99	0,90	0,30	2,806	0,05091	2,086	1,346	10
31	"	"	"	3,185	0,04485	"	1,527	10
32	"	"	"	2,813	0,05078	"	1,350	10
15	3,99	0,85	0,30	4,409	0,04860	3,128	1,408	10
33	"	"	"	4,296	0,04988	"	1,374	10
34	"	"	"	2,771	0,07733	"	0,886	10
13	3,99	0,80	0,30	4,406	0,06485	4,171	1,056	10
35	"	"	"	4,657	0,06135	"	1,116	10
36	"	"	"	4,723	0,06049	"	1,133	10
14	3,99	0,75	0,30	4,424	0,08073	5,214	0,848	10
<u>Serie 6 Betongsats B</u>								
18	3,99	0,95	0,40	2,079	0,04008	1,217	1,709	2
39	"	"	"	0,699	0,11922	"	0,575	2
40	"	"	"	1,477	0,05642	"	1,214	2
20	3,99	0,90	0,40	2,079	0,08017	2,433	0,855	2
41	"	"	"	3,679	0,04530	"	1,513	2
42	"	"	"	2,415	0,06901	"	0,993	2
21	3,99	0,85	0,40	4,019	0,06220	3,650	1,101	10
43	"	"	"	4,163	0,06005	"	1,140	10
44	"	"	"	3,449	0,07248	"	0,945	10
19	3,99	0,80	0,40	5,891	0,05658	4,866	1,211	10
55	"	"	"	4,058	0,08214	"	0,835	10
56	"	"	"	2,934	0,11361	"	0,603	10
57	"	"	"	2,000	0,16667	"	0,411	2

Medelvärde för alla 6 serier på $\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c} = 1,258$

Standardavvikelse $s = 0,379$

4.7 Analys av utmattningsförsöken

De i TABELL 4.6.1 bestämda β -värdena för de enskilda proverna har sammanställts i ett histogram, FIG. 4.7.1. Medelvärdet på hela β -populationen blir $\bar{\beta} = 0,0597$ och standardavvikelsen $s = 0,0206$. Då 71 av de 83 proverna har $\sigma_{ct}^{\max}/f_{ct} \geq 0,80$, kan dessa ge osäkerhet i bestämningen av β av samma orsak som för tryckutmattningsprov redovisade i Kap. 3. I FIG. 4.7.2 har därför β -värden från prov med $\sigma_{ct}^{\max}/f_{ct} < 0,80$ sammanställts i ett histogram. Medelvärdet för β blir $\bar{\beta} = 0,0675$ och standardavvikelsen $s = 0,0133$ och har praktiskt taget samma storleksordning som motsvarande värden bestämda vid tryckutmattning, vilka är $\bar{\beta} = 0,0687$ och $s = 0,0116$.

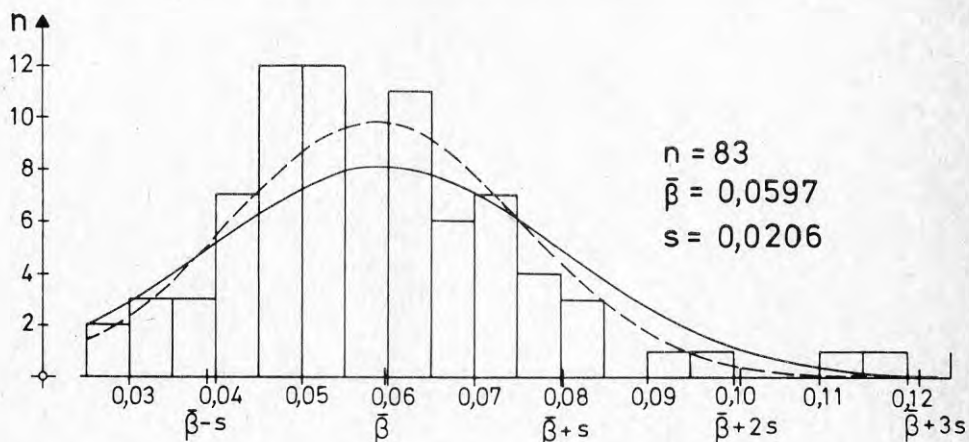


FIG. 4.7.1 Histogram över samtliga β -värden beräknade med ekvation 4.1 när $\sigma_{ct}^{\max}/f_{ct} \leq 1,0$ för ordinär betong utsatt för utmattande dragpåkänningar. En normalfördelningskurva är lagd över histogrammet. Streckad normalfördelningskurva fås om prov nr 57 ej medtages.

Antalet försöksbestämda β -värden i FIG. 4.7.2 är endast 12. Om även prov med $\sigma_{ct}^{\max}/f_{ct} = 0,8$ medtages erhålles histogrammet i FIG. 4.7.3 med medelvärdet $\bar{\beta} = 0,0704$ och standardavvikelsen $s = 0,0238$.

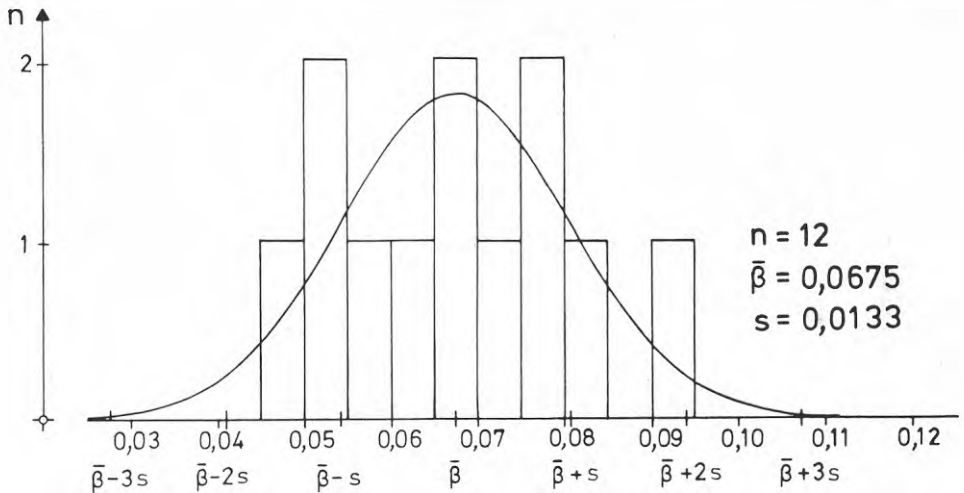


FIG. 4.7.2 Histogram över samtliga β -värden beräknade med ekvation 4.1 när $\sigma_{ct}^{max}/f_{ct} < 0,80$ för ordinär betong utsatt för utmattande dragpåkänningar. En normalfördelningskurva är lagd över histogrammet.

De i de båda FIGURERNA 4.7.2 och 4.7.3 bestämda medelvärden på β skiljer sig lite från $\bar{\beta} = 0,0685$, som gäller för betong utsatt för utmattande tryckpåkänningar, varför det förefaller plausibelt att samma β -värde i ekvation 4.1 kan användas för att bestämma utmattningsbenägenheten för betong som utsättes för dragpåkänningar lika väl som för tryckpåkänningar.

Normalfördelningskurvor, som har inlagts i histogrammen i FIGURERNA 4.7.1, 2 och 3, visar att försöksvärdepopulationerna kan uppfattas som normalfördelade. En kraftig störning ger prov nr 57 med $\sigma_{ct}^{max}/f_{ct} = 0,80$, som av icke förklarbar anledning ger ett från förväntningarna avvikande resultat. Om detta prov icke medtages fås den streckade normalfördelningskurvan i FIG. 4.7.1 med betydligt reducerad β -värdespridning och medelvärdet ändras till $\bar{\beta} = 0,0584$ med standardavvikelse $s = 0,0169$. Emellertid om analysen här utföres med samma överväganden som för betong utsatt för tryckpåkänningar bör β -värdet i ekv. 4.1 för dragpåkänningar sättas till 0,0685.

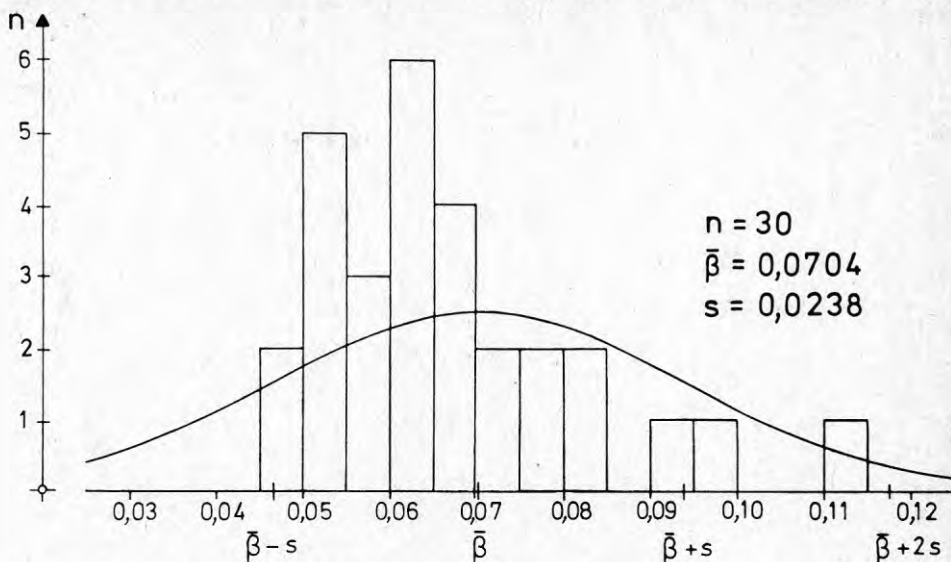


FIG. 4.7.3 Histogram över samtliga β -värden beräknade med ekvation 4.1 när $\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} \leq 0,80$ för ordinär betong utsatt för utmattande dragpåkänningar. En normalfördelningskurva är lagd över histogrammet.

Om nu samma β -värde i ekv. 4.1 antas vara giltigt vid utmattning av betong utsatt för tryckpåkänningar och dragpåkänningar, kan man med ekvationen beräkna antalet lastpulser N_c , som erfordras för att åstadkomma brott, om $\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$ och R är kända och $0 \leq R \leq 1,0$.

I diagram FIG. 4.7.4 jämföres logaritmen av i försök uppmätt antal lastpulser vid brott $\log_{10} N_m$ med beräknat värde $\log_{10} N_c$. Diagrammet är upprättat för prov med $\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} < 0,80$, vilka icke påverkas så mycket av inbördes fluktuationer i betongkubernas statistiska hållfasthet. Streckad 45° -linje representerar fullständig överensstämmelse mellan försöksvärde och beräknat värde. De 12 försöksvärdena är koncentrerade till ett ställe och har därigenom liten inverkan på regressionslinjens riktning. Ett 95%-igt konfidensband är inlagt i diagrammet. 45° -linjen faller inom konfidensbandet främst för att försöksvärdena är grupperade nära denna linje.

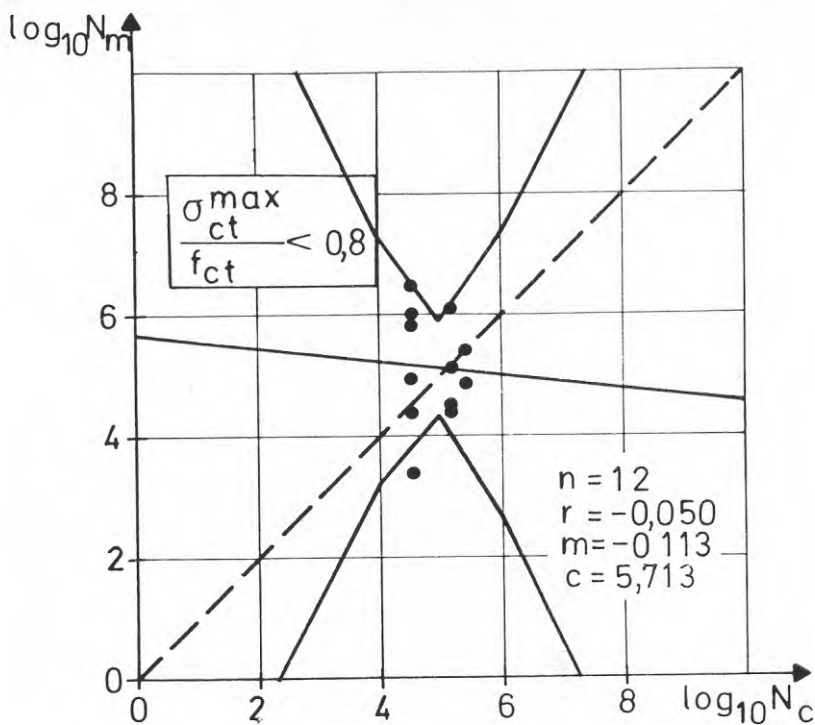


FIG. 4.7.4 Samband mellan beräknat antal lastpulser vid dragutmattningsbrott N_c och uppmätt N_m för betong.

Om motsvarande jämförelse utföres för prov med $\sigma_{ct}^{max}/f_{ct} \leq 0,80$, FIG.4.7.5, ökar spridningen något hos försöksvärdena. I övrigt kan samma slutsatser dragas som för jämförelsen i FIG. 4.7.4.

I diagram FIG. 4.7.6 har denna jämförelse mellan uppmätta och beräknade värden utförts för samtliga försöksvärden. 45°-linjen ligger delvis utanför konfidensbandet och på säkra sidan om med ekvation 4.1 och $\beta = 0,685$ beräknade värden.

I diagram FIG. 4.7.7 göres samma jämförelse som i FIG. 4.7.6 mellan uppmätta och beräknade värden, men nu med för samtliga här utförda prov anpassat $\beta = 0,0597$, bestämt i histogram FIG. 4.7.1. Därvid flyttas försöksvärdepopulationen, som sig bör, till en jämnare fördelning kring 45°-linjen, vilken delvis ligger utanför konfidensbandet.

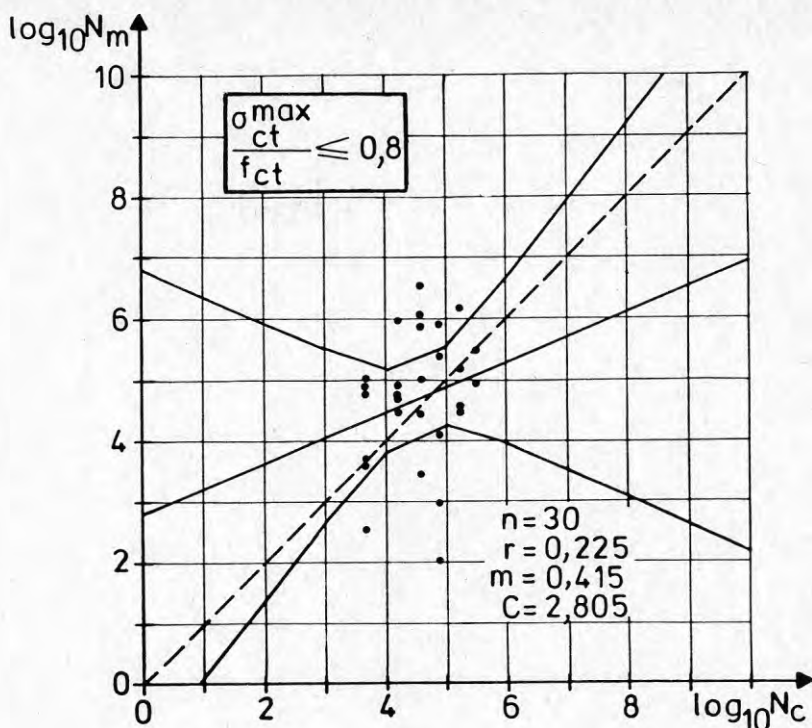


FIG. 4.7.5 Samband mellan beräknat antal lastpulser vid dragutmattningsbrott N_c och uppmätt N_m för betong.

I båda sistnämnda diagrammen påverkas konfidensbandets sträckning av prov nr 57 med onormalt lågt uppmätt antal lastpulser vid brott. Provets mätvärde inverkar sänkande på regressionslinjens vinkelkoefficient. Utan detta prov skulle överensstämmelsen mellankonfidensband och 45°-linje vara bättre.

Med hänsyn till spridningen i försöksvärden, och den icke särskilt stora avvikelserna mellan 95%:s konfidensbandet och 45°-linjen förefaller det ej finnas någon anledning att för dragpåkänningar använda annat β -värde i ekvation 4.1, än det som har bestämts vid utmattningsförsök med tryckpåkänningar. Därmed kan samma ekvation användas för att bestämma antalet lastpulser för utmattningsbrott, när gränserna för den varierande spänningen är kända och spänningen är antingen tryck eller drag.

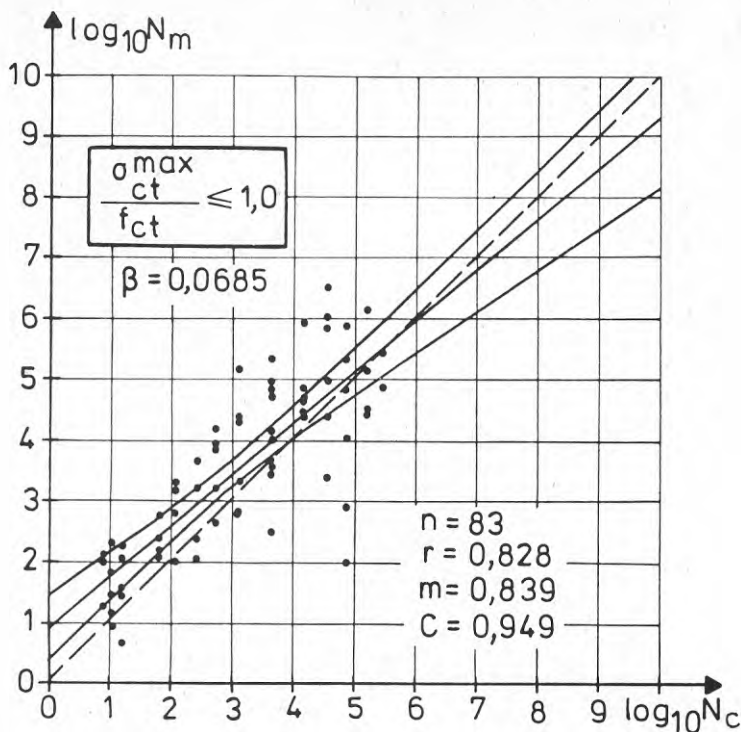


FIG. 4.7.6 Samband mellan beräknat antal lastpulser vid dragutmattningsbrott N_c och uppmätt N_m för betong.

Resultaten inom de enskilda försöksserierna har sammanförts i Wöhler-kurvor i FIG. 4.7.8 och 4.7.9. Diagrammen är upprättade för $R = 0,20, 0,30$ och $0,40$. Rätlinjig regression har utförts och ett 95%-igt konfidensband för försöksvärdena har inlagts i diagrammen. Vidare har angivits i diagrammen linjen för ekvation 4.1 med $\beta = 0,0685$. Denna linje faller praktiskt taget i samtliga diagram inom konfidensbanden och ligger genomgående något under regressionslinjen, vilket var att vänta, då det använda β -värdet är högre än det för hela försökspopulationen bestämda i histogram FIG. 4.7.1.

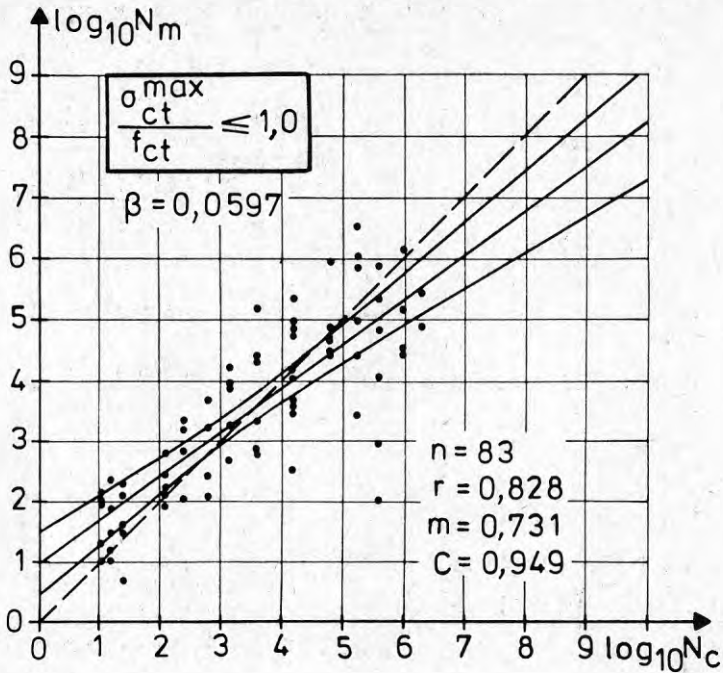


FIG. 4.7.7 Samband mellan beräknat antal lastpulser vid dragutmattningsbrott N_c och uppmätt N_m för betong.

