

BÆRENDE KONSTRUKTIONER

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE



STRUCTURAL RESEARCH LABORATORY
TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK

Rune Brincker

MUREDE VÆGGES TVÆRBÆREEVNE

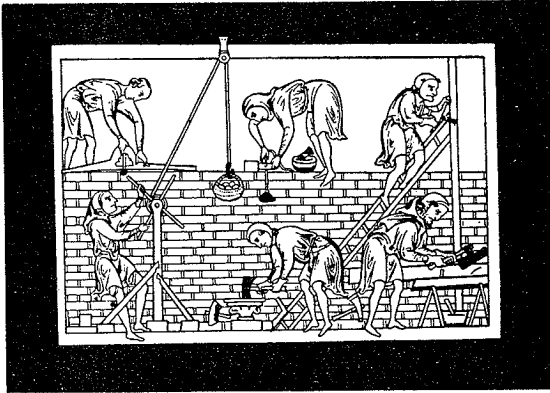
En undersøgelse af murværks fysiske egenskaber

RAPPORT NR. R 111 1979

Rune Brincker

MUREDE VÆGGES TVÆRBÆREEVNE

En undersøgelse af murværks
fysiske egenskaber.



INDHOLD

Kapitel 1. INDLEDNING.

- 1.1. Historisk baggrund.1.1
- 1.2. Problemets behandling i litteraturen. ...1.2
- 1.3. Projektets formål.1.5-1.7

Kapitel 2. ANVENDTE MATERIALER.

- 2.1. Mørtler - delmaterialer.2.1
- 2.2. Mørtler - styrkeforhold.2.2
- 2.3. Teglsten - styrkeforhold.2.11-2.14

KAPITEL 3. TRYKFORSØG.

- 3.1. Forsøgets princip.3.1
- 3.2. Prøvelegemernes fremstilling og lagring.3.2
- 3.3. Opstilling og måleudstyr.3.8
- 3.4. Databearbejdning.3.13
- 3.5. Måleresultater.3.20-3.32

KAPITEL 4. VRIDEBØJEFORSØG.

- 4.1. Forsøgets princip.4.1
- 4.2. Prøvelegemernes fremstilling og lagring.4.8
- 4.3. Opstilling og måleudstyr.4.13
- 4.4. Databearbejdning.4.26
- 4.5. Forsøgsresultater.4.37-4.66

KAPITEL 5. KONKLUSION - ANVENDELSE.

- 5.1. Hovedresultater.5.1
- 5.2. Forsøgsresultaternes anvendelse.5.6
- 5.3. Supplerende forsøg.5.8
- 5.4. Resume.5.9
- 5.5. Summary.5.10-5.11

APPENDIX A. ARBEJDSKURVER FOR TRYKFORSØG.

A.1.	Generelt om målte kurver.	A.1
A.2.	Belastningstilfælde 1.	A.2
A.3.	Belastningstilfælde 2.	A.5
A.4.	Belastningstilfælde 3.	A.8
A.5.	Belastningstilfælde 4.	A.11-A.13

APPENDIX B. EKSTENSOMETRE.

B.1.	Målebehov.	B.1
B.2.	Funktionsprincip for 2-komposantekstensometer.	B.3
B.3.	Funktionsprincip for enkeltkomposantflytningsmåler.	B.4
B.4.	Udformning af enkeltkomposantflytningsmåler. ..	B.7
B.5.	Udformning af det færdige ekstensometer.	B.12
B.6.	Kalibrering af ekstensometre.	B.15
B.7.	Beregning af tøjningsstørrelser ud fra flytningsmålinger.	B.33-B.36

APPENDIX C. DYNAMOMETRE.

C.1.	Målebehov.	C.1
C.2.	Udførelse af dynamometre til måling af reaktionerne R_{11} , .. R_{22}	C.2
C.3.	Udførelse af dynamometre til måling af K_1	C.9
C.4.	Kalibrering af dynamometre.	C.13-C.17

APPENDIX D. ARBEJDSKURVER FOR VRIDEBØJEFORSØG.

D.1.	Generelt om målte kurver.	D.1
D.2.	Tilfælde 2X11.	D.2
D.3.	Tilfælde 2X22.	D.7
D.4.	Tilfælde 1321.X.	D.12-D.14

REFERENCER.

FORORD.

Nærværende rapport omtaler ca. 300 forsøg med murværksprøvelegemer udført ved Afdelingen for Bærende Konstruktioner, DTH, med det formål at klarlægge visse fysiske forhold for murværk med hensyn til anvendelse af brudteori på tværbelastede murede vægge. Projektet, hvis planlægning og styring var varetaget af en styringsgruppe bestående af professor Vagn Askegaard, afdelingsingeniør Svend Gravesen, professor Bent Erik Pedersen, samt undertegnede, blev gennemført i perioden fra januar 1978 til marts 1979 med økonomisk støtte fra Statens Teknisk-Videnskabelige Fond.

Jeg vil i denne forbindelse gerne rette en tak til de øvrige medlemmer af styringsgruppen for godt samarbejde, og til afdelingens øvrige medarbejdere som i vid udstrækning har bidraget til projektets gennemførelse med råd og assistance. Endvidere skal der rettes en tak til Frederiksholms Teglværker A/S og Superfoss A/S for vederlagsfrit at have leveret henholdsvis teglsten og mørtel, samt til Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH, som velvilligt har stillet forskelligt prøvningsudstyr til rådighed.

Marts 1979

Rune Brincker.

Kapitel 1. INDLEDNING.

1.1. Historisk baggrund.

Denne rapport omhandler nogle materialefysiske forsøg med prøvelegemer udført af teglsten og mørtel. Undersøgelserne skal ses på baggrund af den udvikling der er sket indenfor anvendelse af teglprodukter i bærende konstruktioner i løbet af de senere årtier, samt på baggrund af en udvikling inden for beregning af bærende konstruktioner som har øget nødvendigheden af mere nøjagtige og rationelle beregningsmetoder.

Murværk har været anvendt som byggemateriale lige siden oldtiden, og metoderne til fremstilling af teglsten og mørtel har ikke ændret sig meget siden da. Herhjemme har teglmurværk været særdeles meget anvendt, og langt de fleste velbevarede og betydningsfulde historiske bygninger er opført i dette materiale. Ikke blot store og betydningsfulde bygninger, men også almindelige boliger, både enfamiliehuse og etageejendomme, er helt op til vor tid udført med teglmurværk som bærende konstruktioner i facader og indvendige vægge og søjler.

Gennem denne massive anvendelse af teglproduktet oparbejdede man et kolosalt erfaringsmateriale på grundlag af hvilket der udvikledes en stærk håndværker - og konstruktionstradition. Egentlige beregninger var således ikke nødvendige før i tiden, idet man bevægede sig inden for datidens relativt snævre byggetekniske rammer, hvor de tekniske problemer løstes ved hævde af god håndværkertradition og tilgodeseelse af en række erfaringsbestemte konstruktionsregler. Man havde regler om hvor tykke de bærende vægge i etageejendomme skulle være for at de lodrette belastninger kunne optages, hvor langt der måtte være mellem tværstabiliserende vægge således, at murel-

terne ikke blev for store, o.s.v.

I takt med indførelsen af den ny byggeteknik, elementbyggeri, bedre isolering og arbejdskraftbesparende byggetoder, forsvandt en stor del af grundlaget for anvendelsen af de erfaringsbestemte regler, og det blev nødvendigt at sikre bæreevnen af bærende konstruktioner af murværk gennem en egentlig beregning og dimensionering. Hvor sent udviklingen af teorier for belastede murværkskonstruktioner kom i gang, ses blandt andet af, at vi fik den første egentlige danske norm for murværk [16] så sent som i 1969. Denne norm omtaler kun beregning af bæreevnen for aksialt belastede vægge, og berører slet ikke problemerne vedrørende beregning af tværbelastede vægge. Det har utvivlsomt hos mange projekterende, mange gange voldt store problemer at skulle påvise tilstrækkelig styrke overfor f.eks. vindlast eller jordskælvs kræfter af vægge, som faldt uden for de kategorier som kunne klares ved hjælp af de gamle tommelfingerregler.

Lignende problemer har man haft i andre europæiske lande, og specielt i England og Skandinavien er der i slutningen af tredserne og i løbet af halvfjerdserne gjort en del anstrengelser for at udvikle teorier for beregning af tværbelastede murede vægge. Også vægges virkning som skiver har været genstand for en del undersøgelser, men det skal der kun kommes ind på her i den udstrækning det belyser problemerne med tværbelastede vægge.

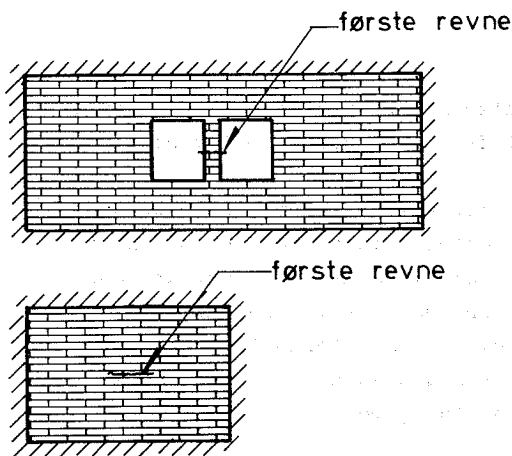
1.2. Problemets behandling i litteraturen.

Lad os som indledning til en omtale af de ovenfor nævnte undersøgelser se på, hvad der trin for trin sker med en muret væg når den udsættes for en tværlast som langsomt øges fra nul til maximal belastning, d.v.s. bæreevnen, er opnået. Forløbet kan deles op i tre stadier:

- 1) Det elastiske stadium, som er kendetegnet ved at væggene med god tilnærmelse kan betragtes som en elastisk plade. Væggen er helt fri for nogen form for brud.
- 2) Mellemstadiet, som er karakteriseret ved at væggen begynder at få blivende deformationer, og der begynder at opstå lokale brud, som tilsammen begynder at danne et for murværket, væggens geometri, understøtningsbetingelserne og belastningen karakteristisk revnemønster. Revnemønsteret er dog stadig ikke fuldt udviklet, og tværlasten kan stadig øges.
- 3) Slutstadiet eller brudstadiet, som er karakteriseret ved, at revnemønsteret nu er fuldt udviklet, og at deformationerne øges uden at belastningen kan øges.

For stadium 1) kan man foretage dækkende beregninger af murede vægge ved hjælp af teorien for elastiske ortotrope plade-skiver når der tages hensyn til membransnitkræfternes indvirkning.

I stadium 1), som vil være den almindelige tilstand under normale brugsforhold, er det oplagt, at man kan have glæde af afvendelse af elasticitetsteori til beregning af deformationer og elastisk samvirken med tilstødende konstruktioner. Man kan desuden benytte elasticitetsteorien til at beregne hvor og ved hvilken belastning den første revne vil opstå. Den herved bestemt revnelast foreslås at nogle [14] og [17] anvendt som et udtryk for bæreevnen, og anvendt som dimensioneringsgrundlag. Der er imidlertid i de fleste af de øvrige referencer enighed om, at dette er en dårlig ide, bl.a. fordi forholdet mellem de målte tværbæreevner og de beregnede revnelaste langt fra er noget konstant forhold, men er kraftigt af-



væg med lille
revnelast i for-
hold til bæreev-
nen.

væg med stor
revnelast i for-
hold til bæreev-
nen.