I Wöhler-diagram för betong anges maximala spänningen i relation till statistiska hållfastheten, dvs oberoende av hållfasthetens absoluta nivå. Försöksserier med olika betonghållfasthet, men med samma R-värde, bör därför kunna sammanföras i Wöhler-diagram. Detta har gjorts i FIG. 4.7.10, där Serie 1 sammanförts med Serie 4, 2 med 5 och 3 med 6. Även här har rätlinjig regression utförts och 95%-igt konfidensband inlagts samt linjen för ekvation 4.1 med $\beta = 0,0685$ angivits. På grund av fler försöksvärden i diagram med två serier blir konfidensbanden smalare än i diagram med en serie. Linjen för ekvation 4.1 ligger till största delen inom konfidensbanden och något under den försöksbestämda regressionslinjen, vilket innebär att ekvationen ger antal lastpulser vid utmattningsbrott något på säkra sidan om vad som erhallits i försök.

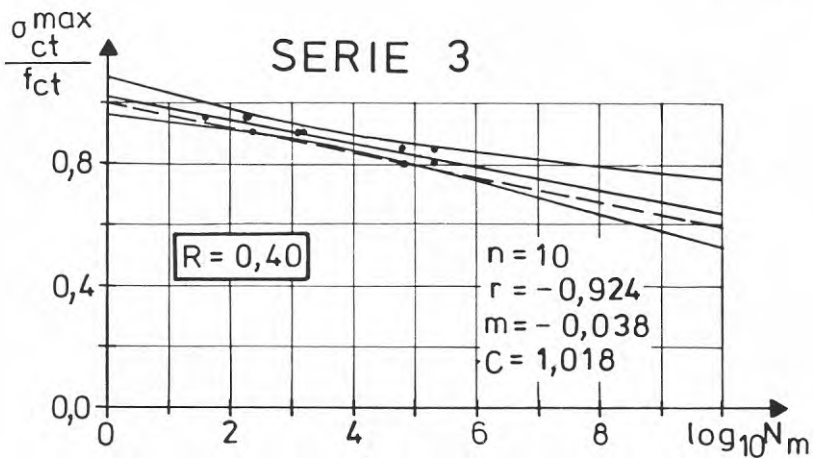
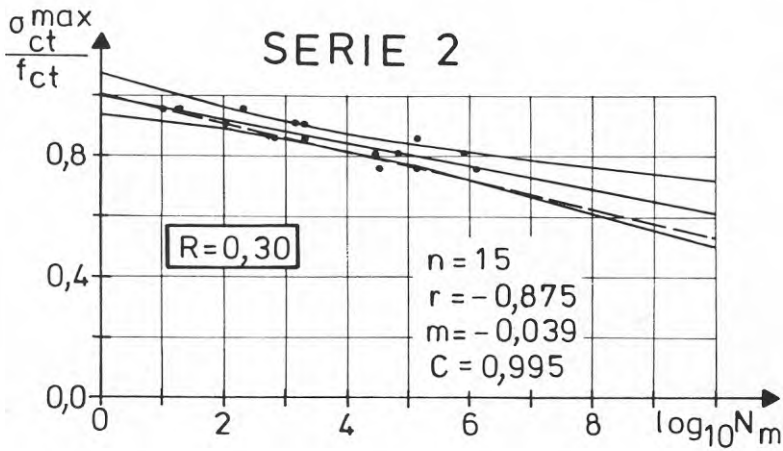
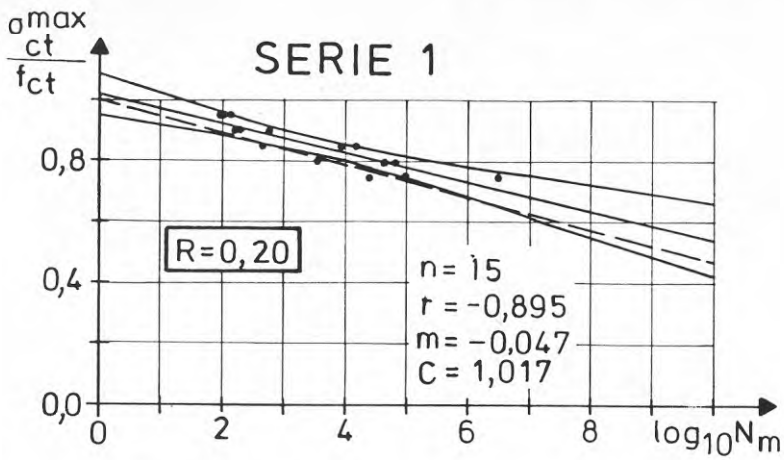


FIG. 4.7.8 Wöhler-diagram för betongens spräckdraghållfasthet med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation 4.1 med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

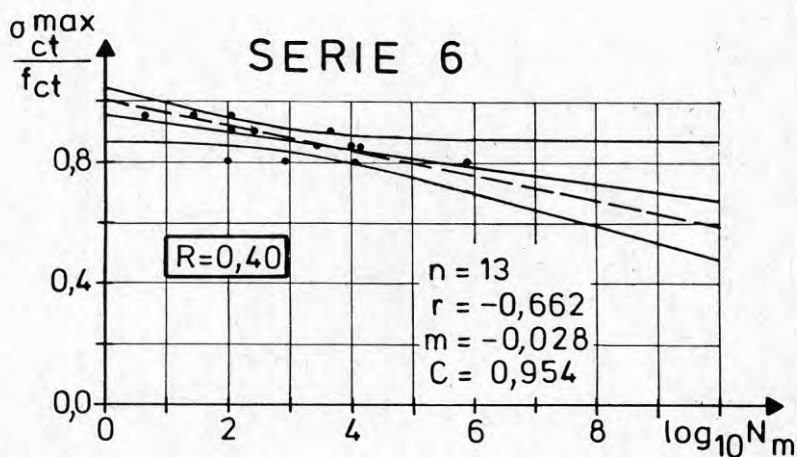
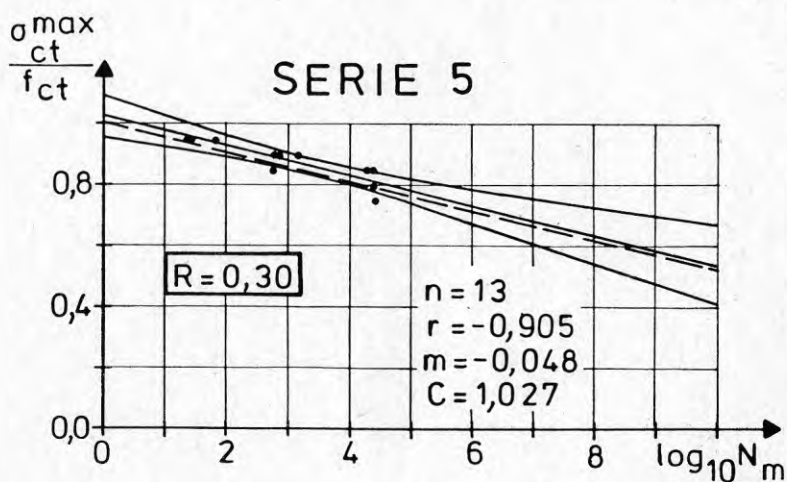
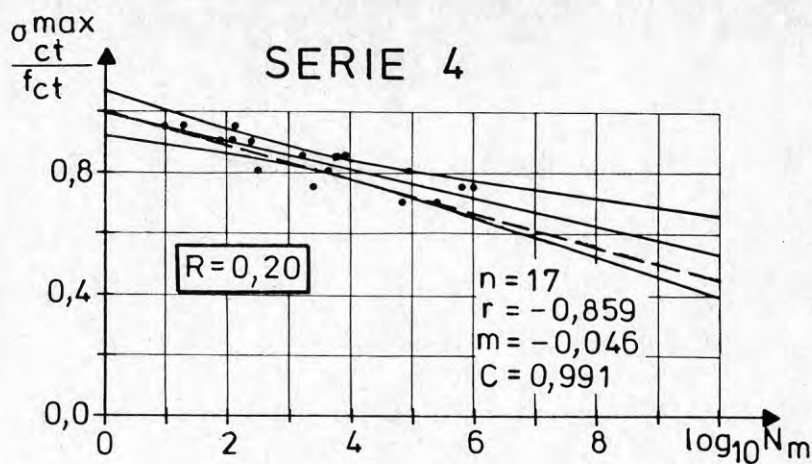


FIG. 4.7.9 Wöhler-diagram för betongens spräckdraghållfasthet med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation 4.1 med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

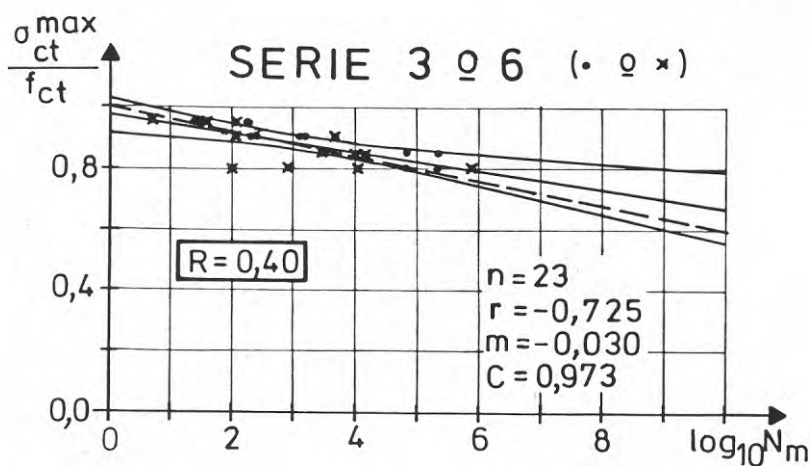
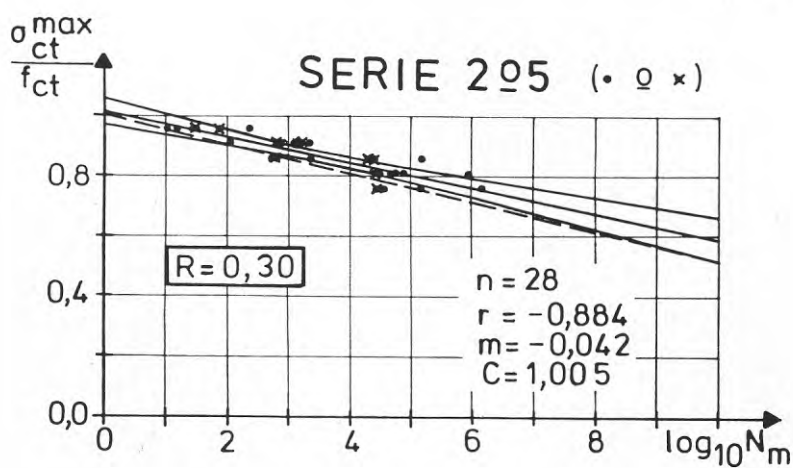
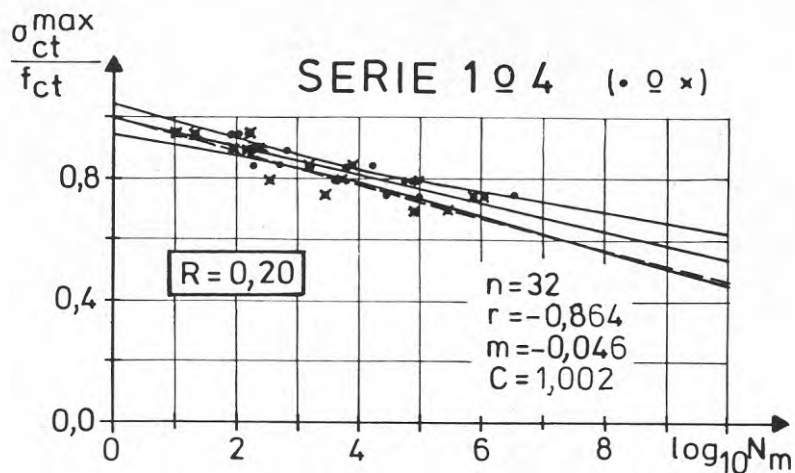


FIG. 4.7.10 Wöhler-diagram för betongens spräckdrag-hållfasthet med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekvation 4.1 med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

I Wöhler-kurvorna FIG. 4.7.10 kan vidare genom jämförelse observeras att betongens två hållfastheter ej inverkar på resultaten när redovisning sker dimensionslöst i form av $\sigma_{ct}^{\max}/f_{ct}$.

Regressionslinjerna i praktiskt taget samtliga Wöhlerdiagram utgår som sig bör från punkten $\sigma_{ct}^{\max}/f_{ct} = 1,00$, $\log_{10} N_m = 0$. Regressionskoefficienten $r > 0,85$ i samtliga serier utom Serie 6 där det tidigare omtalade avvikande provet med nr 57 sänker regressionskoefficienten till $r = 0,662$.

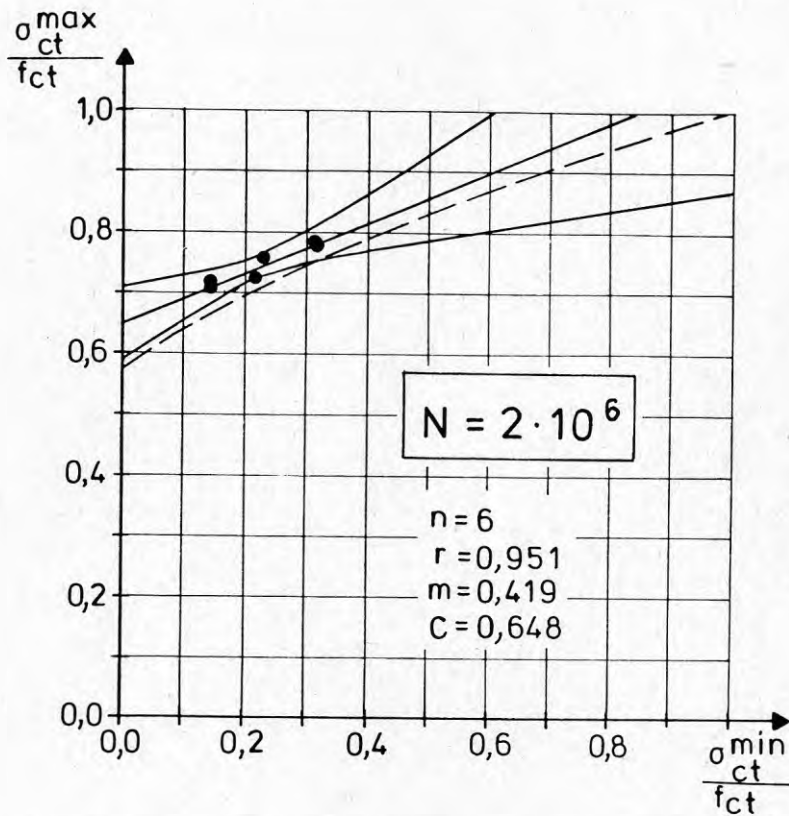


FIG. 4.7.11 Modifierat Goodman-diagram för betongens spräckdraghållfasthet. Linjär regression med 95%igt konfidensband. Ekvation 4.1 med $\beta = 0,0685$ inlagd som streckad linje.

I Wöhler-kurvorna i FIG. 4.7.8 och 4.7.9 har värdet på regressionslinjen för $N = 2 \cdot 10^6$ avlästs och avsatts i ett modifierat Goodman-diagram, FIG. 4.7.11. I detta diagram har även linjen för ekvation 4.1 med $\beta = 0,0685$ angivits streckad. Då denna linjen är nära rak bör den kunna jämföras med rät regressionslinje med 95%-igt konfidensband för de avsatta försöksvärdena.

Ekvationslinjen ligger något på säkra sidan under försökspunkterna och delvis utanför konfidensbandet. Den avviker dock ej mer, än att den mycket väl kan användas för beräkning av antalet lastcykler när dragutmattningsbrott kommer att inträffa.

4.8 Sammanfattning och slutsatser

De utförda försöken har gett att betongens utmattningsbenägenhet vid dragpåkänningar kan principiellt beskrivas med samma ekvation som för tryckpåkänningar. Den skrives

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 1 - 0,0685 (1 - R) \log_{10} N \quad \dots (4.2)$$

och gäller för $0 \leq R \leq 1$.

Ekvationen betyder att Wöhler-kurvor måste upprättas för konstanta R-värden.

Utmattningsförsöken har utförts på kubspräckprov med en ej helt väldefinierad dragspänningsfördelning. Spänningsfördelningen påverkar dock inte resultatet, då redovisning sker dimensionslöst genom att sätta utmattande spänning i relation till statisk spänning. Båda spänningarna har samma fördelning varvid i båda fallen brottet utlöses av maximala dragspänningen i fördelningen.

Två betonghållfastheter har provats och utmattningsbenägenheten för dragpåkänningar har konstaterats vara oberoende av dessa hållfasthetsnivåer. Försöken har utförts med $R = 0,20, 0,30$ och $0,40$. Totala antalet försök har varit 81 uppdelade på sex serier.

5. UNDERSÖKNING AV BETONGENS UTMATTNINGSHÅLLFASTHET VID MELLAN TRYCK OCH DRAG VÄXLANDE PÅKÄNNINGAR

5.1 Inledning och målsättning

Betongens utmattningsbenägenhet vid tryckpåkänningar har analyserats i ett flertal undersökningar. Betongens utmattning vid dragpåkänningar har huvudsakligen studerats med böjförök. Dessutom har tillkommit i Kap. 4 redovisade försök med kubspräckprov. I litteraturen beskrivna försök där påkänningar har växlat mellan tryck och drag under samma belastningscykel är mycket få. Murdock, J.W. och Kesler, C.E. (1958) och Murdock, J.W. (1965) visar i ett modifierat Goodman-diagram, här visad i FIG. 5.1.1, resultat av Clemmer (1922) samt Hatt (1924) och Crepps (1923). Dessa enstaka värden erhållna med böjbalksförök antyder att vid utmattning av betong när spänningar växlar mellan tryck och drag reagerar materialet gentemot utmattning, som om den maximala spänning (antingen tryck eller drag), som utgör den högsta andelen av respektive statiska brottspänning, kommer att bestämma antalet lastpulser för utmattningsbrott. Den lägsta spänningen i belastningscykeln uppfattas därvid som om den var noll.

Hatt (1924) och Crepps (1923) resultat ger stöd för följande hypotes. Under en belastningscykel utsätts betongen för dragtöjning i belastningsriktningen vid dragpåkänning och vinkelrätt denna vid tryckpåkänning. Både dragbrottet och tryckbrottet för betong kan uppfattas som överskridande av dragbrottöjning i respektive dragtöjningsriktning. Vid spänningen noll under belastningscykeln kommer således dragtöjningen att skifta riktning i betongen. Det kan antas att de skador som dragtöjningspulserna åstadkommer på betongen kan på grund av olika riktningar icke adderas och måste betraktas som av varandra oberoende.

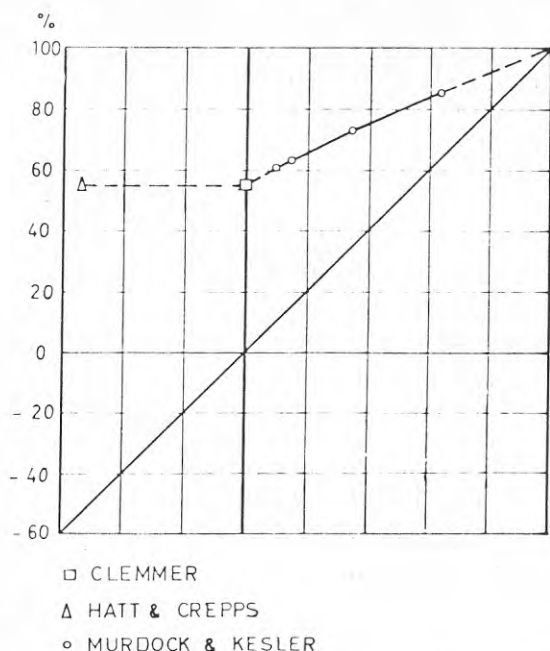


FIG. 5.1.1 Modifierat Goodman-diagram, enligt Murdock och Kesler (1958) för $N = 10^7$ lastpulser vid utmattningsbrott.

Hypotesens slutsats blir, att betong som utsätts för mellan tryck och drag växlande påkänningar, kan behandlas som betong där påkänningarna pulserar mellan noll och den maximala spänning, som utgör den största andelen av respektive statistiska brottspänning. Därvid stöder man sig på resultaten i Kap. 3 och 4 att betongens utmattningsbenägenhet är samma för såväl tryckt som dragen betong och att den kan beskrivas med de ekvivalenta ekvationerna (3.2) och (4.2).

Ekvationerna kan ej användas utanför området $0 \leq R \leq 1,0$, då den matematiska funktionen visad i FIG. 5.1.2 där radikalt avviker från vad som kan betraktas som utmattningssamband.

Det försöksbaserade underlaget för det gjorda resonemanget är ytterst knapphändigt. Föreliggande försök syftar därför till att om möjligt bättre belysa betongens utmattningsbenägenhet för mellan tryck och drag växlande påkänningar.

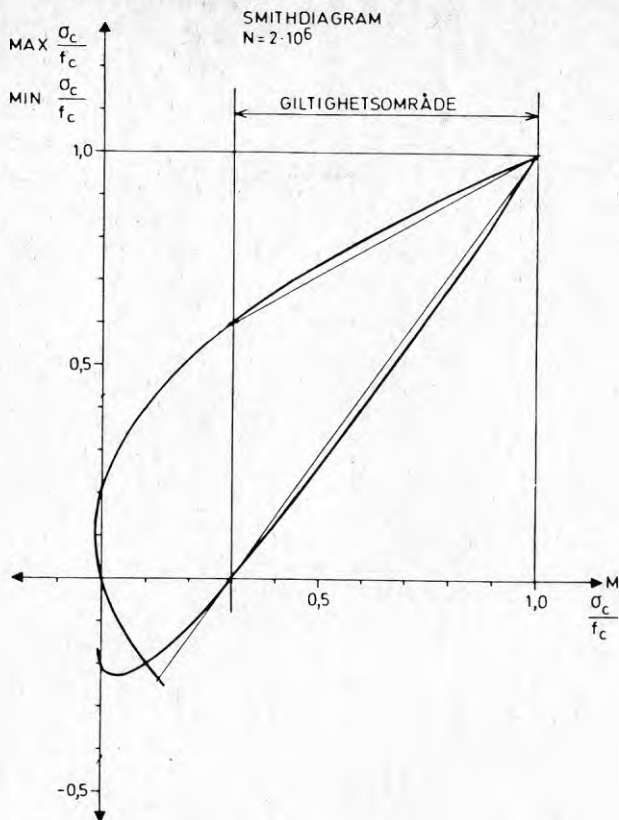


FIG. 5.1.2 Smith-diagram, som visar giltighetsområdet $0 \leq R \leq 1,0$ för ekvationerna (3.2) och (4.2), som allmänt kan skrivas: $\sigma_c^{\max}/f_c = 1 - 0,0685 (1 - R) \log_{10} N$.

Det är ytterst svårt att belasta betongprismor axiellt med växlande belastning. Provingästningen, geometriska och materialbetingade excentriciteter är besvärande. Lastprecisionen vid den låga lasten på dragsidan måste upprätthållas trots tiofaldigt högre last på trycksidan. En krympspricka kan ha förödande inverkan på resultatet vid dragpåkänning medan vid tryckpåkänning är den betydelslös.

Ett sidobelastat kubspräckprov kan användas för att åstadkomma mellan tryck- och dragpåkänning varierande lastpulser. Man kan därvid ej åstadkomma höga tryckpåkänningar, men dock tillräckligt höga för att kvalitativt

kunna bedöma i vilken utsträckning spänningsväxlingen har inflytande på betongens utmattningsbenägenhet. Provet är robust och enkelt att utföra.

För att kunna belasta betongkuber i ett spräckprov så att påkänningar pulserar mellan drag och tryck belastas kuberna, dels med konstant horisontellt verkande jämnt utbredd last Q och dels med vertikalt pulserande linjelast P , enligt FIG. 5.1.3. Linjelastbredden är därvid 10% av kubens kantlängd. Den teoretiska spänningsfördelningen, som erhålles, visas i FIG. 5.1.4 och består av en konstant tryckspänning som överlagras en pulserande dragspänning.

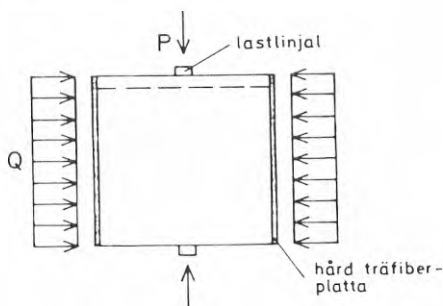


FIG. 5.1.3 Lasternas angrepp på kuben. Q är konstant last och P pulserande last.

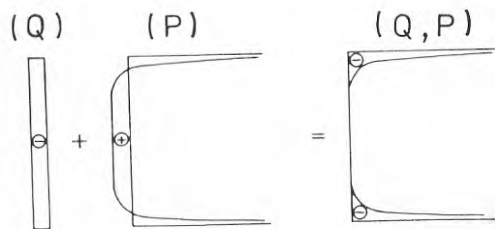


FIG. 5.1.4 Teoretisk spänningsfördelning i kubtvärsnittet genom linjelasterna P . Den konstant verkande tryckspänningen av lasten Q överlagras med den pulserande dragspänningen av lasten P . Specialfallet när tryckspänningen och dragspänningen är lika stora visas.

Spänningen vid kubmitt i kubspräckprovet tvärs planet genom linjelasterna P bestäms enligt:

$$\sigma = \frac{-Q}{a^2} + \frac{2P}{\pi a^2} \quad \dots\dots (5.1)$$

där

Q = horisontellt verkande på kubsidan,
jämnt fördelad last

P = kuben spräckande pulserande linjelast

a = kubens kantlängd

Den pulserande lasten P måste ha en sådan storlek att den ger en dragspänning som överlagrar tryckspänningen och räcker till för att åstadkomma spräckdragbrott. Lasten P begränsas av betongens krossning under ställinjalerna genom vilken lasten påläggs kuben. För betong med $f_{cc} = 45$ MPa får kontaktrycket mellan ställinjal och betong ej överskrida 180 MPa.

Ett spännings-deformationssamband uppmätt vid kubmitt vinkelrät emot planet genom linjelasterna för ett kubspräckprov belastat med lasterna Q och P visas i FIG. 5.1.4. Lasten Q möjliggör registrering av stora dragtöjningar innan dragbrottsprickan, orsakad av P, förstör trådtöjningsgivaren.

De utförda förundersökningarna tyder på att kubspräckprovet belastat på i FIG. 5.1.3 angivet sätt bör kunna användas för utmattningsprovning med mellan tryck och drag växlande påkänning.

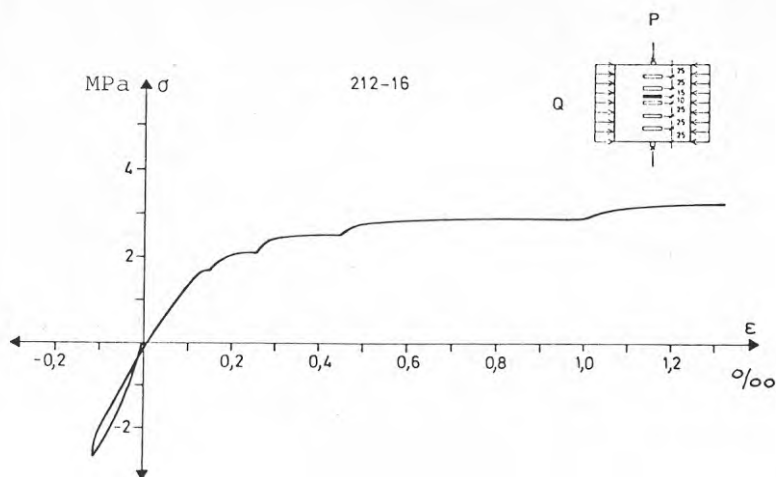


FIG. 5.1.4 Töjning kontinuerligt registrerad med x - y-skrivare för markerat mätställe nära kubmitt vid belastning av kubspräckprov med last Q och sedan med last P till brott. Angiven spänning gäller vinkelrätt emot planet genom linjelasterna P. Ojämnheter i kurvan beror på betongens krypning vid avläsning av övriga mätställen med datalogg då lasterna hölls vid konstant värde.

5.2 Försöksprogram

Försöksprogrammen och avsikten med dessa för Serie 212, Serie 260 och Serie 259 framgår av nedanstående uppställning. Försöken i Serie 212 ingår i ett examensarbete utfört av Ingemar Hermansson (1975).

PROVNINGSPROGRAM

Serie 212

Serien omfattar 44 betongkuber ($0,15^3 \text{ m}^3$).

Statisk hållfasthetsbestämning

Prov nr 212 - 1 t o m 6. Statisk tryck- och spräckdraghållfasthet bestäms 30 dygn efter betongkubernas tillverkning.

Prov nr 212 - 7 t o m 12. Statisk tryck- och spräckdrag-hållfasthet bestäms 49 dygn efter betongkubernas tillverkning. Mellan 30:de och 49:de dygnet efter tillverkningen utföres utmattningsprovning.

Utmattningsprovning. Serie 212:1 $f_{ct} = 3,57$ MPa

Serien avser att belysa om utmattningsbenägenheten för betong påverkas av att undre gränsspänningen ges olika värden vid mellan tryck och drag växlande påkänningar när övre gränsspänningen har konstant värde. Försöken utföres vid två tryckspänningsnivåer erhållna av last Q, se FIG. 5.1.3.

Prov nr	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}}$	Spänning från last Q $\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}}$
212-17	0,639	0	-0,50
18	0,639	-0,25	-0,50
19	0,620	0	-0,50
20	0,620	-0,25	-0,50
21	0,639	0	-0,75
22	0,639	-0,25	-0,75
23	0,639	-0,50	-0,75
24	0,620	0	-0,75
25	0,620	-0,25	-0,75
26	0,620	-0,50	-0,75

Utmattningsprovning. Serie 212:2 $f_{ct} = 3,57 \text{ MPa}$

Avsikten med Serie 2 är identisk med den för Serie 1.

Prov nr	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}}$	Spänning från last Q σ_{ct}/f_{ct}
212-33	0,639	0	-0,50
34	0,639	-0,25	-0,50
35	0,620	0	-0,50
36	0,620	-0,25	-0,50
37	0,639	0	-0,75
38	0,639	-0,25	-0,75
39	0,639	-0,50	-0,75
40	0,620	0	-0,75
41	0,620	-0,25	-0,75
42	0,620	-0,50	-0,75

Utmattningsprovning. Serie 212:3 $f_{ct} = 3,57$ MPa

Avsikten med Serie 3 är att belysa utmattningsbenägenheten för betong genom att variera övre gränsspänningen när undre gränsspänningen och tryckspänningen från last Q varieras enligt Serie 1 och 2.

Prov nr	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}}$	Spänning från last Q σ_{ct}/f_{ct}
212-43	0,639	0	-0,50
44	0,550	-0,25	-0,50
45	0,620	0	-0,50
46	0,525	-0,25	-0,50
47	0,639	0	-0,50
48	0,550	-0,25	-0,75
49	0,460	-0,50	-0,75
50	0,620	0	-0,75
51	0,525	-0,25	-0,75
52	0,430	-0,50	-0,75
46a	0,525	-0,25	-0,50
52a	0,430	-0,50	-0,75

Försöken 46a och 52a utgör repetition av försök 46 respektive 52 eftersom det fanns två extrakuber tillgängliga.

PROVNINGSPROGRAM

Serie 260

Serien omfattar 30 betongkuber ($0,15^3 \text{ m}^3$).

Statisk hållfasthetsbestämning

Provn nr 260 - 1 t o m 6. Statisk tryck- och spräckdrag-hållfasthet bestämes 1 år efter betongkubernas tillverkning omedelbart innan utmattningsprovserien påbörjas.

Utmattningsprovning

Fyra subserier A, B, C och D med 6 identiskt belastade provkroppar i varje provas. Övre och undre pulserande gränsspänningen varieras i fyra kombinationer vid konstant tryckspänning från last Q, se FIG. 5.1.3.

A) Provn nr 260 - 7, 8, 9, 10, 11 och 12. $f_{ct} = 2,39 \text{ MPa}$

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,519; \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = 0; \text{ Spänning från last } Q \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,50;$$

B) Provn nr 260 - 13, 14, 15, 16, 17 och 18. $f_{ct} = 2,39 \text{ MPa}$

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,0636; \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = 0; \text{ Spänning från last } Q \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,50;$$

C) Provn nr 260 - 19, 20, 21, 22, 23 och 24. $f_{ct} = 2,39 \text{ MPa}$

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,519; \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = -0,320; \text{ Spänning från last } Q \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,50;$$

D) Provn nr 260 - 25, 26, 27, 28, 29 och 30. $f_{ct} = 2,39 \text{ MPa}$

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,636; \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = -0,320; \text{ Spänning från last } Q \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,50;$$

PROVNINGSPROGRAM

Serie 259

Serien omfattar 42 betongkuber ($0,20^3 \text{ m}^3$) och 12 betongkuber ($0,15^3 \text{ m}^3$).

Statisk hållfasthetsbestämning

Kuber ($0,15^3 \text{ m}^3$) gjutna med betongsats I och II.

Prov nr 259-I - 1 t o m 12 och prov nr 259-II - 1 t o m 12.
Statisk tryck- och spräckdraghållfasthet bestäms 4 år efter betongkubernas tillverkning.

Kuber ($0,20^3 \text{ m}^3$) gjutna med betongsats I och II.

Prov nr 259-I - 6, 8 och 11 samt 259-II - 1, 2 och 14
statisk spräckdraghållfasthetsbestämning.

Prov nr 259-I - 1, 5 och 18 samt 259-II - 3, 4 och 6
statisk spräckdraghållfasthetsbestämning när lasten Q, se FIG. 5.1.3, pålägger kuben tryckspänningen 2,00 MPa.

Provningsprogrammet av ($0,20^3 \text{ m}^3$) kuberna möjliggör bedöma tryckspänningens inflytande på spräckdraghållfasthetsbestämningen. Med dessa kuber bestämd spräckdraghållfasthet lägges till grund för utmattningsprovningarna.

Utmattningsprovning

Betongsats I $f_{ct} = 3,98 \text{ MPa}$.

Avsikten med försöksserien är att testa utmattningsbenägenhet hos prov med spänning som pulserar mellan tryck och drag mot betongens Wöhler-kurva med $R = 0$.

Prov Nr	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}}$	Spänning från last Q $\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}}$
259-I-15	0,72	-0,36	-0,50
2	0,72	-0,36	-0,50
14	0,72	-0,36	-0,50
9	0,68	-0,36	-0,50
3	0,68	-0,36	-0,50
16	0,68	-0,36	-0,50
17	0,68	-0,36	-0,50
19	0,63	-0,36	-0,50
4	0,63	-0,36	-0,50
7	0,63	-0,36	-0,50
20	0,63	-0,36	-0,50
21	0,59	-0,36	-0,50
12	0,59	-0,36	-0,50
13	0,59	-0,36	-0,50
10	0,59	-0,36	-0,50

Betongsats II $f_{ct} = 3,59$ MPa.

Avsikten med försöksserien är samma som med prov tillverkade från betongsats I, dvs att testa utmattningsbenägenhet hos prov med spänning som pulserar mellan tryck och drag mot betongens Wöhler-kurva med $R = 0$.

Prov Nr	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}}$	Spänning från last Q $\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}}$
259-II-17	0,89	-0,44	-0,56
8	0,89	-0,44	-0,56
15	0,89	-0,44	-0,56
18	0,83	-0,44	-0,56
11	0,83	-0,44	-0,56
20	0,83	-0,44	-0,56
12	0,83	-0,44	-0,56
16	0,78	-0,44	-0,56
21	0,78	-0,44	-0,56
13	0,78	-0,44	-0,56
16	0,78	-0,44	-0,56
10	0,70	-0,44	-0,56
7	0,70	-0,44	-0,56
19	0,70	-0,44	-0,56

Provkub 259-II-5 förlorades på grund av maskinfel.

5.3 Betongens sammansättning

Betongen är proportionerad enligt Alexandersson & Buö (1970) och har nedanstående sammansättning i de tre försöksserierna.

Serie 212 omfattar 44 kuber ($0,15^3 \text{ m}^3$)

Portlandcement	291 kg/m ³
Kvartssand, Finhetsmodul M = 2,96	1051 "
Sten, kubisk granitmakadam M = 6,57	740 "
Maximal stenstorlek 16 mm	
vct = 0,686	
Konsistens 4 VB	
Avsedd 28-dygns hållfasthet 35 MPa	
Prov kropparna förvarades 2 dygn i form, 20 dygn under vatten, 5 dygn under våta filter och resterande tid fram till provning fritt i laboratoriet vid ~22°C och ~60% r.f.	

Serie 260 omfattar 30 kuber ($0,15^3 \text{ m}^3$)

Portlandcement	242 kg/m ³
Kvartssand, Finhetsmodul M = 3,0	1036 "
Sten, kubisk granitmakadam M = 6,5	848 "
Maximal stenstorlek 16 mm	
vct = 0,79	
Konsistens 4 VB	
Avsedd 28-dygns hållfasthet 25 MPa	
Prov kropparna förvarades 2 dygn i form, 7 dygn under vatten och 1 år i laboratoriet vid ~22°C och 60% r.f.	

Serie 259 omfattar två satser betong. Med varje sats betong göts 21 kuber ($0,20^3 \text{ m}^3$) och 12 kuber ($0,15^3 \text{ m}^3$)

Portlandcement	369 kg/m ³
Kvartssand, Finhetsmodul M = 3,49	1101 "
Sten, kubisk granitmakadam M = 6,50	713 "
Maximal stenstorlek 16 mm	
vct = 0,513	
Konsistens 4 VB	
Avsedd 28-dygns hållfasthet 50 MPa	
Prov kropparna förvarades 2 dygn i form, 7 dygn under vatten, 7 dygn under våta filter och sedan i 4 år i laboratoriet vid ~22°C och 60% r.f.	

Betongkuberna göts i planslipade stålformar med precisa mått. Bearbetning av betongen gjordes på vibrobord under 120 sekunder varvid överytan blev blank.

5.4 Betongens statiska hållfasthet

Betongens statiska objektkubhållfasthet bestämdes omedelbart före utmattningsprovningarna i serierna 260 och 259. Betongen i dessa serier var 1 resp. 4 år, varför man kan räkna med att hållfastheten icke ändrades under de veckor utmattningsprovningarna pågick. I Serie 212 bestämdes den statiska betonghållfastheten före och vid slutet av utmattningsprovningarna och konstaterades vara oförändrad beträffande spräckdraghållfasthet f_{ct} . Hos kubtryckhållfastheten f_{cc} noterades en liten ökning.

De statiska betonghållfastheterna för de tre serierna är sammanställda i TABELLERNÄ 5.4.1 t o m 5.4.5.

I Serie 259 TABELL 5.4.4 och 5.4.5 redovisas resultat, där det har undersökts huruvida den med last Q pålagda tryckspänningen påverkar den statiska spräckdraghållfastheten. Vid provningen av hälften av kuberna, dvs 3, överlagras tryckspänningen med spräckdragspänning, som stegras tills spräckdragbrott erhålles hos betongkuben. Denna brott-spräckdragspänning blir 5% större för betongsats I och 9% större för betongsats II än vad som har bestämts på lika många, dvs 3, jämförelsekuber utan tryckspänning. Avvikelsen ligger dock inom hållfasthetsintervallet, som bestämmes av standardavvikelsen för samtliga prov från respektive betongsats. Hos de 3 prov utan tryckspänning för varje betongsats finns ett brottvärde, som är större än hos 2 prov med tryckspänning. Det bedömes med hänsyn till de två konstateranden och till det ringa antalet prov att ingen större skillnad i brottspräckdraghållfasthet föreligger, varför medelvärdet för samtliga 6 prov inom varje betongsats lägges till grund för utmattningsprovningarna.

TABELL 5.4.1

Serie 212

 Medelvärde av 6 kuber $0,15^3 \text{ m}^3$. Ålder 30 dygn.

$$f_{ct} = 3,57 \text{ MPa}, \quad f_{cc} = 43,4 \text{ MPa}$$

 Medelvärde av 6 kuber $0,15^3 \text{ m}^3$. Ålder 49 dygn.

$$f_{ct} = 3,57 \text{ MPa}, \quad f_{cc} = 45,5 \text{ MPa}$$

I utmattningsförsöken relateras utmattningsbenägenheten till $f_{ct} = 3,57 \text{ MPa}$.