Figur 1.2.1. Vægkonstruktionens indflydelse på forholdet mellem revnelast og maximallast.

hængigt af væggenes konstruktion. Betragtes de på figur 1.2.1 viste to vægge, så vil væggen med de to vinduer have en meget lille revnelast i forhold til bæreevnen, idet den slanke vinduespille vil revne ved en meget lav belastning (idet der også regnes med vindlast på vinduerne), hvorimod den anden væg uden vinduesåbningen, og med et lille længdehøjdeforhold vil have en revnelast, som ligger betydelig tættere på bæreevnen. Desuden er beregningerne komplicerede og kræver anvendelse af edb-baserede metoder, f.eks. finite elementmetoder, og der kræves kendskab til et ret stort antal vanskeligt bestemte fysiske konstanter.

En generel beskrivelse af forholdene i stadium 2) er yderst vanskelig, og forfatteren til denne rapport har ikke kendskab til nogen som har forsøgt sig med dette. Der er imidlertid et par arbejder, som kommer lidt ind på problematikken, og som derfor skal nævnes. I [1] om-

tales en finite-elementmetode til beregning af skivevirkning af murede vægge. Metoden kan anvendes til beregning af hele brududviklingen, og har tilsyneladende givet gode resultater. I [18] omtales en analytisk metode til beregning af brudforløbet i murede vægge der virker som søjler.

Beregninger i stadium 3) brudstadiet, er karakteriseret ved, at de bestemmer den maximalt opnåelige tværlast, d.v.s. bæreevnen. Beregninger under en eller anden form i brudstadiet er foreslået i referencerne [2], [4], [5], [8], [9], [10], [11], [13] og [15]. De fleste af disse gør sig til talsmænd for anvendelse af brudlinieteori i en eller anden form, idet man mere eller mindre indforstået betragter en muret væg som en ortotrop plastisk plade. Ideen til anvendelse af brudlinieteori får man umiddelbart når man betragter det fuldt udviklede revnemønster i en tværbelastet muret væg, idet revnemønsteret helt svarer til brudliniebilledet i en jernbetonplade belastet til brud. Det vanskelige i denne forbindelse er imidlertid hvordan man skal definere flydemomenterne for de to hovedretninger. Et andet problem er spørgsmålet om hvorvidt det generelt er forsvarligt at anvende plasticitetsteori på et materiale der synes at være relativt skørt. Selv om man i de fleste tilfælde har opnået gode resultater ved at indsætte flydemomenterne, bestemt som brudmomenterne for de to hovedretninger ved ren bøjning, i det ud fra brudlinieteorien fundne bæreevneudtryk, så kan man berettiget frygte, at man blot har været heldig med de relativt få undersøgte konstruktionstyper, og at det kan gå galt i andre tilfælde.

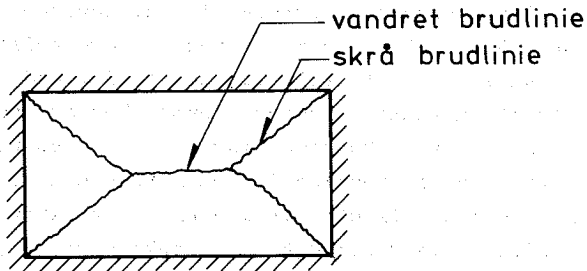
1.3. Projektets formål.

Formålet med dette projekt har da været at søge svaret

på to væsentlige spørgsmål som naturligt rejser sig i forbindelse med anvendelse af plasticitetsteori på murværk:

- 1) Er murværk i besiddelse af fysiske egenskaber som kan begrunde anvendelsen af plasticitetsteori på tværbelastede murede vægge.
- 2) - og i bekræftende fald hvordan skal flydemomenterne bestemmes, og hvilke faktorer er af afgørende betydning for flydemomenternes størrelse.

Det er klart, at det er en overordentlig stor opgave, at give et generelt og endegyldigt svar på disse spørgsmål, og man har da også i dette projekt begrænset sig til at se på to af de væsentligste problemer i denne forbindelse, nemlig problemerne vedrørende snitkræfternes afhængighed af deformationer og materialeforhold i henholdsvis en vandret og en skrå brudlinie i en tværbelastet muret væg, se figur 1.3.1.



Figur 1.3.1. I projektet er undersøgt forholdene i en vandret og en skrå brudlinie i en tværbelastet muret væg.

Undersøgelserne af forholdene i den vandrette brudlinie er omtalt i kapitel 3, og undersøgelserne af forholdene i den skrå brudlinie er omtalt i kapitel 4.

Som en vejledning til læseren skal det nævnes, at der både i kapitel 3 og 4 er to afsnit omhandlende dels "Opstilling af måleudstyr" og "databearbejdning" som er relativt detaljerende, og som kan overspringes af de læsere som ikke er specielt interesserede i de rent forsøgstekniske og bearbejdningstekniske sider af sagen.