TABELL 5.4.2

Serie 260

 Betongkuber $0,15^3 \text{ m}^3$. Ålder 1 år

Kub Nr	Densitet kg/m^3	f_{ct} MPa	f_{cc} MPa
260-1	2231	1,99	25,7
2	2210	2,39	25,7
3	2237	2,05	26,2
4	2246	2,57	28,3
5	2237	2,57	28,8
6	2243	2,74	31,4
MV	2234	2,39	27,7
s	13	0,30	2,3

I utmattningsförsöken relateras utmattningsbenägenheten till $f_{ct} = 2,39 \text{ MPa}$.

TABELL 5.4.3

Serie 259

Betongsats I. Alder 4 år. Kuber $0,15^3 \text{ m}^3$.

Kub Nr	Densitet kg/m^3	f_{ct} MPa	f_{cc} MPa
259-I-1	2357	3,88	77,4
2	2341	4,16	-
3	2347	4,44	-
4	2315	4,25	62,0
5	2284	-	75,0
6	2300	-	72,7
7	2320	-	72,7
8	2323	4,28	72,2
9	2320	-	68,4
10	2339	-	68,4
11	2341	-	63,7
12	2335	4,81	-
MV s	2327 21	4,30 0,31	70,3 5,1

Betongsats II. Alder 4 år. Kuber $0,15^3 \text{ m}^3$.

Kub Nr	Densitet kg/m^3	f_{ct} MPa	f_{cc} MPa
259-II-1	2293	4,36	65,6
2	2337	-	69,8
3	2344	4,67	-
4	2389	4,62	-
5	2338	-	70,3
6	2359	4,44	-
7	2365	4,81	64,9
8	2296	4,78	-
9	2376	-	64,1
10	2308	-	66,5
11	2352	-	59,7
12	2348	-	64,1
MV s	2342 30	4,61 0,18	65,6 3,4

Vid de statistiska försöken, redovisade i TABELLERN 5.4.1, 5.4.2 och 5.4.3, bestäms spräckdraghållfasthet och tryckhållfasthet på samma betongkub enligt Nilsson (1962).

TABELL 5.4.4

Serie 259

Betongsats I. Ålder 4 år. Kuber $0,20^3 \text{ m}^3$.

Kub Nr	Densitet kg/m^3	Tryckspänning Q/a^2 MPa	f_{ct} MPa
259-I- 6	2323	0	3,92
- 8	2326	0	3,49
-11	2320	0	4,22
MV	2323	0	3,88
259-I- 1	2336	2,00	4,00
I- 5	2366	2,00	3,81
I-18	2334	2,00	4,43
MV	2345	2,00	4,08

Medelvärde för alla 6 prov: $f_{ct} = 3,98 \text{ MPa}$
 $s = 0,33 \text{ MPa}$

I utmattningsförsöken relateras utmattningsbenägenheten till $f_{ct} = 3,98 \text{ MPa}$.

TABELL 5.4.5

Serie 259

Betongsats II. Ålder 4 år. Kuber $0,20^3 \text{ m}^3$.

Kub Nr	Densitet kg/m^3	Tryckspänning Q/a^2 MPa	f_{ct} MPa
259-II- 1	2331	0	3,92
II- 2	2354	0	3,33
II-14	2341	0	3,07
MV	2342	0	3,44
259-II-3	2344	2,00	3,41
II-4	2358	2,00	3,65
II-6	2365	2,00	4,18
MV	2357	2,00	3,75

Medelvärde för alla 6 prov: $f_{ct} = 3,59 \text{ MPa}$
 $s = 0,41 \text{ MPa}$

I utmattningsförsöken relateras utmattningsbenägenheten till $f_{ct} = 3,59 \text{ MPa}$.

5.5 Provningsanordning för utmattningsförsök

I avsnitt 5.1 har angivits belastningssättet för att åstadkomma mellan drag och tryck pulserande spänning i betongkuberna.

Följande belastningssekvens tillämpas vid utmattningsförsöken. Provkuberna belastas först med tryckspänning från lasten Q , som pålägges med en 600 kN:s hydraulisk domkraft inom en horisontellt liggande stålram. Sedan belastas provkuberna med högsta spräckdragspänning, så att avsett σ_{ct}^{max}/f_{ct} -värde uppnås. Spräckdragspänningen fås från lasten P som påföres via lastlinjaler med en 600 kN:s hydraulisk domkraft. Den pulserande spräckdragspänningen pålägges provet genom att undre gränsspänningen under ca 200 lastcykler sänkes till avsett värde. Dessa lastcykler medräknas ej i antalet lastcykler vid utmattningsbrott. Den pulserande lasten genereras av en 300 cm³ Losenhausen pulsator. Lastpulsfrekvensen är 3,5 Hz. Den av linjelasterna orsakade spräckdragspänningen överlagrar vid provningen tryckspänningen och ger de önskade gränsspänningarna och spänningsamplituden. Provningsanordningen visas schematiskt i FIG. 5.5.1 och är fotograferad i FIG. 5.5.2 och 5.5.3.

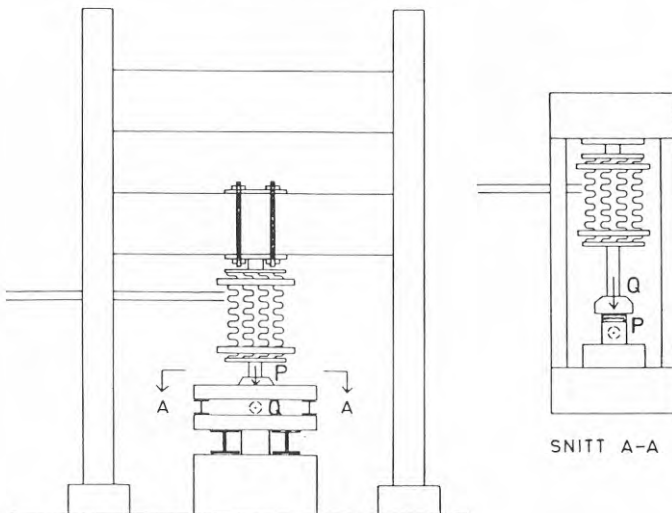


FIG. 5.5.1 Skiss över provningsanordning för utmattningsprovning av betongkuber utsatta för mellan drag och tryck pulserande påkänningar.

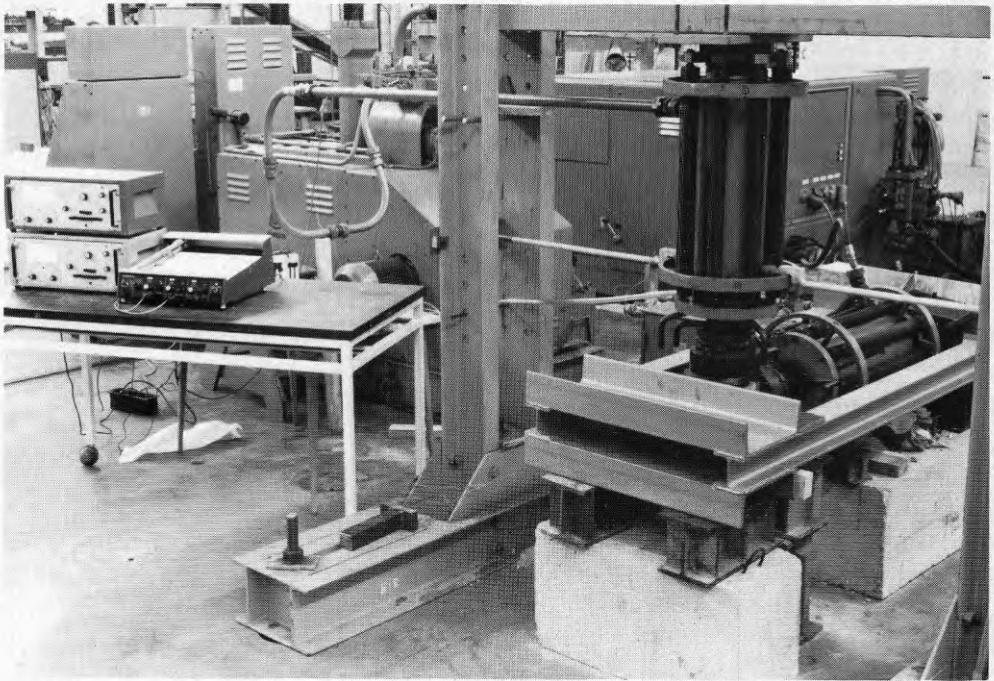


FIG: 5.5.2 Provningsanordning för utmattningsprovning av betongkuber utsatta för mellan drag och tryck pulserande påkänningar.

Den horisontella trycklasten Q hindrar ofta spräckdrag-spricka att framträda synligt för ögat vid utmattningsbrott. Pulsatorn kan i vissa fall fortsätta att pålägga provkuben lastpulser med lasten P , trots att spräckdragbrott uppkommit. Den spruckna kuben kan nämligen med stöd av horisontallasten Q ofta motstå fortsatta lastpulser. Utmattningsbrott har emellertid uppkommit i och med att den hårfina spräckdragsprickan har framträtt. För indikering av sprickan nyttjas 2 seriekopplade trådtöjningsgivare med mätbas 60 mm mitt på var sin sida om kuben tvärs den förväntade sprickan. Givartråden brister när sprickan uppkommer och ger en signal som stoppar belastningsmaskinerna. Töjningsmätningen utförs vid den pulserande lastens maximalvärde. Eftersom belastningsfrekvensen är för hög för registrering med en x-y-skrivare

likriktas växelspänningssignalen från trådtöjningsgivarna och upplagras som medelvärde från ca 100 belastningscykler i en kondensator, varpå en punktskrivare registrerar töjningsvärdet. Vid sprickbildning växer den uppmätta töjningen över alla gränser.

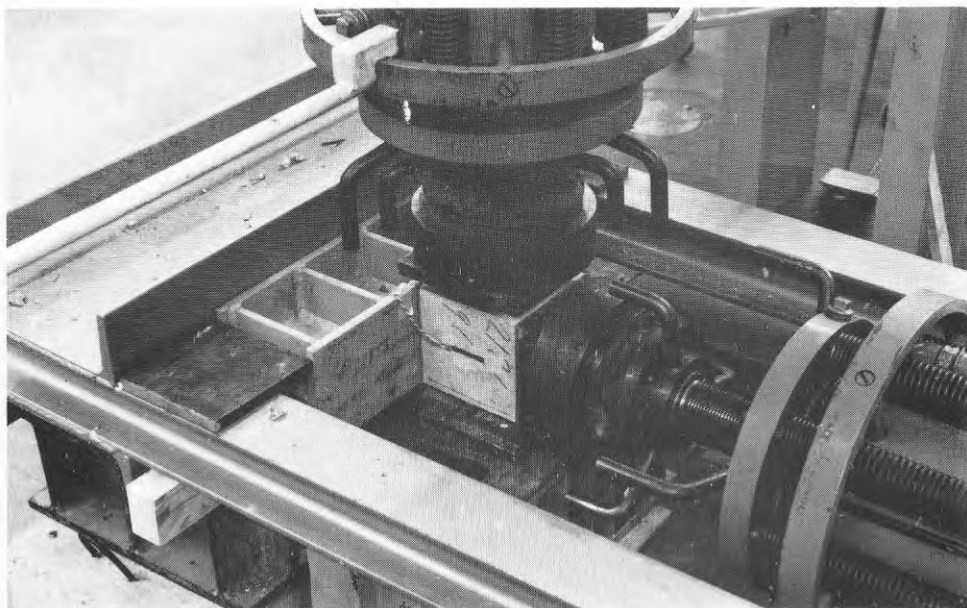


FIG. 5.5.3 Provkub i provningsanordning. Horisontell domkraft lägger på lasten Q som ger tryckspänning i det tvärsnitt där dragspänning erhålles från den vertikala domkraftslasten P , som införs i kuben som linjelast. Trådtöjningsgivaren för sprickindikering syns vid kubmitt.

5.6 Resultat från utmattningsförsöken

Försöken har genomförts i tre serier med beteckningar 212, 260 och 259. Som framgår av försöksprogrammet har den första serien upplagts så att inverkan av vissa parametrar skall bli besvarade. Den andra och tredje serien är upplagd så att den kompletterar försöksresultaten i den första serien.

I försöksanalysen uttolkas till att börja med resultaten i Serie 212 och sedan behandlas resultaten i alla tre serierna samfällt.

Försöksresultaten från alla tre serierna är sammanställda i TABELL 5.6.1, 5.6.2 och 5.6.3. I tabellerna anges högsta och lägsta gränsen för den sinusformade pulserande spänningen. Positiv spänning avser dragpåkänning och negativ tryckpåkänning. Vidare anges den tryckpåkänning, som pålägges provkuben med last Q och som överlagras av den pulserande spräckdragspänningen från lasten P . Samtliga tre spänningar ges dimensionslöst relaterade till för motsvarande provkroppstyp inom samma försöksserie fastställd statisk spräckdraghållfasthet. Försöksresultatet anges som logaritmen av antalet lastpulser $\log_{10} N_m$, som betongen har motstått de påkänningar den utsatts för.

I försöksanalysen medtages även provkuber där belastningssekvenserna avbröts utan att utmattningsbrott uppstod. I dessa försök har angetts att antalet lastpulser vid brott är fler än det uppmätta N_m -värdet anger.

I Kap. 3 och 4 har med stor sannolikhet konstaterats att betong har samma utmattningsbenägenhet för tryckpåkänningar och dragpåkänningar. I inledningen till detta kapitel 5 har framförts hypotesen att utmattningsmotståndet vid mellan tryck och drag växlande påkänningar bestämmas av de påkänningar, antingen tryck eller drag med undre spännings-

gränsen $\sigma_C^{\min}/f_{ct} = 0$, som var för sig är mest utmattande. Utmattningsbenägenheten bestäms därvid med ekv (3.2) resp. (4.2).

För att kunna utföra en prövning av hypotesen beräknas antalet lastpulser vid utmattningsbrott N_C med ekv (4.2). Därvid sätts $R = 0$ och $\beta = 0,0685$. Beräkning utföres för dragpåkänningar, ty de utgör väsentligt större andel av den statistiska spräckdraghållfastheten än de pulserande tryckpåkänningarna av den statistiska tryckhållfastheten. Logaritmen för antalet beräknade lastpulser vid utmattningsbrott N_C anges i tabellerna.

För provkub 212 - 26 blir sålunda detta värde, beräknat med ekv (4.2) och $R = 0$, $\beta = 0,685$ samt $\sigma_{ct}^{\max}/f_{ct} = 0,620$ för utmattande dragpåkänningar $\log_{10} N_C = 5,547$. För utmattande tryckpåkänningar beräknat med ekv (3.2) och $R = 0$, $\beta = 0,0685$ samt $\sigma_{cc}^{\max}/f_{cc} \sim -0,5 \cdot f_{ct}/f_{cc} = 0,50 \cdot 3,57/43,4 = 0,041$ blir $\log_{10} N_C = 14,000$. Dragpåkänningarna, som ger färre antal lastcykler vid brott, är således avgörande för utmattningen och med dessa prövas då hypotesen.

Sist i tabellerna redovisas relationen mellan logaritmen för uppmätt antal lastpulser vid utmattningsbrott $\log_{10} N_m$ och enligt ovan för dragpåkänningar beräknat värde $\log_{10} N_C$. Medelvärden och standardavvikelser för de enskilda försöksgrupperna inom försöksserierna har framräknats.

TABELL 5.6.1 Serie 212 $f_{ct} = 3,57 \text{ MPa}$

Prov Nr	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}}$	Spänning från last Q $\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}}$	$\log_{10} N_m$	$\log_{10} N_c$ R = 0 $\beta = 0,0685$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
Serie 212:1						
212-17	0,639	0	-0,50	5,064	5,270	0,961
18	0,639	-0,25	-0,50	3,398	5,270	0,645
19	0,620	0	-0,50	3,845	5,547	0,693
20	0,620	-0,25	-0,50	3,146	5,547	0,567
21	0,639	0	-0,75	5,158	5,270	0,978
22	0,639	-0,25	-0,75	0	5,270	0
23	0,639	-0,50	-0,75	3,255	5,270	0,618
24	0,620	0	-0,75	5,892	5,547	1,063
25	0,620	-0,25	-0,75	3,643	5,547	0,657
26	0,620	-0,50	-0,75	6,130	5,547	1,105
					MV	0,729
					s	0,325
Serie 212:2						
212-33	0,639	0	-0,50	4,415	5,270	0,838
34	0,639	-0,25	-0,50	3,806	5,270	0,722
35	0,620	0	-0,50	3,398	5,547	0,613
36	0,620	-0,25	-0,50	0	5,547	0
37	0,639	0	-0,75	5,502	5,270	1,044
38	0,639	-0,25	-0,75	0	5,270	0
39	0,639	-0,50	-0,75	0	5,270	0
40	0,620	0	-0,75	5,243	5,547	0,945
41	0,620	-0,25	-0,75	3,000	5,547	0,541
42	0,620	-0,50	-0,75	2,477	5,547	0,447
					MV	0,515
					s	0,398
Serie 212:3						
212-43	0,639	0	-0,50	4,330	5,270	0,822
44	0,550	-0,25	-0,50	3,176	6,569	0,484
45	0,620	0	-0,50	5,230	5,547	0,943
46	0,525	-0,25	-0,50	>6,693	6,934	> 0,965
47	0,639	0	-0,75	3,097	5,270	0,588
48	0,550	-0,25	-0,75	3,505	6,569	0,534
49	0,460	-0,50	-0,75	4,833	7,883	0,613
50	0,620	0	-0,75	0	5,547	0
51	0,525	-0,25	-0,75	1,778	6,934	0,256
52	0,430	-0,50	-0,75	4,602	8,321	0,553
46a	0,525	-0,25	-0,50	5,486	6,934	0,791
52a	0,430	-0,50	-0,75	4,310	8,321	0,518
					MV	> 0,589
					s	0,276
För serie 212:1, :2 och :3						
					MV	0,610
					s	0,334

TABELL 5.6.2 Serie 260 $f_{ct} = 2,39$ MPa

Prov Nr	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}}$	Spänning från last Q $\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}}$	$\log_{10} N_m$	$\log_{10} N_c$ R = 0 $\beta = 0,0685$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
260-7	0,519	0	-0,50	5,020	7,022	0,715
8	"	"	"	>6,939	"	>0,988
9	"	"	"	>7,135	"	>1,016
10	"	"	"	>6,981	"	>0,994
11	"	"	"	>6,936	"	>0,988
12	"	"	"	>6,955	"	>0,909
				MV >6,661	MV =	>0,935
					s =	0,114
260-13	0,636	0	-0,50	3,556	5,314	0,669
14	"	"	"	3,000	"	0,565
15	"	"	"	>6,630	"	>1,247
16	"	"	"	>6,517	"	>1,227
17	"	"	"	5,061	"	0,952
18	"	"	"	4,670	"	0,879
				MV >4,906	MV =	>0,923
					s =	0,280
260-19	0,519	-0,320	-0,50	4,729	7,022	0,673
20	"	"	"	>6,885	"	>0,980
21	"	"	"	>6,702	"	>0,954
22	"	"	"	>6,787	"	>0,966
23	"	"	"	6,387	"	0,910
24	"	"	"	4,656	"	0,663
				MV >6,024	MV =	>0,858
					s =	0,149
260-25	0,636	-0,320	-0,50	5,927	5,314	1,115
26	"	"	"	4,100	"	0,772
27	"	"	"	5,656	"	1,064
28	"	"	"	5,045	"	0,950
29	"	"	"	4,496	"	0,846
30	"	"	"	4,145	"	0,780
				MV 4,895	MV =	0,921
					s =	0,146

TABELL 5.6.3 Serie 259 $f_{ct} = 3.98$ MPa för betongsats I och $f_{ct} = 3.59$ för betongsats II.