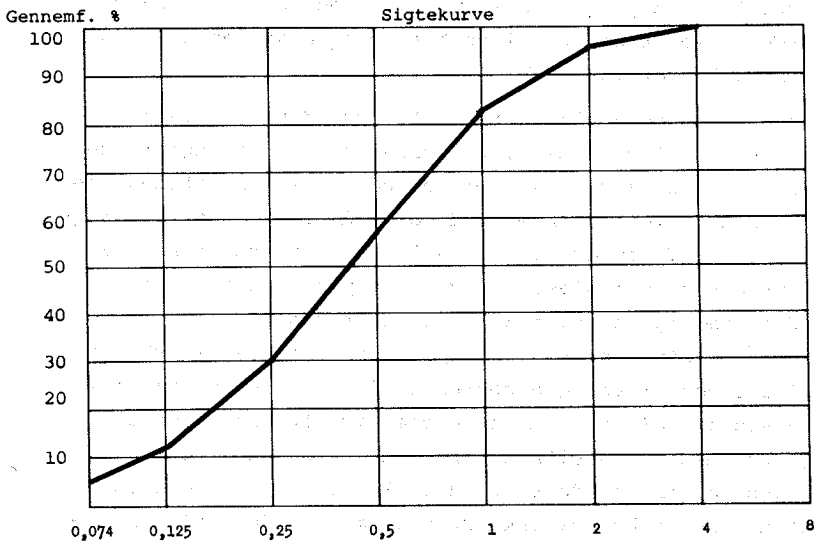
De materialer, som er anvendt til fremstilling af prøvelegemer til forsøgene, omtalt i kapitel 4 og 5 er testet på forskellig måde, og disse undersøgelser er omtalt i det følgende kapitel.

Kapitel 2. ANVENDETE MATERIALER.

2.1. Mørtler - delmaterialer.

Der er i dette projekt kun arbejdet med to af de svageste af de i murværksnormen [16] omtalte mørteltyper, nemlig en ren kalkmørtel K 100/1200 og en kalkcementmørtel KC 50/50/750.

Som bindemidler er anvendt hydratkalk og dansk portlandcement, som ved blanding er udtaget efter vægt. Det anvendte sand er dansk bakkesand med en maximal stenstørrelse på 4 mm, og med betegnelsen "murergus". Sigtekurven for det anvendte sand er vist på figur 2.1.1. Ved blanding blev sandmængden bestemt ved vejning af sandet i tørret tilstand.



Figur 2.1.1. Sigtekurve for det anvendte mørtelsand.

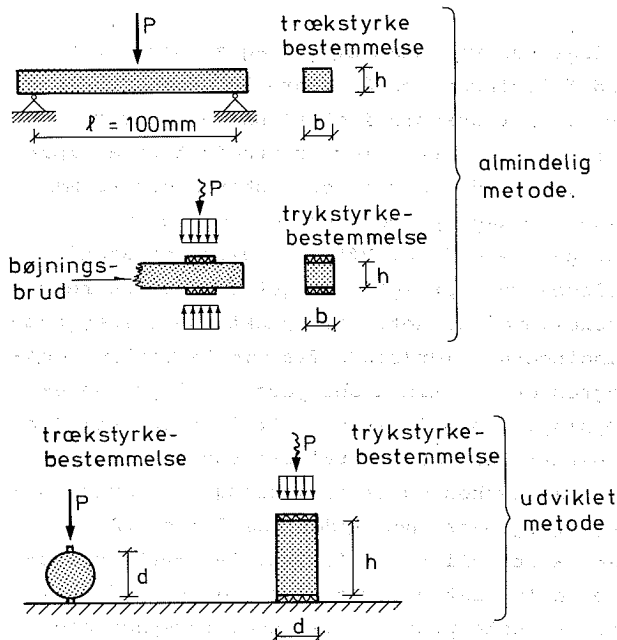
2.2. Mørtler - styrkeforhold.

Til fastlæggelse af styrkeforholdene for de to mørteltyper er der udført forsøg til bestemmelse af trykstyrke og trakstyrke.

Til bestemmelserne blev benyttet to metoder, dels en metode der, selv om den ikke er en egentlig normmetode *) til prøvning af mørtel, så dog er særdeles meget anvendt, bl.a. af Kalk- og Teglværkslaboratoriet, og dels en alternativ metode som er udviklet i dette projekt. Når der er udviklet en speciel metode i dette projekt skyldes det for det første, at den almindeligt anvendte metode, er ret omstændelig at have med at gøre, og derfor for tidskrævende at anvende ved de mange referenceforsøg til bestemmelse af mørtelstyrkerne, som blev foretaget i forbindelse med de i kapitel 4 omtalte vridebøjeforsøg, og dernæst, at trykstyrkebestemmelsen ved den almindelige metode ikke er egnet til en bestemmelse af den enaksede trykstyrke for mørtelen.

Mørtelprøvningen blev foretaget efter den almindelige metode på følgende måde, prøvelegemerne er stangformede med målene $20 \times 20 \times 120 \text{ mm}^3$ og udstøbes vandretliggende i messingforme 3 stænger side om side efter bestemte regler, og de forsynes med flere lag af normeret trækpapir på under- og overside. Stængerne trykkes ud af formen med en særlig udskyder 3 timer efter udstøbningen og lægges derefter en vis tid under passende lagringsbetingelser. Ved prøvningen bestemmes først bøjningstrækstyrken ved at belaste stængerne som simpelt understøttede bjælker med en enkeltkraft på midten, og derefter trykprøves det ene af de to brudstykker ved at blive belastet mellem to kvadratiske $20 \times 20 \text{ mm}^2$ hårde træfiberplader, se figur 2.2.1.

*) metoden er givet af Nordisk Pudskomite, og en variant af metoden er angivet i dansk norm for murcement, DS 424.

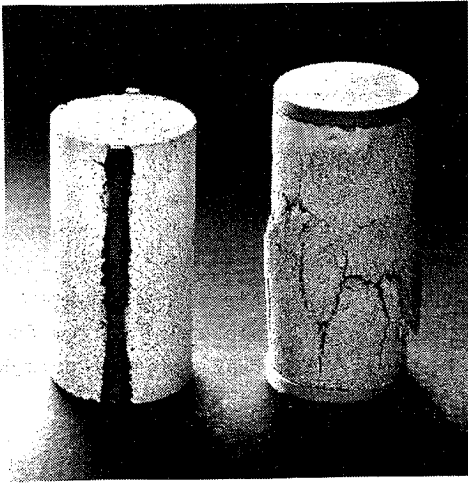


Figur 2.2.1. Prøvningsmetoder for de to typer mørtelprøvelegemer.

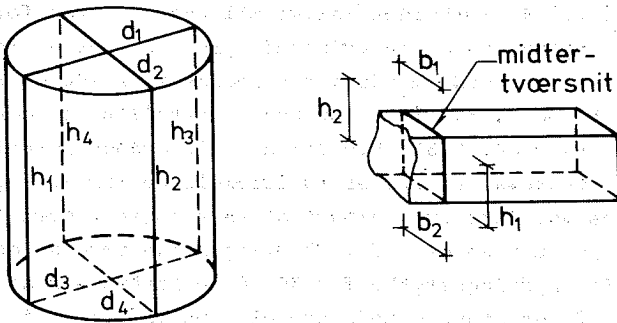
Den i projektet udviklede prøvningsmetode er blot en til-
 lempning af metoden til prøvning af beton, således at
 den kan anvendes til mørtel. Der benyttes cylinderforme-
 de prøvelegemer med et højdediameter forhold på ca. 2.0,
 og de absolutte mål ligger på ca. $d = 40 - 45\text{ mm}$
 $h = 82 - 87\text{ mm}$. Variationerne skyldes, at der er anvendt
 forskellige formtyper som ikke helt har haft de samme
 mål, hvilket skønnes at være uden betydning for resulta-
 terne. Mørtelprøvningen efter denne metode er foretaget
 på følgende måde, de cylindriske forme, der er åbne i
 begge ender, anbringes lodret med den ene ende holdt
 mod et plant underlag, formen fyldes med mørtel helt til

øverste rand, idet der ved stampning drages omsorg for at der ikke ved fyldningen opstår store luftlommer. Formen vibreres på vibrationsbord i et så passende langt tidsrum, at alle større luftbobler er arbejdet ud af mørtelen. På mørteloverfladen der nu er sunket nogle få mm, anbringes et låg som kan gå ned i formen, og som belastes med en vægt på nogle få N. Efter et døgn's henstand afformes prøvelegemerne forsigtigt, idet de for den rene kalkmørtels vedkommende på dette tidspunkt kun holdes sammen af porespændingerne hidrørende fra vandindholdet. Prøvelegemerne lagres en vis tid under passende lagringsbetingelser. Prøvningen, som foretages når lagringsperioden er overstået, består dels af et spalteforsøg til bestemmelse af spaltetrækstyrken og et trykforsøg med jævnt fordelt tryk på prøvelegemets endeflader, se figur 2.2.1. Da det ikke har været muligt, at fremstille mørtelprøvelegemerne med en helt glat og jævn overflade blev de til spalteforsøgene anvendte prøvelegemer hver forsynet med 2 stk. langs 2 diamentralt beliggende frembringere anbragte retlinede hårde træfiberlister med højden ca. 3,5 mm og bredden ca. 5,0 mm, som påklæbedes med epoxy - mørtel. Ved trykforsøgene anvendtes cirkulære mellemlæg af ca. 5 mm tyk blød træfiberplade med en diameter som det aktuelle prøvelegeme. Figur 2.2.2 viser et prøvelegeme anvendt til spalteforsøg og et prøvelegeme anvendt til trykforsøg efter prøvning.

Af mørtelen K 100/1200 fremstilledes fra samme mørtelblanding 6 stk. stangformede prøvelegemer og 6 stk. cylinderformede prøvelegemer som lagredes i 34 døgn ved 70% relativ fugtighed og temperaturen 70°C. Af mørtelen KC 50/50/750 fremstilledes fra samme blanding 6 stk. stangformede prøvelegemer og 10 stk. cylinderformede prøvelegemer som lagredes 28 døgn over vandbad i en lukket kasse med målene 30 x 30 x 60 cm³. Kassen åbnedes jævnlige for at



Figur 2.2.2. Cylindriske prøvelegemer til henholdsvis spalteprøvning og trykprøvning efter prøvning.



Figur 2.2.3. Opmåling af prøvelegemer.

opretholde en passende stor CO_2 -koncentration i luften omkring prøvelegemerne.

Efter lagring opmålttes prøvelegemerne som vist på figur 2.2.3. Resultaterne heraf fremgår af tabel 2.2.1 og tabel 2.2.2. Prøvningerne blev foretaget i afdelingens 100 kN Instron prøvemaskine, idet der blev anvendt fast underplan og kugleskålslejret overplan. Bøjningstrækstyrken σ_{t1} , trykstyrken bestemt på stangformede prøvelegemer σ_{c1} , spaltetrækstyrken σ_{t2} og trykstyrken bestemt på cylinderformede prøvelegemer σ_{c2} bestemmes da med de på figur 2.2.1 anvendte betegnelser af følgende udtryk

$$\sigma_{t1} = \frac{1}{4} \frac{Pl}{W}, \quad w = \frac{1}{6} bh^2$$

$$\sigma_{c1} = \frac{P}{A}, \quad A = b \cdot l, \quad l = 2 \text{ cm}$$

$$\sigma_{t2} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{P}{A}, \quad A = h \cdot d$$

$$\sigma_{c2} = \frac{P}{A}, \quad A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Resultaterne af styrkeprøvningerne fremgår af tabel 2.2.3 og tabel 2.2.4. Forholdet mellem målinger på stangformede prøvelegemer og cylinderformede prøvelegemer er for trækstyrkernes vedkommende for henholdsvis K 100 og KC 50/50 0.81 og 0.78, altså for begge mørteltypers vedkommende omkring ca. 0.80. Hvorfor de tilsvarende forhold for trykstyrkemålingerne er så forskellige som 1.1 og 2.4 synes der ikke umiddelbart at være nogen simpel forklaring på, men en del af forklaringen kan være at den større forskydningsstyrke for KC 50/50 forårsager at større dele af det stangformede prøvelegeme medvirker i kraftoptagelsen. Det ses ivøvrigt, at den almindelige metode tilsyneladende giver mindre spredninger på måleresultaterne end den alternative metode hvor prøvning foretages på cylinderformede prøvelegemer.