Prov Nr	$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$	$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}}$	Spänning från last Q $\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}}$	$\log_{10} N_m$	$\log_{10} N_c$ R = 0 $\beta = 0,0685$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
259-I-15	0,72	-0,36	-0,50	0	4,088	0
2	0,72	-0,36	-0,50	2,826	4,088	0,691
14	0,72	-0,36	-0,50	4,270	4,088	1,045
9	0,68	-0,36	-0,50	2,778	4,672	0,595
3	0,68	-0,36	-0,50	2,820	4,672	0,604
16	0,68	-0,36	-0,50	5,395	4,672	1,155
17	0,68	-0,36	-0,50	5,225	4,672	1,119
19	0,63	-0,36	-0,50	>6,141	5,401	>1,138
4	0,63	-0,36	-0,50	>6,565	5,401	>1,215
7	0,63	-0,36	-0,50	5,283	5,401	0,978
20	0,63	-0,36	-0,50	5,162	5,401	0,956
21	0,59	-0,36	-0,50	5,024	5,985	0,840
12	0,59	-0,36	-0,50	6,346	5,985	1,060
13	0,59	-0,36	-0,50	4,996	5,985	0,835
10	0,59	-0,36	-0,50	4,984	5,985	0,833
					MV = >0,870	
					s = 0,312	
259-II-17	0,89	-0,44	-0,56	2,544	1,606	1,585
8	0,89	-0,44	-0,56	2,778	1,606	1,730
15	0,89	-0,44	-0,56	0	1,606	0
18	0,83	-0,44	-0,56	2,929	2,482	1,181
11	0,83	-0,44	-0,56	4,001	2,482	1,613
20	0,83	-0,44	-0,56	3,591	2,482	1,447
12	0,83	-0,44	-0,56	>3,876	2,482	>1,563
16	0,78	-0,44	-0,56	5,000	3,212	1,558
21	0,78	-0,44	-0,56	2,778	3,212	0,865
13	0,78	-0,44	-0,56	2,699	3,212	0,840
16	0,78	-0,44	-0,56	3,519	3,212	1,095
10	0,70	-0,44	-0,56	6,447	4,380	1,473
7	0,70	-0,44	-0,56	6,353	4,380	1,451
19	0,70	-0,44	-0,56	5,026	4,380	1,148
					MV = >1,254	
					s = 0,457	
Prov kub 259-II-5 förlorades p g a maskinfel.				För serie I och II	MV = >1,056	
					s = 0,428	

Inom Serie 212 kan analyseras några parametrars inflytande på försöksresultatet.

Utmattningsbenägenheten för betong när undre spänning-gränsen vid pulserande last sänkes från $\sigma_{ct}/f_{ct} = 0$ till $-0,25$ framgår av TABELL 5.6.4 och 5.6.5.

TABELL 5.6.4

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,0639. \text{ Spänning från last } Q \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,50$$

$\frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = 0$		$\frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = -0,25$	
Prov Nr	$\log_{10} N_m$	Prov Nr	$\log_{10} N_m$
212-17	5,064	212-18	3,398
33	4,415	34	3,806
43	4,330	MV	3,602
MV	4,603		

TABELL 5.6.5

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,620. \text{ Spänning från last } Q \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,50$$

$\frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = 0$		$\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,25$	
Prov Nr	$\log_{10} N_m$	Prov Nr	$\log_{10} N_m$
212-19	3,845	212-20	3,146
35	3,398	36	0
45	5,230	MV	1,573
MV	4,158		

Av TABELLERNÄ 5.6.4 och 5.6.5 framgär entydigt att utmattningsbenägenheten ökar belyst av att N_m -värdet sjunker om undre spänningstränsen sänks från noll in i tryckspänningstränsområdet. Detta motsäger den framlagda hypotesen.

I TABELLERNÄ 5.6.6 och 5.6.7 belyses samma parameterändring i tre steg och vid större tryckpåkänning från lasten Q.

TABELL 5.6.6

$$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} = 0,0639. \quad \text{Spänning från last Q} \quad \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,75$$

$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}} = 0$		$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}} = -0,25$		$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}} = -0,50$	
Prov Nr	$\log_{10} N_m$	Prov Nr	$\log_{10} N_m$	Prov Nr	$\log_{10} N_m$
212-21	5,158	212-22	0	212-23	3,255
37	5,502	38	0	39	0
47	3,097				
MV	4,586	MV	0	MV	1,628

TABELL 5.6.7

$$\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}} = 0,620. \quad \text{Spänning från last Q} \quad \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,75$$

$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}} = 0$		$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}} = -0,25$		$\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}} = -0,50$	
Prov Nr	$\log_{10} N_m$	Prov Nr	$\log_{10} N_m$	Prov Nr	$\log_{10} N_m$
212-24	5,892	212-25	3,643	212-26	6,130
40	5,243	41	3,000	42	2,477
50	0				
MV	5,568	MV	3,322	MV	4,304

Jämförelsen i TABELL 5.6.6 och 5.6.7 ger att utmattningsbenägenheten ökar när undre spänningsgränsen sänks från noll in i tryckspänningsområdet. Resultatet är dock ej helt entydigt genom att en sänkning av undre spänningsgränsen från -0,25 till -0,50 minskar utmattningstendensen

Dessa jämförelser bygger på ett fåtal försök med ett sannolikt spridningsområde som i sig integrerar de konstaterade tendenserna i resultaten. Ett något större antal försök för samma jämförelse erbjuder Serie 260 i TABELL 5.6.2. Där kan konstateras att för

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,519, \quad \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = 0 \text{ blir } MV \log_{10} N_m = > 6,661$$

och

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,519 \quad \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = -0,320 \text{ blir } MV \log_{10} N_m = > 6,024$$

samt för

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,636 \quad \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = 0 \text{ blir } MV \log_{10} N_m = > 4,906$$

och

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,636 \quad \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = -0,320 \text{ blir } MV \log_{10} N_m = 4,895$$

Tryckspänningen från lasten Q är $\sigma_{ct}/f_{ct} = -0,50$ för samtliga prov.

I sammansättningen visade medelvärden på $\log_{10} N_m$ bygger på försök av vilka ett antal ej har uppnått utmattningsbrott för de redovisade antal lastpulser. Därför kan knappast några bestämda tendenser utläsas ur detta försöksmaterial.

Inverkan av den pålagda tryckspänningsnivån från lasten Q bör ej påverka utmattningsbenägenheten, då denna påkänning ej aktivt deltar i utmattningsförloppet. Betydelsen av

denna parameter belyses av jämförelsen i TABELL 5.6.8 t o m 11. Resultaten i de tre första tabellerna ger kortare överlevnad för betongen, dvs lägre $\log_{10} N_m$ -värde, om tryckspänningen från last Q är större. Motsatsen fås av den sista

TABELL 5.6.8

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,639; \quad \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = 0;$$

Spänning från last Q		Spänning från last Q	
$\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,50$		$\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,75$	
Prov Nr	$\log_{10} N_m$	Prov Nr	$\log_{10} N_m$
212-17	5,064	212-21	5,158
33	4,415	37	5,502
43	4,330	47	3,097
MV	4,603	MV	4,586

TABELL 5.6.9

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 0,620; \quad \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{f_{ct}} = 0;$$

Spänning från last Q		Spänning från last Q	
$\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,50$		$\frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = -0,75$	
Prov Nr	$\log_{10} N_m$	Prov Nr	$\log_{10} N_m$
212-19	3,845	212-24	5,892
35	3,398	40	5,243
45	5,230	50	0
MV	4,158	MV	3,711

TABELL 5.6.10

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{\bar{f}_{ct}} = 0,639; \quad \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{\bar{f}_{ct}} = -0,25;$$

Spänning från last Q		Spänning från last Q	
$\frac{\sigma_{ct}}{\bar{f}_{ct}} = -0,50;$		$\frac{\sigma_{ct}}{\bar{f}_{ct}} = -0,75$	
Prov	$\log_{10} N_m$	Prov	$\log_{10} N_m$
Nr		Nr	
212-18	3,398	212-22	0
34	3,806	38	0
MV	3,602	MV	0

TABELL 5.6.11

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{\bar{f}_{ct}} = 0,620; \quad \frac{\sigma_{ct}^{\min}}{\bar{f}_{ct}} = -0,25;$$

Spänning från last Q		Spänning från last Q	
$\frac{\sigma_{ct}}{\bar{f}_{ct}} = -0,50$		$\frac{\sigma_{ct}}{\bar{f}_{ct}} = -0,75$	
Prov	$\log_{10} N_m$	Prov	$\log_{10} N_m$
Nr		Nr	
212-20	3,146	212-25	3,643
36	0	41	3,000
MV	1,573	MV	3,322

tabellen. Skillnaderna i $\log_{10} N_m$ -medelvärdena är emellertid ej stor och där den finns tydligt markerad orsakas den av att någon av provkuberna motstod endast en lastcykel. Spridningsfälten för de enskilda värdena i de båda undersökta fallen överlagrar varandra. Slutsatsen av detta begränsade material i denna undersökning får bli att sannolikt saknar den med lasten Q pålagda tryckpåkänningen betydelse på betongens utmattningsbenägenhet för de aktuella belastningsfallen.

Under förutsättning att tryckspänningsnivån pålagd av last Q saknar inverkan på betonens utmattning kan försöken i de tre serierna 212, 260 och 259 analyseras samfällt. I undersökningen antas att hypotesen given i inledningen är sann. Det betyder att utmattningsbenägenheten för betong med mellan drag och tryck växlande påkänningar kan beräknas med ekv (4.2) med $R = 0$, om maximala dragpåkänningen utgör större andel av den statistiska draghållfastheten än maximala tryckpåkänningen av den statistiska tryckhållfastheten. De sålunda beräknade antal lastväxlingar vid utmattningsbrott N_c kan då jämföras med uppmätt värde N_m . Jämförelsen göres med antalet lastväxlingar logarimerade i form av relationen $\log_{10} N_m / \log_{10} N_c$.

För provkuber med $\sigma_{ct}^{min} / f_{ct} = 0$, dvs $R = 0$, bör ekvation (4.2) ge samstämmighet enligt undersökningsresultatet i Kap. 4. I FIG. 5.6.1 har ett histogram uppställts för relationen $\log_{10} N_m / \log_{10} N_c$ för de 24 försök som har undre spänningsgränsen noll. En normalfördelningskurva har lagts över histogrammet. Medelvärdet för $\log_{10} N_m / \log_{10} N_c = 0,860$ med standardavvikelsen $s = 0,258$. Histogrammet uppvisar en topp för $\log_{10} N_m / \log_{10} N_c \sim 1,0$, men spridningen i resultatet sänker medelvärdet därunder.

I FIG. 5.6.2 visas histogrammet för $\log_{10} N_m / \log_{10} N_c$ för provkuber med $\sigma_{ct}^{min} / f_{ct} < 0$. N_c -värdet i relationen är dock fortfarande beräknat med ekvation (4.2) och $R = 0$. Det visar sig att för de här behandlade 61 provkuberna blir medelvärdet på $\log_{10} N_m / \log_{10} N_c = 0,841$, dvs praktiskt

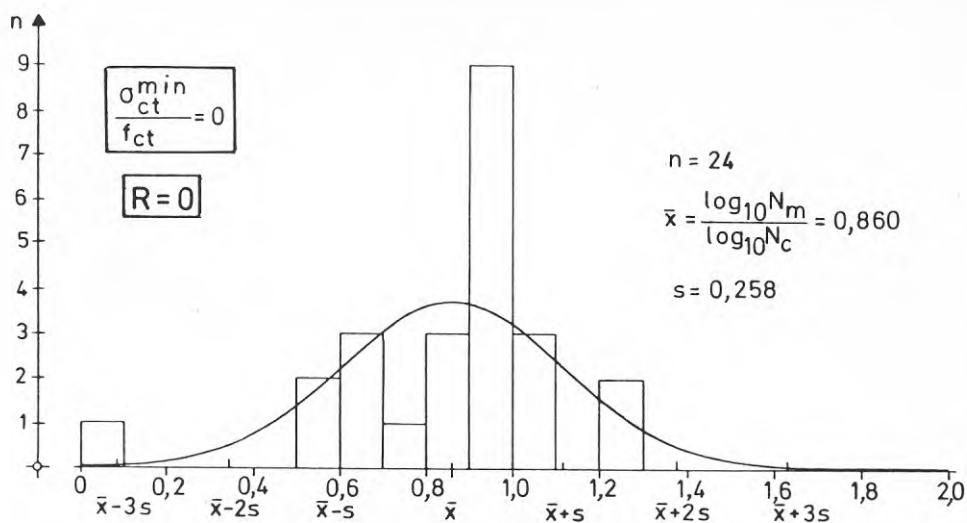


FIG. 5.6.1 Histogram med normalfördelningskurva över relationen $\log_{10} N_m / \log_{10} N_c$ för utmattningsprov med $\sigma_{ct} / \bar{f}_{ct} = 0$. N_c är beräknad med ekv (4.2) och $R = 0$.

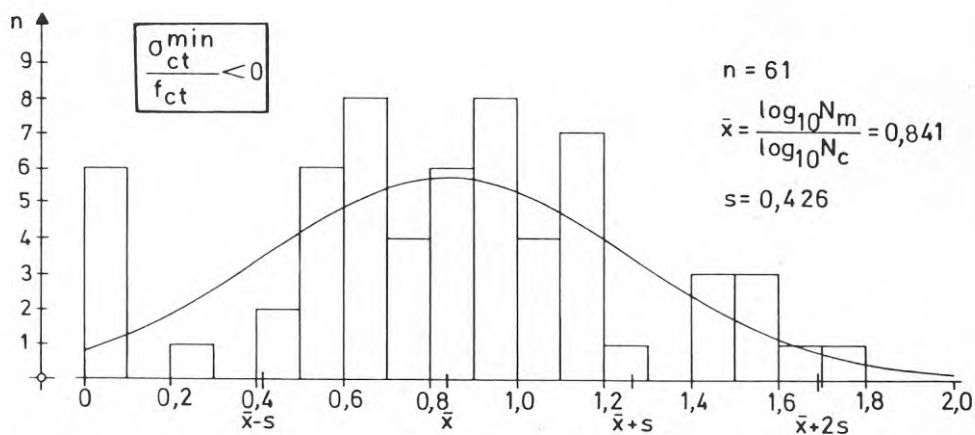


FIG. 5.6.2 Histogram med normalfördelningskurva över relationen $\log_{10} N_m / \log_{10} N_c$ för utmattningsprov med $\sigma_{ct} / \bar{f}_{ct} < 0$. N_c är beräknad med ekv (4.2) och $R = 0$.

taget detsamma för provkuber med $\sigma_{ct}^{\min}/f_{ct} = 0$. Spridningen och därmed standardavvikelsen $s = 0,426$ blir dock större. Detta torde innebära att den i inledningen framförda hypotesen kan vara riktig.

Eftersom försöksvärdena i båda histogrammen i FIG. 5.6.1 och 5.6.2 förefaller tillhöra samma population upprättas histogram över samtliga 84 försök i de tre serierna i FIG. 5.6.3. Medelvärdet blir på $\log_{10} N_m / \log_{10} N_c = 0,846$ och standardavvikelsen $s = 0,385$.

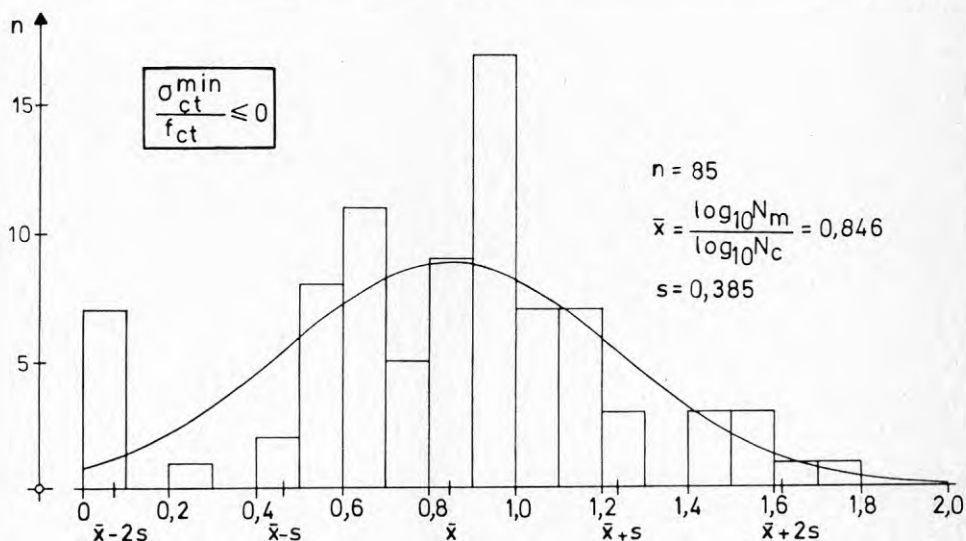


FIG. 5.6.3 Histogram med normalfördelningskurva över relationen $\log_{10} N_m / \log_{10} N_c$ för samtliga utmattningsprov. N_c är beräknad med ekv (4.2) och $R = 0$.

För att mera översiktligt kunna bedöma de erhållna resultaten visas $\log_{10} N_m$ som funktion av $\log_{10} N_c$ i FIG. 5.6.4 för försök med $\sigma_{ct}^{\min}/f_{ct} = 0$, i FIG. 5.6.5 för försök med $\sigma_{ct}^{\min}/f_{ct} < 0$ och i FIG. 5.6.6 för samtliga försök. I diagrammen har utförts rätlinjig regression och 95-igt konfidensband inlagts. Vidare har inlagts en streckad linje som representerar ekvation (4.2) med $R = 0$. Det kan konstateras att för försök med $R = 0$, FIG. 5.6.4, ekvations-sambandet (4.2) ligger inom konfidensbandet trots att regressionslinjens riktning blir osäker på grund av försöksvärdenas koncentration till ett ställe i diagrammet.

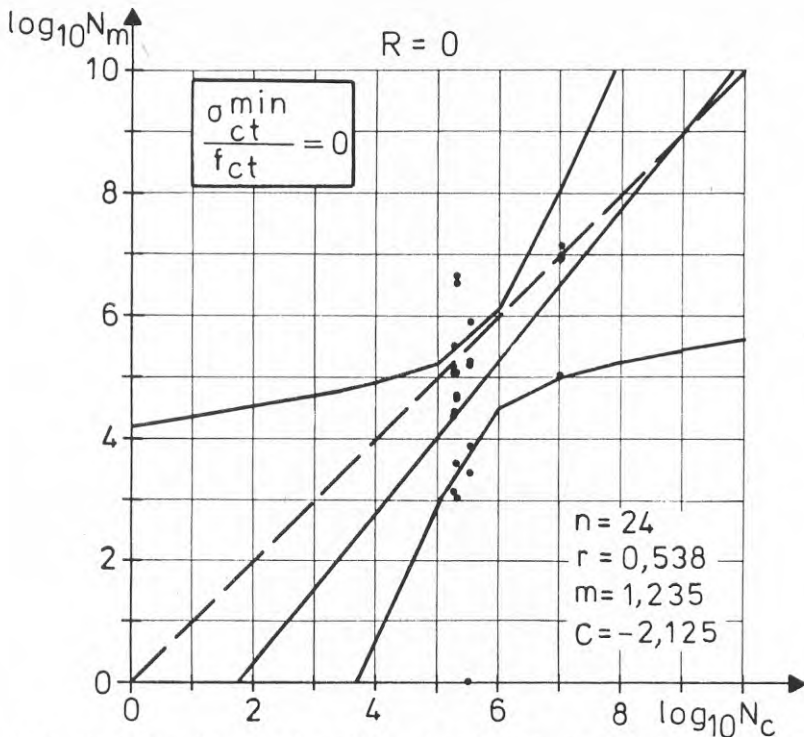


FIG. 5.6.4 Samband mellan beräknat antal lastväxlingar vid dragutmattningsbrott N_C och uppmätt N_m för betong. N_C är beräknad med ekv (4.2) och $R = 0$. Streckad linje svarar mot $N_m = N_C$.

Försök med $\sigma_{ct}^{\min}/f_{ct} < 0$, i FIG. 5.6.5, visar större spridning. Ekvationssambandet (4.2) med $R = 0$ ligger ej inom konfidensbandet. Drygt hälften av försöksvärdena ligger grupperade kring den streckade linjen för ekvation (4.2) med en spridning, vars storlek är ungefär samma som förekommer vid analys av tryckutmattning i Kap. 3 och spräckdargutmattning i Kap. 4. Övriga värden uppvisar för få uppmätta lastväxlingar N_m vid utmattningsbrott i jämförelse med de beräknade N_C . Motsvarande kan konstateras om för samtliga 85 försök uppmätt antal lastväxlingar jämföres med ekvation (4.2) och $R = 0$ beräknade värden i FIG. 5.6.6.