Tabel 2.2.1.

Geometriske data for prøvelegemer
 anvendt til bestemmelse af trækstyrker.
 Se figur 2.2.2

Prøve- legeme indenfor serie nr.	Cylinderformede prøvelegemer.				Stangformede prøvelegemer.	
	K 100		KC 50/50		K 100	KC 50/50
	D ₁ /D ₂ D ₂ /D ₄ middel (mm)	h ₁ /h ₂ h ₃ /h ₄ middel (mm)	D ₁ /D ₂ D ₃ /D ₄ middel (mm)	h ₁ /h ₂ h ₃ /h ₄ middel (mm)	h ₁ /h ₂ b ₁ /b ₂ h/b-middel (mm)	h ₁ /h ₂ b ₁ /b ₂ h/b-middel (mm)
1	40.2/39.7	82.9/82.9	44.1/44.0	84.8/84.8	19.9/19.8	19.6/19.7
	40.3/40.1	83.1/83.0	44.4/44.3	85.7/85.4	19.4/19.4	20.2/20.4
	40.1	83.0	44.2	85.2	19.9/19.4	19.7/20.3
2	40.3/39.9	82.4/82.1	43.9/43.7	85.5/85.2	19.8/19.8	19.7/20.0
	40.4/40.3	82.0/82.0	44.2/44.2	85.5/85.8	19.5/19.5	20.5/20.4
	40.2	82.1	44.0	85.5	19.8/19.5	19.9/20.5
3	40.4/40.4	82.8/82.7	43.8/43.9	85.3/84.8	19.8/19.7	19.7/19.7
	40.2/39.9	83.0/82.9	44.4/44.4	84.8/85.0	19.6/19.5	20.6/20.4
	40.1	82.9	44.1	85.0	19.8/19.6	19.7/20.5
4	/	/	44.0/44.0	85.6/86.3	19.6/19.6	19.6/19.7
	/	/	43.9/43.9	85.8/85.3	19.5/19.5	20.3/20.4
	/	/	44.0	85.8	19.6/19.5	19.7/20.4
5	/	/	43.8/43.9	86.5/86.6	19.6/19.8	19.5/19.6
	/	/	44.1/44.3	86.1/86.3	19.6/19.7	20.6/20.6
	/	/	44.0	86.4	19.7/19.7	19.6/20.6
6	/	/	/	/	19.8/19.7	19.6/19.7
	/	/	/	/	19.6/19.7	20.6/20.6
	/	/	/	/	19.8/19.7	19.7/20.6

Tabel 2.2.2.

Geometriske data for prøvelegemer
 anvendt til bestemmelse af trykstyrker.
 Se figur 2.2.2.

Prøve- legeme indenfor serie nr.	Cylinderformede prøvelegemer.				Stangformede prøvelegemer.	
	K 100		KC 50/50		K 100	KC 50/50
	D_1/D_2 D_3/D_4 middel (mm)	h_1/h_2 h_3/h_4 middel (mm)	D_1/D_2 D_3/D_4 middel (mm)	h_1/h_2 h_3/h_4 middel (mm)	h_1/h_2 b_1/b_2 h/b-middel (mm)	h_1/h_2 b_1/b_2 h/b-middel (mm)
1	40.3/39.8	82.7/82.8	44.4/44.5	85.0/85.3	19.9/19.8	19.6/19.7
	40.1/40.1	82.9/82.8	43.9/43.6	85.2/85.0	19.4/19.4	20.2/20.4
	40.1	82.8	44.1	85.1	19.9/19.4	19.7/20.3
2	40.2/40.2	82.2/82.0	44.0/44.3	86.7/86.8	19.8/19.8	19.7/20.0
	40.4/40.2	81.7/81.8	44.1/44.1	86.7/86.7	19.5/19.5	20.5/20.4
	40.3	81.9	44.1	86.7	19.8/19.5	19.9/20.5
3	40.2/39.8	81.8/81.9	44.5/44.6	84.7/85.2	19.8/19.7	19.7/19.7
	40.3/40.2	82.2/82.0	43.8/43.8	85.4/84.9	19.6/19.5	20.6/20.4
	40.1	82.0	44.2	85.1	19.8/19.6	19.7/20.5
4	/	/	44.3/44.0	85.1/84.9	19.6/19.6	19.6/19.7
	/	/	44.4/43.9	85.0/85.4	19.5/19.5	20.3/20.4
	/	/	44.2	85.1	19.6/19.5	19.7/20.4
5	/	/	44.3/44.4	83.4/83.3	19.6/19.8	19.5/19.6
	/	/	44.0/44.3	84.1/84.2	19.6/19.7	20.6/20.6
	/	/	44.3	83.8	19.7/19.7	19.6/20.6
6	/	/	/	/	19.8/19.7	19.6/19.7
	/	/	/	/	19.6/19.7	20.6/20.6
	/	/	/	/	19.8/19.7	19.7/20.6

Tabel 2.2.3.

Resultater af prøvninger
til fastlæggelse af trækstyrken

Mørtel- type	Prøve- legeme	Bøjningsforsøg stangformede prøvel.			Spalteforsøg cylinderformede prøvel.		
		Brud- kraft. P (N)	Modstands- moment. W (cm ³)	Trækbrud- spænding σ_t (MN/m ²)	Brud- kraft. P (kN)	Areal A=h·d (cm ²)	Trækbrud- spænding σ_t (MN/m ²)
K 100	1	53.0	1.28	0.104	0.677	33.3	0.129
	2	49.0	1.27	0.096	0.632	33.0	0.122
	3	49.0	1.28	0.096	0.555	33.2	0.106
	4	46.3	1.25	0.093			
	5	45.6	1.27	0.090			
	6	51.3	1.29	0.099			
	middelværdi		(MN/m ²)		0.096		0.119
	relativ spænding (%)				5.0		9.8
KC50/50	1	67.3	1.31	0.128	0.960	37.7	0.162
	2	67.1	1.35	0.124	0.936	37.6	0.158
	3	70.4	1.33	0.132	0.900	37.5	0.153
	4	71.9	1.32	0.136	1.186	37.8	0.200
	5	75.9	1.32	0.144	1.098	38.0	0.184
	6	70.1	1.33	0.132			
	middelværdi		(MN/m ²)		0.133		0.171
	relativ spænding (%)				5.0		11.5

Tabel 2.2.4.

Resultater af prøvninger
til bestemmelse af trykstyrken.

Mørtel- type	Prøve- legeme	Trykforsøg stangformede prøvel.			Trykforsøg cylinderformede prøvel.		
		Brud- kraft P kN)	Areal A (cm ²)	Trykbrud- spænding σ_c (MN/m ²)	Brud- kraft P (kN)	Areal A (cm ²)	Trykbrud- spænding σ_c (MN/m ²)
K 100	1	0.977	3.88	2.52	1.353	12.6	1.07
	2	0.975	3.90	2.50	1.051	12.8	0.82
	3	0.790	3.92	2.02	1.092	12.6	0.87
	4	0.818	3.90	2.10			
	5	0.751	3.94	1.91			
	6	0.753	3.94	1.91			
	Middelværdi		(MN/m ²)	2.16			0.92
	relativ spredning (%)			13.0			14.6
KC50/50	1	1.265	4.06	3,12	3.665	15.4	2.40
	2	1.096	4.10	2.67	4.325	15.3	2.83
	3	1.079	4.10	2.68	3.450	15.3	3.25
	4	1.249	4.08	3.06	3.830	15.3	2.50
	5	1.347	4.12	3.23	4.550	15.4	2.95
	6	1.208	4.12	2.93			
	Middelværdi		(MN/m ²)	2.95			2.59
	relativ spredning (%)			7.9			11.4

2.3. Teglsten - styrkeforhold.

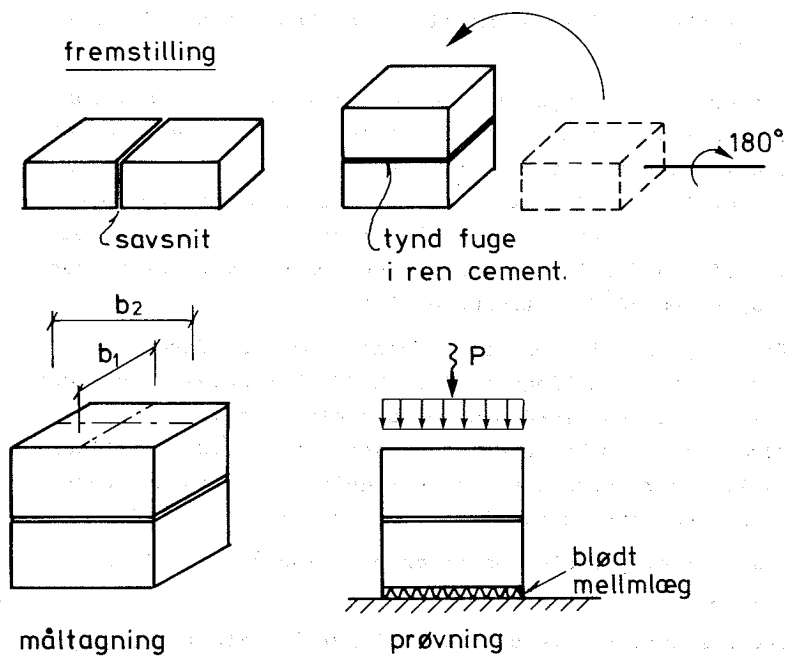
Der er ved forsøgene i denne rapport kun anvendt to stentyper. Alle anvendte sten er af samme brænding og samme levering. Der blev anvendt dels en hulsten med i alt 55 huller fordelt i 5 langsgående rækker med 11 huller i hver række, og dels en massiv sten, begge typer flammede.

10 sten af hver type blev udtaget til trykprøvning, som blev foretaget efter murværksnormen [16] bortset fra, at trykfladerne ikke blev afrettet, men at der i stedet blev anvendt $108 \times 108 \times 12 \text{ mm}^3$ mellemlag af bløde træfiberplader, og at prøvelegemerne blev lagret 6 døgn i fugtmættet luft på den i normen beskrevne måde, og derefter kun et døgn ved 50°C i strømmende luft.

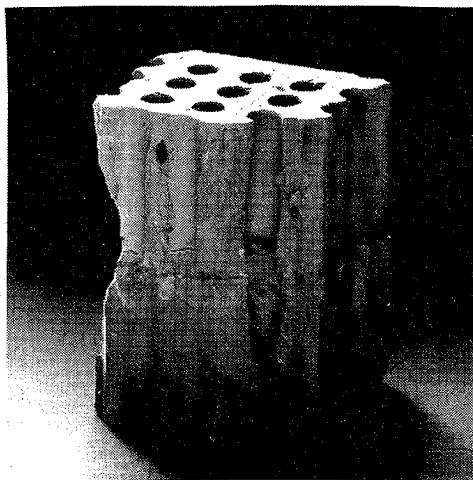
Efter lagring blev prøvelegemerne opmålt og derefter trykprøvet i afdelingens 2000 kN MFL betonpresse med fast underplan og kugleskålslejret overplan. Fremstilling af prøvelegemer, måltagning og prøvning er antydnet på figur 2.3.1., og resultaterne af måltagning og prøvning fremgår af henholdsvis tabel 2.3.1 og tabel 2.3.2.