Det finns ingen direkt anledning till att betongen skall ge större spridning i försöksvärden, när spänningen pulserar

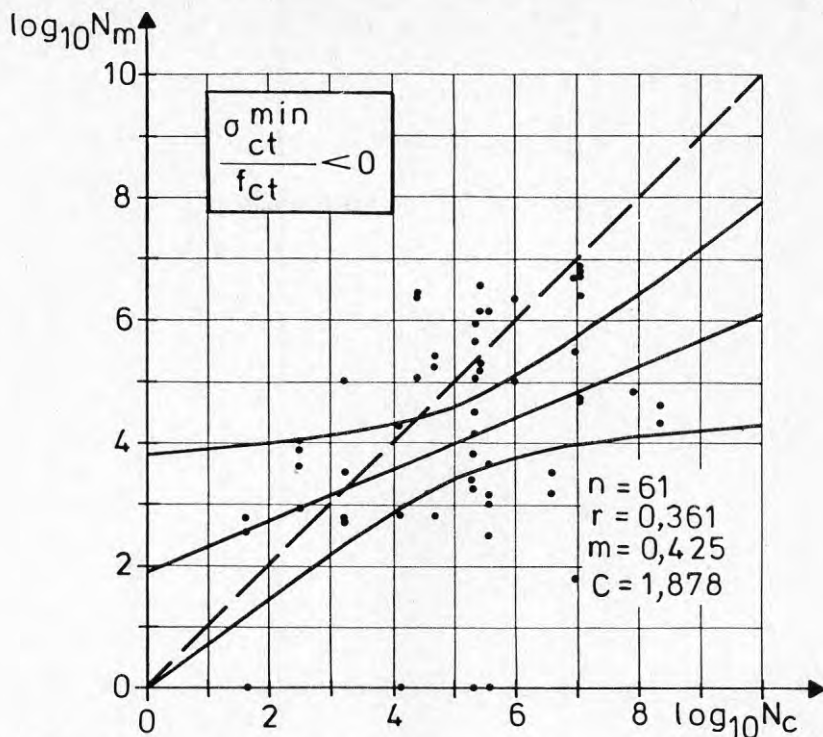


FIG. 5.6.5 Samband mellan beräknat antal lastväxlingar vid dragutmattningsbrott N_c och uppmätt N_m för betong. N_c är beräknad med ekv (4.2) och $R = 0$. Streckad linje svarar mot $N_m = N_c$.

mellan tryck och drag, än när den är antingen tryckt eller dragen. Det ligger därför nära till hands att anta att den för dessa försök mera komplicerade belastningsanordningen är orsak till den ökade försöksvärde dispersionen.

För att ytterligare belysa de erhållna resultaten inlägges de i Wöhler-diagram, där rätlinjig regression med försöksvärdena har utförts och 95%-iga konfidensband inlagts. Ekvation (4.2) med $R = 0$ har angivits med en streckad linje. I Wöhler-diagrammet, FIG. 4.6.7, har försök med $\frac{\sigma_{ct}^{min}}{f_{ct}} = 0$, dvs $R = 0$, inlagts och grupperar sig på ett normalt sätt kring linjen för ekvation (4.2). Regressionslinjen ligger för flakt beroende på att försök utförts med för få $\frac{\sigma_{ct}^{max}}{f_{ct}}$ -värden. Dess sträckning

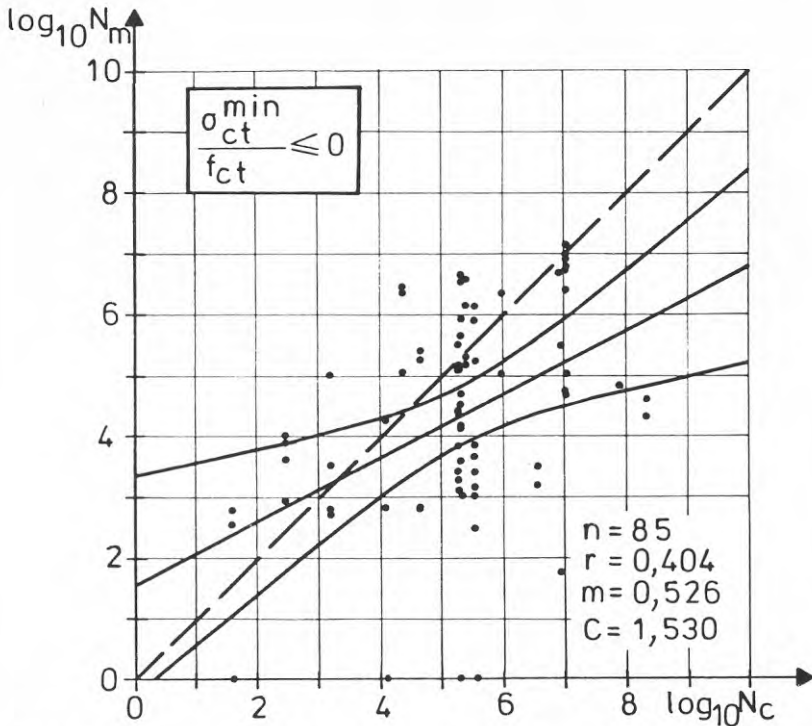


FIG. 5.6.6 Samband mellan beräknat antal lastväxlingar vid dragutmattningsbrott N_c och uppmätt N_m för betong. N_c är beräknad med ekv (4.2) och $R = 0$. Streckad linje svarar mot $N_m = N_c$.

är därför osäker. Den med lasten Q pålagda tryckspänningen synes icke ha någon inverkan på betongens utmattningsbenägenhet.

I FIG. 4.6.8 har försöksvärden med $\sigma_{ct}^{min}/f_{ct} < 0$ införts i Wöhler-diagram. Även här framgår det att över hälften av värdena har normal spridning kring den streckade linjen för ekvation (4.2) med $R = 0$. Resten av värdena har för få uppmätta lastväxlingar vid utmattningsbrott. Samma konstaterande kan göras om samtliga 85 värden studeras i ett Wöhler-diagram i FIG. 4.6.9.

När provkroppstorleken ökar, så sjunker hållfasthetsmedelvärdet normalt något samtidigt som spridningen i försöksvärden avtar. Serie 259 består av $0,20^3 \text{ m}^3$ kuber medan Serie 212 och 260 har $0,15^3 \text{ m}^3$ kuber. Man kan därför vänta

sig att att spridningen i försöksresultat skall vara mindre för de större kuberna. Då utmattningshållfasthetsvärdena relateras till den statistiska hållfastheten på samma provkroppstyp bör icke några ändringar i hållfasthetsnivå framträda för de två kubstorlekarna. Dessutom är det lättare att centrera belastningar på en $0,20^3 \text{ m}^3$ kub än på en $0,15^3 \text{ m}^3$ kub. I FIG. 4.6.10 har Wöhler-kurva upprättas för

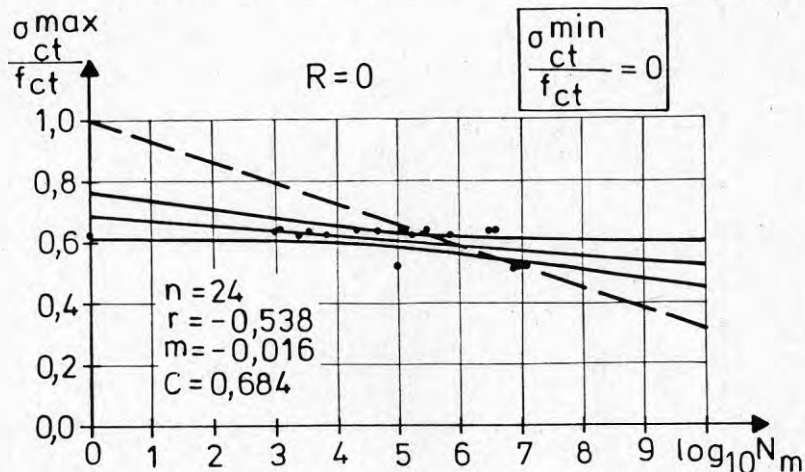


FIG. 5.6.7 Wöhler-diagram för betongens spräckdraghållfasthet med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekv (4.2) med $R = 0$ inlagd som streckad linje.

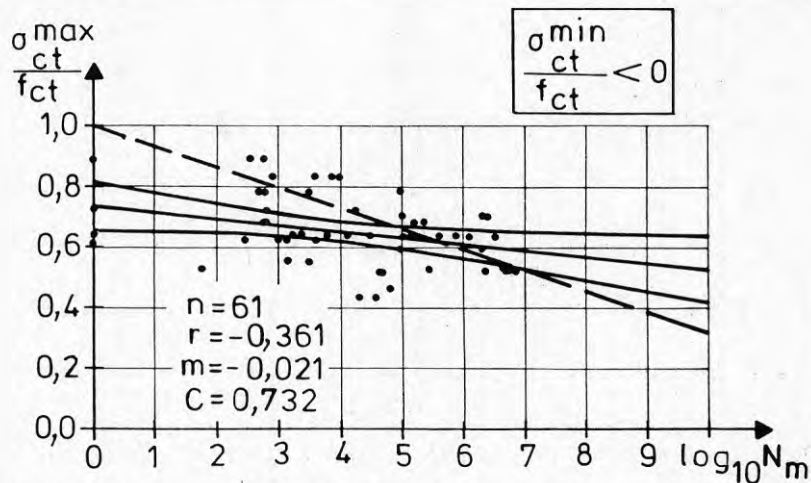


FIG. 5.6.8 Wöhler-diagram för betongens spräckdraghållfasthet med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekv (4.2) med $R = 0$ inlagd som streckad linje.

0,20³ m³ kuberna i Serie 259 enbart. Försöksvärdena har $\sigma_{ct}^{\min}/f_{ct} = -0,36$ och $-0,44$. Rät regressionslinje med 95%-igt konfidensband har inlagts i diagrammet. En streckad linje representerar ekvation (4.2) med $R = 0$. Försöksvär-

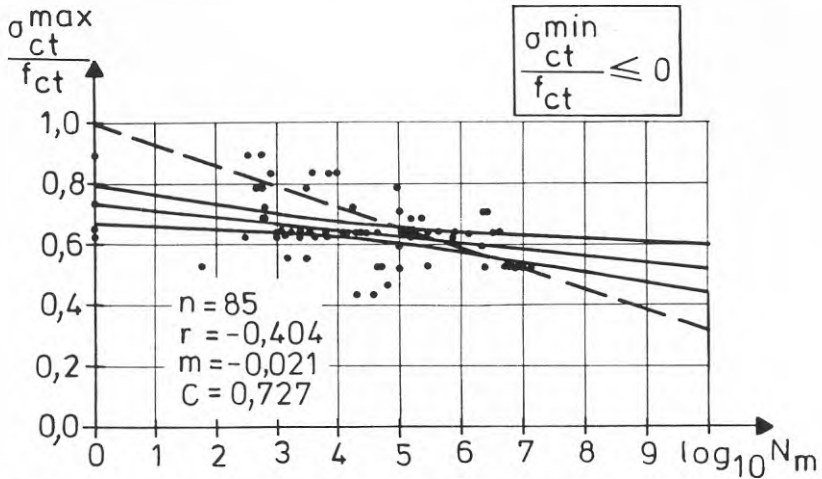


FIG. 5.6.9 Wöhler-diagram för betongens spräckdraghållfasthet med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekv (4.2) med $R = 0$ inlagd som streckad linje.

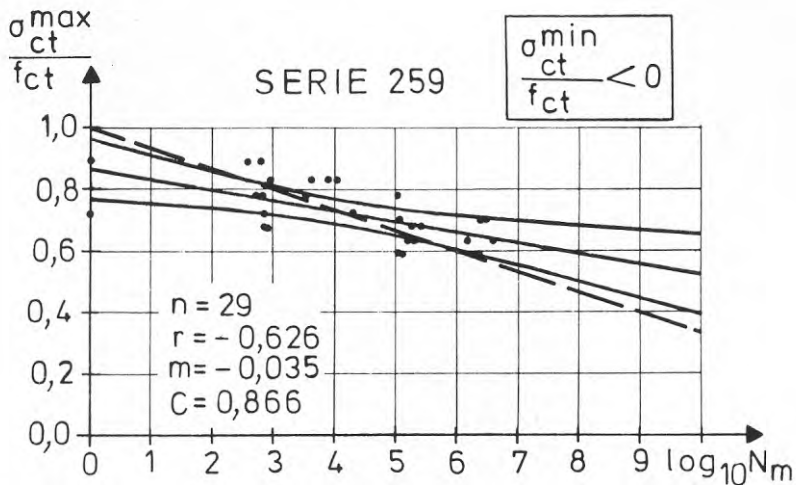


FIG. 5.6.10 Wöhler-diagram för betongens spräckdraghållfasthet i Serie 259 med linjär regression och 95%-igt konfidensband. Ekv (4.2) med $R = 0$ inlagd som streckad linje.

dena grupperar sig kring ekvationslinjen med en spridning, som är ungefär samma, som har erhållits i Kap. 4 med spräckdragförsök. De starkt avvikande försöksvärdena som $0,15^3 \text{ m}^3$ kuberna bidrog med saknas. Det betyder att de i spänningsamplituden ingående tryckpåkänningarna tydligen saknar betydelse för betongens utmattningsbenägenhet.

5.7 Sammanfattning och slutsatser

Brott i betong med uniaxiella drag- eller tryckpåkänningar kan uppfattas vara orsakade av enbart dragpåkänningar. Vid dragbelastning sker brott på grund av överskridande av darghållfasthet i belastningsriktningen och vid tryckbelastning vinkelrätt emot belastningsriktningen, som ytttrar sig som betongprovets uppspaltning av sprickor i lastangreppsriktningen. Då dessa dragspänningar verkar vinkelrätt emot varandra och ej uppträder samtidigt, kan det antas att de icke ger samverkande brotteffekter. Antagandet stödes av Crepps (1923) undersökningar.

Utmattningsundersökningen med mellan drag och tryck växlande spänningar ger att sannolikt bestämmas betongens utmattning av den utmattande maximala påkänning, antingen tryck eller drag, som utgör den största andelen av respektive statistiska hållfasthet. Oberoende av faktiska värdet uppfattas undre spänningsgränsen därvid alltid vara noll. Då kan betongens utmattningsbenägenhet uppskattas med ekv (3.2) för tryckpåkänningar och ekv (4.2) för dragpåkänningar. Ekvationerna kan sammanfattas för mellan drag och tryck växlande påkänningar på följande sätt.

$$\frac{\sigma_c^{\max}}{f_c} = 1 - 0,0685 (1 - R) \log_{10} N \quad \dots (5.1)$$

där

$$\frac{\sigma_c^{\max}}{f_c} \quad \text{insättes med det högsta värdet gällande för drag eller tryck}$$

$$R = 0$$

$$N = \text{antalet lastväxlingar vid utmattningsbrott}$$

Emellertid uppvisar utmattningsförsöken med mellan tryck och drag växlande påkänningar stor spridning, som antagligen beror på ofullkomlighet i belastningsanordningarna. Dock kan iakttagas grupperingar i försöksvärdepopulationen som tyder på hypotesens riktighet. Men så länge absolut visshet icke råder över orsakerna till denna spridning i försöksvärden måste ovan skisserade beräkningsförfarande fortfarande anses vara osäkert.

6. REFERENSER

- 1922 Clemmer, H.F.: Fatigue of Concrete. Proceedings of the American Society for Testing Materials, Vol. 22, II, pp. 408-419.
- 1923 Crepps, R.B.: Fatigue of Mortar. Proceedings of the American Society for Testing Materials, Vol. 23, II, pp. 329-340.
- 1934 Graf, o. & Brenner, E.: Versuche zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit von Beton gegen oftmals wiederholte Druckbelastung. Deutscher Ausschuss für Eisenbeton, Berlin, Wilhelm Ernst und Sohn, 1934. Heft 76, pp 13.
- 1936 Graf, O. & Brenner, E.: Versuche zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit von Beton gegen oftmals wiederholte Druckbelastung. Zweiter teil. Deutscher Asschuss für Eisenbeton, Berlin, Wihelm Ernst und Sohn, 1936, Heft 83, pp, 12.
- 1958 Murdock, J.W., Kesler, C.E., 1958, Effect of Range of Stress on Fatigue Strength of Plain Concrete Beams. ACI-Journal, p. 221-231. Detroit.
- 1959 Antrim, J. de C & Mc Laughlin, J.F.: Fatigue Study of Air-Entrained Concrete. Journal of the American Concrete Institute, May 1959, pp. 1173-1182.
- Assimacopoulos, B.M., Warner, R.E. and Ekberg, C.E.: High Speed Fatigue Tests on Small Specimens of Plain Concrete. Journal of the Prestressed Concrete Institute. Vol. 4, No. 2. September 1959, pp. 53-70.
- 1961 Gray, W., Mc Laughlin, J.F. & Antrim, J.C.: Fatigue Properties of Lightweight Aggregate Concrete. Journal of the ACI, aug 1961, pp. 149-161.
- Nilsson, S.: The Tensile Strength of Concrete Determined by Splitting Tests on Cubes. RILEM Bulletin No. 11, June 1961.

- 1962 Gaede, K.: Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck-Schwellbeanspruchung. (The Strength and Deformation of Concrete Subjected to Compressive Pulsating Load). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin, Wilhelm Ernst und Sohn, 1962. Heft 144, pp. 48.
- Nilsson, S.: Tensile Strength and Compressive Strength of Concrete Determined on the Same Cube. RILEM Bulletin No. 17, Dec. 1962.
- 1965 Murdock, J.W., 1965. A Critical Review of Research on Fatigue of Plain Concrete. University of Illinois College of Engineering, Engineering Experiment Station, Bulletin 475, Volume 62, No. 62, Feb. 1965.
- 1967 Bennett, E.W. and Muir, S.E. StJ.: Some Fatigue Tests of Highstrength Concrete in Axial Compression. Magazine of Concrete Research. Vol. 19, No. 59. June 1967. pp. 113-117.
- 1968 Rüsç, H., Sell, R., Rasch, Ch., Grassner, E., Hummel, A., Wesche, K. och Flatten, H.: Festigkeit und Verformung von unbewehrten Beton unter konstanter Dauerlast. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 198, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1968.
- 1969 Westerberg, B.: Utmattning av betong och armerad betong. En litteraturöversikt. Statens Råd för Byggnadsforskning, Rapport nr 22, p. 68. Stockholm.
- 1970 Aas-Jacobsen, K.: Fatigue of Concrete Beams and Columns. Trondheim, NTH Institutt for Betongkonstruksjoner, September 1970. Bulletin No. 70-1.
- Alexanderson, J. & Buö, F.O.: Proportionering av betong. Cement- och Betonginstitutet, Stockholm.

- 1972 Krenchel, H., Gravesen, S.: Betons tryck-, traek-, spalte- og bøjningstraekstyrke. Foreløbige resultater i ABK-sag 1/62. Afdelingen for Baerende Konstruktioner. Danmarks Tekniske Højskole. København.
- 1973 Sparks, P.R. & Menzies, J.B.: The Effect of Rate of Loading upon the Static and Fatigue Strength of Plain Concrete in Compression. Magazine of Concrete Research. Vol. 25, No. 83. June 1973. pp. 73-80.
- Tepfers, R., Görllin, J. & Samuelsson, T.: Concrete Subjected to Pulsating Load and Pulsating Deformation of Different Pulse Waveforms. Nordisk Betong, Nr 4, 1973.
- 1975 Weigler, H. and Freitag, W.: Dauerswell- und Betriebsfestigkeit von Konstruktions-Leichtbeton. (Fatigue and Working Strength of Structural Lightweight Concrete). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin, Wilhelm Ernst und Sohn, 1975. Heft 247. pp. 45-74.
- Hermansson, I.: Utmattning av betong utsatt för pulserande drag- och tryckpåkänning. Chalmers Tekniska Högskola, Avdelningen för Byggnadsteknik, Publ. 75:3, Arb. Nr 212. Göteborg.
- Kutti, T. & Öqvist, B.: Utmattningshållfasthet för lättballastbetong. Chalmers Tekniska Högskola, Avdelningen för Byggnadsteknik, Publ. 75:4, Arb. Nr 244. Göteborg.
- 1977 Tepfers, R., Fridén, C. and Georgsson, L.: A Study of the Applicability to the Fatigue of Concrete of the Palmgren-Miner Partial Damage Hypothesis. Magazine of Concrete Research. Vol. 29, No. 100. September 1977. pp. 123-130.

1977 Gylltoft, K. & Elfgren, L.: Utmattningshållfasthet för anläggningskonstruktioner. En inventering. Statens Råd för Byggnadsforskning, Rapport R68:1977, Stockholm. pp. 160.

Tepfers, R. & Kutti, T.: Tryckutmattningshållfasthet för betong och lättballastbetong. Chalmers Tekniska Högskola, Avdelningen för Husbyggnadsteknik. Publ. 77:5. Arb. Nr 381. Göteborg.

7. BILAGA

I tabellerna har $\log_{10} N_c$ beräknats med ekv (3.2) med $\beta = 0,685$.

Graf-Brenner 1934. Ordinär betong.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
DII b	20,9	0,75	0,04	4,724	0,05513	3,802	1,242
g	20,9	0,65	0,04	4,825	0,07556	5,322	0,907
DIIIc	18,4	0,97	0,95	2,176	0,27574	8,759	0,248
d	18,4	0,94	0,95	3,114	0,38536	17,518	0,178
DIV c	19,4	0,91	0,75	5,058	0,07117	5,255	0,962
f	19,4	0,89	0,75	4,994	0,08811	6,423	0,778
DV c	14,8	0,95	0,04	2,114	0,02464	0,860	2,778
d	14,8	0,84	0,05	3,591	0,04690	2,459	1,460
e	14,8	0,74	0,05	4,620	0,05924	3,995	1,160
f	14,8	0,64	0,06	6,716	0,05702	5,591	1,202
k	14,8	0,69	0,06	5,460	0,06040	4,814	1,134
DVI b	32,7	0,76	0,02	3,857	0,06349	3,575	1,079
d	32,7	0,66	0,03	4,733	0,07406	5,117	0,925
g	32,7	0,64	0,03	5,192	0,07148	5,418	0,958
DVIIb	32,5	0,86	0,75	3,000	0,18667	8,175	0,367
e	32,5	0,80	0,75	5,273	0,15172	11,679	0,451

Graf-Brenner 1936. Ordinär betong.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_c}{\log_{10} N_m}$
aXIX c	24,2	0,90	0,75	5,686	0,07035	5,839	0,974
bXVII k	12,7	0,93	0,75	2,000	0,14000	4,088	0,489
d	12,7	0,87	0,70	3,230	0,13416	6,326	0,510
cXVIII d	20,4	0,94	0,75	6,173	0,03888	3,504	1,761
i	20,4	0,93	0,75	5,711	0,04903	4,088	1,397
e	20,4	0,65	0,05	5,204	0,07080	5,378	0,967
h	20,4	0,60	0,05	5,487	0,07674	6,147	0,893
g	20,4	0,58	0,05	5,744	0,07697	6,454	0,890

Graf-Brenner 1936 forts. Ordinär betong.

Nr		f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
dI	b	15,6	0,66	0,06	4,021	0,08995	5,280	0,762
	c	15,6	0,58	0,07	5,256	0,08592	6,593	0,797
	e	15,6	0,66	0,06	6,130	0,05901	5,280	1,161
	g	15,6	0,71	0,05	5,854	0,05215	4,456	1,314
dII	b	15,5	0,63	0,06	5,905	0,06666	5,746	1,028
	c	15,5	0,69	0,06	5,593	0,05896	4,814	1,161
	e	15,5	0,60	0,07	5,332	0,08067	6,279	0,849
	f	15,5	0,80	0,05	4,182	0,05034	3,073	1,361
	g	15,5	0,80	0,05	4,190	0,05024	3,073	1,362
dVIIIc	e	16,3	0,60	0,06	5,962	0,07137	6,212	0,960
	d	16,3	0,60	0,06	5,362	0,07936	6,212	0,864
	i	16,3	0,56	0,07	6,021	0,07858	6,907	0,872
	h	16,3	0,63	0,06	5,979	0,06583	5,746	1,041
dIX	b	15,4	0,95	0,75	5,121	0,03905	2,920	1,754
	g	15,4	0,97	0,75	4,428	0,02710	1,752	2,525
eIII	f	30,6	0,59	0,03	5,115	0,08264	6,171	0,829
	b	30,6	0,81	0,02	3,580	0,05416	2,830	1,264
	c	30,6	0,70	0,03	4,918	0,06289	4,515	1,089
	d	30,6	0,65	0,03	5,435	0,06639	5,268	1,032
	h	30,6	0,59	0,03	5,189	0,08146	6,171	0,841
eIV	d	33,4	0,61	0,03	5,942	0,06766	5,870	1,012
	f	33,4	0,64	0,03	5,612	0,06613	5,418	1,036
	g	33,4	0,61	0,03	6,132	0,06557	5,870	1,045
	h	33,4	0,61	0,03	6,170	0,06516	5,870	1,052
	i	33,4	0,64	0,03	5,816	0,06381	5,418	1,073
eXIV	a	27,7	0,96	0,75	3,477	0,04602	2,336	1,488
	e	27,7	0,91	0,75	5,795	0,06212	5,255	1,103
	k	27,7	0,88	0,75	6,030	0,07960	7,007	0,861
fIV	e	32,5	0,91	0,75	5,215	0,06903	5,255	0,992
f2VI	b	26,7	0,91	0,75	3,690	0,09756	5,255	0,702
	c	26,7	0,85	0,75	5,334	0,11249	8,759	0,609
	d	26,7	0,82	0,75	6,119	0,11767	10,511	0,582

Antrim & Mc Laughlin 1959. Ordinär betong.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
FN1-3	27,9	0,69	0,036	4,079	0,07884	4,695	0,869
4	27,9	0,81	0,031	5,450	0,03598	2,862	1,905
5	27,9	0,90	0,020	2,000	0,05092	1,490	1,342
FN2-3	24,7	0,72	0,028	4,491	0,06414	4,205	1,068
4	24,7	0,79	0,025	3,342	0,06445	3,144	1,063
5	24,7	0,90	0,044	2,954	0,03541	1,527	1,934
FN3-2	24,2	0,60	0,021	6,560	0,06319	5,965	1,100
3	24,2	0,69	0,029	4,412	0,07334	4,661	0,947
4	24,2	0,78	0,029	4,297	0,05317	3,308	1,299
5	24,2	0,85	0,021	2,477	0,06211	2,237	1,107
FN4-3	29,2	0,67	0,018	6,371	0,05323	4,906	1,287
4	29,2	0,79	0,028	3,949	0,05511	3,154	1,252
FN5-3	29,0	0,70	0,017	4,999	0,06149	4,455	1,122
4	29,0	0,78	0,017	3,176	0,07083	3,267	0,972
5	29,0	0,90	0,024	3,568	0,02880	1,496	2,387
FN6-2	28,7	0,62	0,017	6,117	0,06385	5,643	1,083
3	28,7	0,72	0,017	5,445	0,05269	4,158	1,309
4	28,7	0,82	0,027	3,000	0,06205	2,701	1,111
5	28,7	0,91	0,017	2,477	0,03704	1,337	1,852
FN7-3	28,0	0,69	0,018	4,736	0,06720	4,609	1,028
4	28,0	0,79	0,037	3,663	0,06016	3,183	1,151
5	28,0	0,89	0,018	4,037	0,02780	1,635	2,469
FN8-2	29,4	0,61	0,017	6,143	0,06532	5,792	1,060
3	29,4	0,70	0,027	4,718	0,06617	4,501	1,048
4	29,4	0,80	0,034	3,230	0,06470	3,022	1,068
5	29,4	0,91	0,017	2,699	0,03399	1,337	2,020

Antrim & Mc Laughlin 1959. Ordinär betong med luftinblandning.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
FA2-3	30,0	0,71	0,025	5,846	0,05088	4,342	1,346
4	30,0	0,79	0,022	3,447	0,06229	3,135	1,100
FA3-2	31,0	0,62	0,026	6,799	0,05738	5,696	1,193
3	31,0	0,72	0,022	5,039	0,05682	4,180	1,206
4	31,0	0,81	0,020	2,778	0,06979	2,830	0,981
5	31,0	0,93	0,017	2,477	0,02875	1,040	2,381
FA4-2	31,1	0,60	0,032	6,904	0,05985	6,032	1,144
3	31,1	0,70	0,020	5,311	0,05764	4,469	1,189
4	31,1	0,80	0,024	3,544	0,05782	2,992	1,185
Fa5-2	29,9	0,60	0,033	6,959	0,05944	6,039	1,152
3	29,9	0,71	0,018	6,226	0,04743	4,311	1,445
4	29,9	0,81	0,021	3,176	0,06111	2,833	1,121
FA6-3	32,1	0,69	0,028	5,356	0,05955	4,656	1,151
4	32,1	0,81	0,020	3,591	0,05399	2,830	1,269
FA7-3	29,2	0,73	0,022	5,558	0,04967	4,030	1,379
4	29,2	0,81	0,020	2,778	0,06612	2,681	1,036
FA8-3	27,5	0,72	0,025	5,334	0,05384	4,192	1,272
4	27,5	0,83	0,013	2,954	0,05831	2,514	1,175
FA9-3	31,7	0,71	0,018	5,278	0,05156	4,311	1,328
4	31,7	0,82	0,020	2,602	0,07059	2,681	0,970

Assimacopoulos, Warner, Ekberg, 1959. Ordinär betong.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
3/11-1	44,2	0,67	0,149	6,016	0,06446	5,661	1,063
5	44,2	0,70	0,143	5,886	0,05947	5,110	1,152
6	44,2	0,76	0,395	6,141	0,06460	5,791	1,060
7	44,2	0,80	0,375	5,919	0,05406	4,672	1,267
9	44,2	0,76	0,395	6,000	0,06612	5,791	1,036
3/12-3	44,2	0,86	0,581	5,778	0,05783	4,878	1,185
5	44,2	0,86	0,581	5,654	0,05910	4,878	1,159
6	44,2	0,67	0,149	6,109	0,06348	5,661	1,079
10	44,2	0,90	0,556	6,342	0,03551	3,288	1,931
11	44,2	0,70	0,143	6,001	0,05833	5,110	1,174
3/17-1	42,4	0,90	0,556	5,574	0,04041	3,288	1,695
2	42,4	0,90	0,889	5,712	0,15772	13,152	0,434
6	42,4	0,92	0,870	5,301	0,11609	8,984	0,590
7	42,4	0,95	0,842	4,903	0,06454	4,620	1,062
9	42,4	0,75	0,133	5,465	0,05276	4,209	1,299
10	42,4	0,85	0,353	5,362	0,04324	3,385	1,585
11	42,4	0,90	0,556	4,699	0,04793	3,288	1,429
3/22-1	42,2	0,95	0,737	5,279	0,03601	2,775	1,901
2	42,2	0,92	0,761	5,330	0,06280	4,887	1,091
9	42,2	0,90	0,889	6,310	0,14277	13,152	0,480
10	42,2	0,73	0,137	5,301	0,05002	4,567	1,160
11	42,2	0,73	0,137	5,068	0,06173	4,567	1,110

Gaede 1962 . Ordinär betong.

Nr	f_{ccc}	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
1	11,6	0,78	0,14	4,732	0,05406	3,735	1,267
3	11,6	0,69	0,14	5,834	0,06179	5,262	1,109
6	13,2	0,65	0,14	6,561	0,06203	5,941	1,104
11	12,0	0,92	0,75	4,973	0,06435	4,672	1,065
14	12,0	0,90	0,75	4,924	0,08123	5,839	0,843
15	12,0	0,86	0,75	5,913	0,09471	8,175	0,723
17	12,0	0,86	0,75	4,869	0,11501	8,175	0,596
18	26,5	0,69	0,14	3,903	0,09236	5,262	0,742
20	26,5	0,63	0,14	6,126	0,07023	6,281	0,976
21	26,5	0,65	0,14	5,146	0,07909	5,941	0,866
23	27,7	0,65	0,14	5,799	0,07018	5,941	0,976
24	27,7	0,66	0,14	5,672	0,06970	5,772	0,982
28	25,1	0,93	0,75	4,342	0,06449	4,088	1,063
37	25,3	0,88	0,75	6,037	0,07951	7,007	0,861
38	25,3	0,90	0,75	4,380	0,09132	5,839	0,750
39	25,3	0,87	0,75	5,573	0,09331	7,591	0,734
40	25,3	0,85	0,75	4,748	0,12637	8,759	0,542
41	34,3	0,72	0,14	5,182	0,06283	4,753	1,091
42	34,3	0,66	0,14	6,200	0,06377	5,772	1,074
45	29,9	0,74	0,14	5,698	0,05306	4,414	1,290
47	29,9	0,72	0,14	6,316	0,05155	4,753	1,328
48	29,9	0,74	0,14	5,656	0,05345	4,414	1,282
50	39,9	0,85	0,75	5,980	0,10033	8,759	0,683
51	39,9	0,84	0,75	4,851	0,13193	9,343	0,519
53	42,3	0,84	0,75	5,083	0,12591	9,343	0,544
54	42,3	0,83	0,75	4,362	0,15589	9,927	0,439

Bennett & Muir 1967. Ordinär betong.

Nr	f_{ccc}	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
1	40,1	0,93	0,236	1,07	0,08563	1,338	0,800
2	40,1	0,86	0,255	1,58	0,11894	2,743	0,576
3	40,1	0,90	0,243	2,05	0,06444	1,928	1,063
4	40,1	0,78	0,281	2,40	0,12749	4,467	0,537
5	40,1	0,74	0,282	3,65	0,09921	5,286	0,691
6	40,1	0,75	0,279	4,30	0,08064	5,062	0,850
7	40,1	0,74	0,282	4,76	0,07607	5,286	0,900
8	40,1	0,75	0,279	5,10	0,06799	5,062	1,007
9	42,0	0,87	0,241	0,78	0,21959	2,500	0,312
10	42,0	0,80	0,261	1,70	0,15920	3,951	0,430
11	42,0	0,83	0,252	2,07	0,10979	3,318	0,624
12	42,0	0,79	0,265	3,61	0,07915	4,171	0,866
13	42,0	0,79	0,265	3,89	0,07345	4,171	0,933
14	52,6	0,88	0,190	0,30	0,49383	2,163	0,139
15	52,6	0,82	0,204	0,93	0,24315	3,301	0,282
16	52,6	0,85	0,196	2,00	0,09328	2,724	0,734
17	52,6	0,80	0,209	3,15	0,08027	3,691	0,853
18	52,6	0,79	0,211	3,73	0,07136	3,886	0,960
19	52,6	0,70	0,239	4,23	0,09320	5,755	0,735
20	52,6	0,72	0,232	4,68	0,07790	5,322	0,880
21	64,7	0,89	0,153	0,60	0,21645	1,896	0,316
22	64,7	0,86	0,158	1,88	0,08844	2,427	0,775
23	64,7	0,79	0,172	2,60	0,09755	3,703	0,702
24	64,7	0,84	0,162	2,90	0,06584	2,787	1,041
25	64,7	0,75	0,181	3,15	0,09690	4,456	0,707
26	64,7	0,78	0,174	3,40	0,07834	3,888	0,874
27	64,7	0,72	0,189	4,11	0,08400	5,040	0,816
28	64,7	0,72	0,189	4,92	0,07017	5,040	0,977
29	64,7	0,68	0,200	4,95	0,08081	5,839	0,847

Tepfers, Görlin, Samuelsson 1973. Ordinär betong.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
1-4	19,5	0,80	0,163	5,002	0,4777	3,488	1,435

Tepfers, Fridén, Georgsson 1977. Ordinär betong.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N}{\log_{10} N}$
268:1	20,9	0,848	0,20	3,7	0,05135	2,774	1,333
2	20,9	0,848	0,20	3,5	0,05429	2,774	1,263
3	20,9	0,848	0,20	3,5	0,05429	2,774	1,263
4	20,9	0,797	0,20	4,0	0,06344	3,704	1,080
5	20,9	0,797	0,20	3,8	0,06678	3,704	1,026
6	20,9	0,797	0,20	4,3	0,05901	3,704	1,161
7	20,9	0,746	0,20	4,3	0,07384	4,635	0,928
8	20,9	0,746	0,20	4,6	0,06902	4,635	0,992
10	20,9	0,696	0,20	6,2	0,06129	5,547	1,117

Tepfers, Kutti 1977. Ordinär betong.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
244-1:1	45,4	0,95	0,20	0,602	0,10381	0,912	0,660
2	45,4	0,95	0,20	2,017	0,03099	0,912	2,212
3	45,4	0,90	0,20	0,477	0,26199	1,825	0,261
4	45,4	0,90	0,20	1,732	0,07215	1,825	0,949
5	45,4	0,85	0,20	3,041	0,06165	2,737	1,111
6	45,4	0,85	0,20	3,301	0,05680	2,737	1,206
7	45,4	0,80	0,20	3,468	0,07208	3,650	0,951
8	45,4	0,80	0,20	3,836	0,06517	3,650	1,050
9	45,4	0,75	0,20	4,617	0,06768	4,562	1,012
10	45,4	0,75	0,20	4,510	0,06929	4,562	0,988
11	45,4	0,70	0,20	5,833	0,06429	5,474	1,065
12	45,4	0,70	0,20	3,938	0,09523	5,474	0,719

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$ $\beta=0,0685$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
LL1-2	24,6	0,50	0,064	6,498	0,08221	7,798	0,833
3	24,6	0,60	0,047	5,838	0,07190	6,127	0,952
4	24,6	0,70	0,051	4,633	0,06823	4,615	1,004
5	24,6	0,80	0,040	4,281	0,04866	3,041	1,408
LL2-2	26,9	0,50	0,060	6,693	0,07947	7,765	0,862
3	26,9	0,60	0,032	5,598	0,07382	6,032	0,928
4	26,9	0,70	0,043	4,723	0,06693	4,576	1,032
5	26,9	0,80	0,038	3,544	0,05866	3,035	1,168
LL3-3	28,5	0,60	0,052	6,207	0,06798	6,160	1,008
4	28,5	0,70	0,039	4,711	0,06627	4,557	1,034
5	28,5	0,80	0,021	3,204	0,06376	2,982	1,074
LL4-2	27,3	0,50	0,080	6,754	0,08047	7,934	0,851
3	27,3	0,60	0,055	6,085	0,06956	6,179	0,985
4	27,3	0,70	0,041	5,022	0,06229	4,567	1,100
5	27,3	0,80	0,041	3,935	0,05300	3,045	1,292
LL5-2	24,8	0,50	0,080	6,665	0,08154	7,934	0,840
3	24,8	0,60	0,067	6,355	0,06746	6,259	1,015
4	24,8	0,70	0,051	4,420	0,07152	4,615	0,958
5	24,8	0,80	0,054	3,279	0,06448	3,086	1,063
HL2-3	44,4	0,60	0,042	6,586	0,07128	6,095	1,080
5	44,4	0,80	0,034	3,266	0,05470	3,022	1,081
HL3-3	44,7	0,60	0,037	6,552	0,05946	6,064	1,081
4	44,7	0,70	0,032	4,880	0,05984	4,524	1,079
5	44,7	0,80	0,028	3,245	0,05386	3,004	1,082
HL4-2	44,7	0,50	0,044	8,249	0,07833	7,635	1,080
3	44,7	0,50	0,054	8,336	0,06798	7,716	1,080
4	44,7	0,60	0,037	6,552	0,07080	6,064	1,081
5	44,7	0,70	0,032	4,888	0,05937	4,524	1,080
6	44,7	0,80	0,028	3,245	0,05513	3,004	1,080
HL5-3	44,0	0,60	0,042	6,586	0,06114	6,095	1,080
4	44,0	0,70	0,036	4,909	0,05378	4,543	1,081
5	44,0	0,80	0,032	3,259	0,04099	3,016	1,080
HL6-3	42,3	0,60	0,043	6,593	0,06319	6,102	1,081
4	42,3	0,70	0,037	4,914	0,05301	4,548	1,081
5	42,3	0,80	0,033	3,262	0,04190	3,019	1,080

Weigler & Freitag 1975. Lättballastbetong.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
1-37A1	45,2	0,882	0,222	2,568	0,05906	2,214	1,160
38B1	"	"	"	3,702	0,04097	"	1,672
39C1	"	"	"	3,653	0,04152	"	1,650
40A1	"	"	"	2,079	0,07295	"	0,939
41B2	"	"	"	3,303	0,04592	"	1,493
42C1	"	"	"	3,158	0,04803	"	1,427
43A1	"	"	"	3,176	0,04776	"	1,435
44B1	"	"	"	3,076	0,04931	"	1,389
45C1	"	"	"	2,146	0,07068	"	0,969
46A1	"	"	"	3,127	0,04850	"	1,412
2-37B2	45,2	0,834	0,235	2,672	0,08121	3,168	0,843
38C2	"	"	"	3,545	0,06121	"	1,119
39A2	"	"	"	2,322	0,09345	"	0,733
40B2	"	"	"	4,028	0,05387	"	1,272
41C2	"	"	"	3,878	0,05595	"	1,224
42A3	"	"	"	2,580	0,08411	"	0,814
43B2	"	"	"	3,441	0,06306	"	1,086
44C2	"	"	"	3,772	0,05753	"	1,190
45A2	"	"	"	3,537	0,06135	"	1,116
46B2	"	"	"	3,669	0,05914	"	1,159
3-37C2	45,2	0,785	0,250	4,604	0,06226	4,185	1,100
38A1	"	"	"	4,125	0,06949	"	0,985
39B1	"	"	"	3,423	0,08375	"	0,818
40C1	"	"	"	5,116	0,05603	"	1,222
41A2	"	"	"	3,742	0,07661	"	0,894
42B2	"	"	"	4,312	0,06648	"	1,030
43C2	"	"	"	3,874	0,07400	"	0,926
44A4	"	"	"	3,068	0,09344	"	0,733
45B3	"	"	"	2,924	0,09804	"	0,699
46C1	"	"	"	3,714	0,07719	"	0,887
4-37A2	45,2	0,736	0,266	6,105	0,05891	5,251	1,163
38B4	"	"	"	5,324	0,06756	"	1,014
39C2	"	"	"	4,245	0,08473	"	0,808
40A4	"	"	"	4,104	0,08764	"	0,782
41B3	"	"	"	6,144	0,05854	"	1,170
42C2	"	"	"	4,305	0,08355	"	0,820
43A2	"	"	"	4,796	0,07499	"	0,913
44B2	"	"	"	5,484	0,06559	"	1,044
45C2	"	"	"	5,318	0,06763	"	1,013
46A2	"	"	"	4,546	0,07912	"	0,866
76A3	"	"	"	3,723	0,09661	"	0,709
77B4	"	"	"	4,330	0,08307	"	0,824
78C4	"	"	"	5,597	0,06426	"	1,066
79A4	"	"	"	4,854	0,07410	"	0,924
80B4	"	"	"	5,610	0,06411	"	1,068

Weigler & Freitag (forts) . Lättballastbetong.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
4-81C4	45,2	0,736	0,266	6,603	0,05447	5,251	1,258
82A3	"	"	"	5,055	0,07115	"	0,962
83B4	"	"	"	6,349	0,05665	"	1,209
85A4	"	"	"	5,563	0,06465	"	1,059
88C4	"	"	"	4,201	0,08562	"	0,800
5-37B1	45,2	0,683	0,287	6,833	0,06507	6,491	1,053
38C4	"	"	"	6,476	0,06865	"	0,998
39A1	"	"	"	5,889	0,07550	"	0,907
41C1	"	"	"	6,180	0,07194	"	0,952
42A2	"	"	"	6,993	0,06358	"	1,078
44C1	"	"	"	7,071	0,06288	"	1,089
45A1	"	"	"	5,525	0,08047	"	0,851
46B1	"	"	"	5,378	0,08267	"	0,829
7C4	"	"	"	5,608	0,07928	"	0,864
8A3	"	"	"	6,509	0,06831	"	1,003
9B1	"	"	"	7,441	0,05975	"	1,147
10C1	"	"	"	6,828	0,06511	"	1,052
6-37A4	45,2	0,882	0,222	0,699	0,21698	2,214	0,316
38B2	"	"	"	2,615	0,05800	"	1,181
39C4	"	"	"	1,532	0,09900	"	0,692
40A3	"	"	"	1,362	0,11136	"	0,615
41B1	"	"	"	2,461	0,06163	"	1,111
42B4	"	"	"	0,778	0,19495	"	0,351
43C4	"	"	"	1,491	0,10172	"	0,673
44A3	"	"	"	1,613	0,09403	"	0,728
45B1	"	"	"	0,477	0,31797	"	0,215
46C2	"	"	"	1,792	0,08464	"	0,810
43A4	"	"	"	0,954	0,15898	"	0,431
7-37C4	45,2	0,882	0,222	2,476	0,06126	2,214	1,119
38A4	"	"	"	2,223	0,06823	"	1,004
39B3	"	"	"	2,093	0,07247	"	0,945
40C4	"	"	"	1,531	0,09907	"	0,692
41A4	"	"	"	2,827	0,05365	"	1,277
44B3	"	"	"	2,977	0,05095	"	1,344
45C3	"	"	"	1,398	0,10849	"	0,631
46A3	"	"	"	1,431	0,10599	"	0,646
46A2	"	"	"	3,667	0,04136	"	1,656
8-37C3	45,2	0,834	0,235	1,826	0,11884	3,168	0,576
38A2	"	"	"	3,115	0,06966	"	0,983
39B2	"	"	"	2,167	0,10014	"	0,684
40C3	"	"	"	1,914	0,11337	"	0,604
41A3	"	"	"	2,453	0,08846	"	0,775
42B3	"	"	"	2,894	0,07498	"	0,913
43C3	"	"	"	1,301	0,16679	"	0,411

Weigler & Freitag (forts). Lättballastbetong.

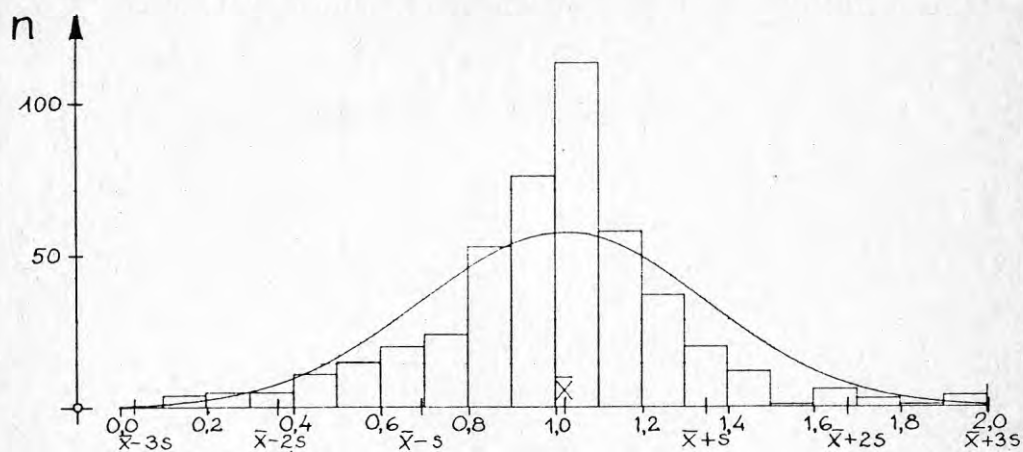
Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
8-44A2	45,2	0,834	0,235	2,114	0,10265	3,168	0,667
45B4	"	"	"	1,820	0,11923	"	0,574
46C4	"	"	"	2,724	0,07966	"	0,860
75B4	"	"	"	3,395	0,06392	"	1,072
76C2	"	"	"	2,904	0,07472	"	0,917
77A1	"	"	"	2,960	0,07331	"	0,935
78B4	"	"	"	3,418	0,06349	"	1,079
79C4	"	"	"	4,088	0,05308	"	1,290
80A2	"	"	"	1,909	0,11367	"	0,602
81B4	"	"	"	4,058	0,05347	"	1,280
82C4	"	"	"	3,217	0,06745	"	1,015
83A4	"	"	"	3,976	0,05458	"	1,255
84B1	"	"	"	5,279	0,04111	"	1,667
9-37B3	45,2	0,785	0,250	4,478	0,06402	4,185	1,070
38C3	"	"	"	4,839	0,05924	"	1,156
39A3	"	"	"	3,334	0,08598	"	0,797
40B3	"	"	"	5,410	0,05299	"	1,292
41C3	"	"	"	5,192	0,05521	"	1,241
42A4	"	"	"	2,407	0,11910	"	0,575
43B3	"	"	"	4,190	0,06842	"	1,001
44C3	"	"	"	3,494	0,08205	"	0,835
45A3	"	"	"	3,081	0,09304	"	0,736
46B3	"	"	"	5,017	0,05714	"	1,199
10- 7B1	45,2	0,683	0,287	6,357	0,06994	6,491	0,979
8C3	"	"	"	6,745	0,06592	"	1,040
9A2	"	"	"	6,638	0,06698	"	1,022
10B3	"	"	"	7,092	0,06269	"	1,093
11C3	"	"	"	6,000	0,07410	"	0,924
12A2	"	"	"	5,862	0,07584	"	0,903
13B3	"	"	"	5,849	0,07601	"	0,901
14C3	"	"	"	7,042	0,06314	"	1,085
15A4	"	"	"	7,465	0,05956	"	1,149
16B3	"	"	"	6,130	0,07253	"	0,944
11-17C3	45,2	0,683	0,307	7,722	0,06765	7,626	1,012
18A3	"	"	"	7,746	0,06744	"	1,015
19C2	"	"	"	6,191	0,08438	"	0,812
20A3	"	"	"	7,723	0,06764	"	1,013
21B3	"	"	"	8,228	0,06349	"	1,079
22C2	"	"	"	6,841	0,07639	"	0,897
23A2	"	"	"	7,576	0,06895	"	0,993
24B3	"	"	"	6,292	0,08302	"	0,825
25C2	"	"	"	7,002	0,07460	"	0,918
27B3	"	"	"	8,542	0,06115	"	1,120

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{\bar{f}_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
12-16B4	45,2	0,593	0,084	7,308	0,06080	6,486	1,126
19C3	"	"	"	5,727	0,07758	"	0,883
20A2	"	"	"	6,285	0,07070	"	0,969
21B4	"	"	"	7,047	0,06305	"	1,087
22C4	"	"	"	6,640	0,06692	"	1,024
23A3	"	"	"	7,034	0,06317	"	1,085
24B2	"	"	"	6,965	0,06379	"	1,074
25C3	"	"	"	6,366	0,06980	"	0,981
26A2	"	"	"	6,399	0,06944	"	0,986
13-17B1	45,2	0,683	0,073	4,104	0,08332	4,992	0,822
18C4	"	"	"	4,665	0,07330	"	0,935
19A2	"	"	"	4,599	0,07436	"	0,922
20B2	"	"	"	5,913	0,05783	"	1,185
21C4	"	"	"	4,710	0,07260	"	0,943
22A3	"	"	"	5,425	0,06303	"	1,087
23B1	"	"	"	5,813	0,05883	"	1,164
24C2	"	"	"	5,325	0,06422	"	1,067
25A3	"	"	"	4,981	0,06865	"	0,998
14-27A2	45,2	0,785	0,064	3,335	0,06888	3,353	0,995
28B4	"	"	"	4,455	0,05156	"	1,328
29C4	"	"	"	4,248	0,05407	"	1,267
30A2	"	"	"	3,484	0,06593	"	1,040
31B3	"	"	"	4,250	0,05405	"	1,267
32C2	"	"	"	4,138	0,05551	"	1,235
33A3	"	"	"	2,863	0,08023	"	0,854
34B4	"	"	"	3,386	0,06784	"	1,010
35C2	"	"	"	2,996	0,07667	"	0,894
36A4	"	"	"	4,178	0,05498	"	1,015
15-27C3	45,2	0,785	0,064	2,288	0,10039	3,353	0,683
28A4	"	"	"	2,387	0,09623	"	0,712
29B2	"	"	"	3,853	0,05962	"	1,149
30C4	"	"	"	3,822	0,06010	"	1,140
31A2	"	"	"	4,084	0,05624	"	1,218
32B4	"	"	"	4,018	0,05717	"	1,199
33C4	"	"	"	4,117	0,05579	"	1,229
34A4	"	"	"	4,914	0,04674	"	1,466
35B4	"	"	"	3,213	0,07149	"	0,958
36C3	"	"	"	3,401	0,06754	"	1,014

Weigler & Freitag (forts). Lättballastbetong.

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
16-13C2	45,2	0,537	0,093	7,383	0,06914	7,452	0,991
14A3	"	"	"	6,552	0,07791	"	0,880
15B1	"	"	"	7,958	0,06415	"	1,068
16C3	"	"	"	7,939	0,06430	"	1,065
17A1	"	"	"	6,990	0,07303	"	0,938
18C3	"	"	"	7,150	0,07139	"	0,960
19A1	"	"	"	7,673	0,06653	"	1,030
20B2	"	"	"	8,008	0,06375	"	1,074
21C3	"	"	"	7,939	0,06430	"	1,065
22A4	"	"	"	7,791	0,06552	"	1,046
17-75A3	45,2	0,785	0,508	7,760	0,05631	6,379	1,217
76B1	"	"	"	6,776	0,06449	"	1,063
77C3	"	"	"	5,447	0,08022	"	0,854
78A1	"	"	"	5,836	0,07487	"	0,915
79B3	"	"	"	6,897	0,06336	"	1,081
80C3	"	"	"	5,653	0,07730	"	0,887
87A2	"	"	"	8,355	0,05230	"	1,311
88B2	"	"	"	6,370	0,06860	"	0,999
89C2	"	"	"	6,761	0,06463	"	1,060
90A2	"	"	"	8,871	0,04926	"	1,391
18-75C2	45,2	0,834	0,478	4,599	0,06915	4,642	0,991
76A1	"	"	"	3,176	0,10013	"	0,684
77B1	"	"	"	2,447	0,12996	"	0,527
78C1	"	"	"	5,035	0,06316	"	1,085
79A2	"	"	"	4,273	0,07442	"	0,921
80B1	"	"	"	4,655	0,06832	"	1,003
81C2	"	"	"	4,611	0,06897	"	0,993
82A1	"	"	"	4,359	0,07295	"	0,939
83C2	"	"	"	6,034	0,05270	"	1,300
84A2	"	"	"	5,365	0,05927	"	1,156
19-81A3	45,2	0,834	0,478	3,246	0,09797	4,642	0,699
82B3	"	"	"	4,331	0,07343	"	0,933
83C3	"	"	"	5,018	0,06337	"	1,081
84A3	"	"	"	6,106	0,05208	"	1,316
85B4	"	"	"	5,992	0,05307	"	1,290
86C4	"	"	"	5,511	0,05770	"	1,188
87A3	"	"	"	5,226	0,06085	"	1,126
88B3	"	"	"	6,169	0,05155	"	1,330
89C3	"	"	"	3,688	0,08623	"	0,794
90A3	"	"	"	6,348	0,05010	"	1,368
20-14A4	45,2	0,882	0,452	3,101	0,06944	3,143	0,986
15B4	"	"	"	2,952	0,07294	"	0,939
85C4	"	"	"	1,556	0,13839	"	0,495
86A4	"	"	"	1,778	0,12111	"	0,566
87C4	"	"	"	3,879	0,05551	"	1,235
88A3	"	"	"	0,477	0,45142	"	0,153
89B1	"	"	"	4,627	0,04654	"	1,473
90C3	"	"	"	0,699	0,30805	"	0,222

Nr	f_{ccc} MPa	$\frac{\sigma_{cc}^{max}}{f_{ccc}}$	R	$\log_{10} N_m$	β	$\log_{10} N_c$	$\frac{\log_{10} N_m}{\log_{10} N_c}$
244-2:2	12,3	0,95	0,20	0,778	0,08033	0,912	0,853
3	12,3	0,90	0,20	3,218	0,03884	1,825	1,764
4	12,3	0,90	0,20	1,973	0,06336	1,825	1,081
5	12,3	0,85	0,20	2,467	0,07600	2,737	0,901
6	12,3	0,85	0,20	2,276	0,08238	2,737	0,831
7	12,3	0,80	0,20	3,718	0,06724	3,650	1,018
8	12,3	0,80	0,20	4,598	0,05437	3,650	1,192
9	12,3	0,75	0,20	4,351	0,07182	4,562	0,953
10	12,3	0,75	0,20	4,227	0,07393	4,562	0,927
12	12,3	0,70	0,20	4,780	0,07845	5,474	0,873
244-3:1	11,9	0,95	0,20	0,602	0,10382	0,912	0,660
2	11,9	0,95	0,20	0,477	0,13103	0,912	0,523
3	11,9	0,90	0,20	2,496	0,05008	1,825	1,368
4	11,9	0,90	0,20	3,084	0,04053	1,825	1,689
6	11,9	0,85	0,20	1,301	0,14412	2,733	0,475
7	11,9	0,80	0,20	1,613	0,15499	3,650	0,442
8	11,9	0,80	0,20	3,343	0,07478	3,650	0,916
9	11,9	0,75	0,20	4,858	0,06433	4,562	1,065
10	11,9	0,75	0,20	4,590	0,06808	4,562	1,006
11	11,9	0,70	0,20	5,644	0,06644	5,474	1,031
12	11,9	0,70	0,20	5,364	0,06991	5,474	0,979

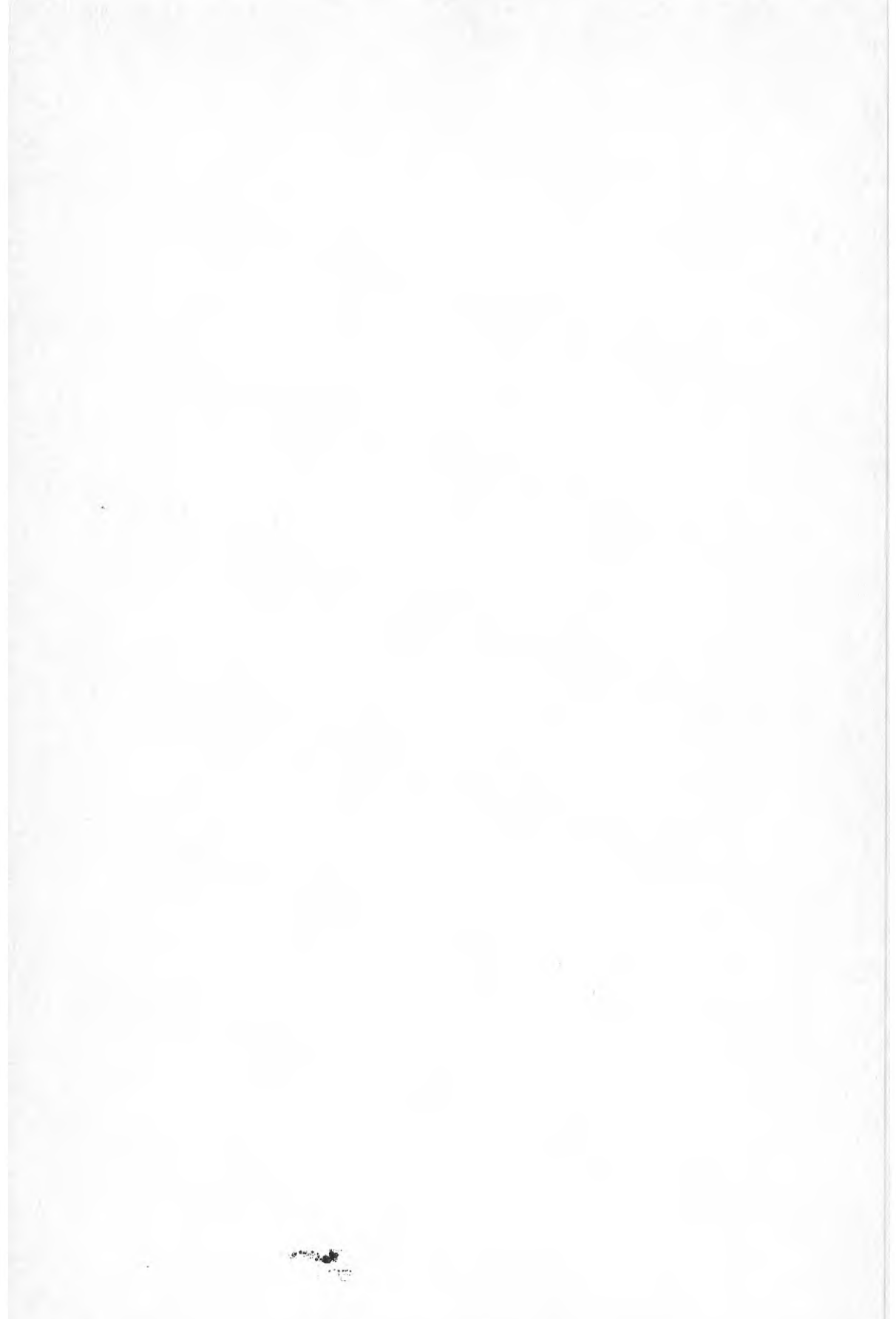


Histogram över $\log_{10}N_m/\log_{10}N_c$ för samtliga i bilagan redovisade $n = 475$ prov.

Medelvärde $\bar{x} = \log_{10}N_m/\log_{10}N_c = 1,021$

Standardavvikelse $s = 0,329$

- - + - -



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 771296-2 från
Statens råd för byggnadsforskning till
Avdelningen för husbyggnadsteknik, Chalmers tekniska
högskola, Göteborg**

R86:1978

ISBN 91-540-2922-8

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6600786

**Abonnemangsgrupp:
Z. Konstruktioner och material**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 1403
111 84 Stockholm**

Cirka pris: 35 kr exkl moms