En del af et prøvelegeme efter prøvning er vist i figur 2.3.2.

Murværks fysiske egenskaber er i øvrigt omtalt i [19].



Figur 2.3.1. Prøvelegemer til prøvning af stenstyrken, fremstilling, måltagning og prøvning.



Figur 2.3.2. Del af prøvelegeme efter trykprøvning.

Tabel 2.3.1.

Opmåling af prøvelegemer til bestemmelse af stenstyrken. Se i øvrigt figur 2.3.1.

Prøvelegeme nr.	Massive sten		Hulsten	
	b_1 (mm)	b_2 (mm)	b_1 (mm)	b_2 (mm)
1	112	110	109	111
2	110	112	109	111
3	110	110	108	111
4	110	112	109	111
5	109	112	108	111
6	109	112	108	111
7	110	112	109	112
8	110	112	108	112
9	110	112	109	112
10	110	112	109	112

Tabel 2.3.2.

Resultater af trykforsøg til
bestemmelse af stenstyrken.

Prøve- legeme nr.	Massive sten.			Hulsten.		
	Brud- kraft P (kN)	Areal A (cm ²)	Trykbrud- spænding σ_{c2} (MN/m ²)	Brud- kraft P (kN)	Areal A (cm ²)	Trykbrud- spænding σ_{c2} (MN/m ²)
	1	668	123	54.2	328	121
2	577	123	46.8	297	121	24.5
3	572	121	47.3	352	120	29.4
4	435	123	35.3	266	121	22.0
5	611	122	50.0	411	120	34.3
6	608	122	49.8	383	120	31.9
7	492	123	39.9	343	122	28.1
8	586	123	47.6	335	121	17.7
9	709	123	57.5	353	122	28.9
10	625	123	50.7	326	122	26.7
middelværdi (MN/m ²)			47.9	28.1		
relativ spredning (%)			13.4	12.4		

Kapitel 3. TRYKFORSØG.

3.1. Forsøgets princip.

Som nævnt i indledningen, omtales i dette kapitel nogle undersøgelser af forholdene i en vandret brudlinie i en tværbelastet muret væg.

Da der i dette projekt er anvendt svage mørtler, og dermed mørtler med en ret ringe trækstyrke, er det klart, at man i snit parallelt med liggefugerne overfor en ren momentpåvirkning vil have dels en helt sprød opførsel (trækarbejdslinien for mørtel er lineærelastisk helt til brud), og dels et meget ringe brudmoment. De her omtalte undersøgelser har derfor været koncentreret om tilfældet med kombineret normalkraft og moment, idet man i dette tilfælde for et stort interval for normalkraften er sikret dels et brudmoment af acceptabel størrelse, og dels et stort deformationsinterval inden for hvilket momentet tilnærmet er konstant.

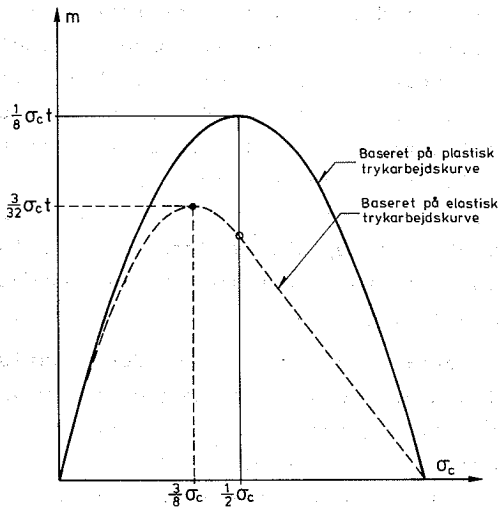
Antager man, at murmaterialet er stift idealplastisk med trækflydespændingen nul (d.v.s. man regner med revnet tværsnit) og trykflydespændingen σ_c , og antager man endvidere at normalkraften svarer til den jævnt fordelte trykspænding σ_o , så ses det meget let, at flydemomentet pr. længdeenhed for en vandret brudlinie kan skrives

$$m = \frac{1}{2} \sigma_o t^2 \left(1 - \frac{\sigma_o}{\sigma_c} \right) \quad (3.1.1)$$

hvor t er væggenes tykkelse. Efter dette udtryk er brudfladen (σ_o, m) altså en andengradsparabel (fuldt optrukket linie) som vist på figur 3.1.1.

En anden og mere konservativ betragtningsmåde var at an-

tage at murmaterialet var idealelastisk med trækstyrken $\sigma_t = 0$ og trykstyrken σ_c . Den til denne antagelse svarende brudflade er også vist (stiplet linie) på figur 3.1.1. Det ses, at der ikke er nogen afgørende forskel på resultatet af de to betragtningsmåder. Vi vil imidlertid i det følgende udelukkende holde os til antagelsen om en stift-plastisk trykarbejdslinie for murværk, og det deraf udledte udtryk (3.1.1) for momentbæreevnen.



Figur 3.1.1. Brudfladen (σ_0, m) på grundlag af simple teoretiske overvejelser.

Formålet med de i dette kapitel omtalte undersøgelser er da først og fremmest for forskellige materialekombinationer at måle et antal punkter på brudfladen, og så undersøge, hvorvidt målingerne er i overensstemmelse med den ovenfor skitserede simple brudteori. Der er udført forsøg

med de i tabel 3.1.1 angivne materialekombinationer. Hver materialekombination betegnes med talkode som ligeledes fremgår af tabel 3.1.1.

Tabel 3.1.1.

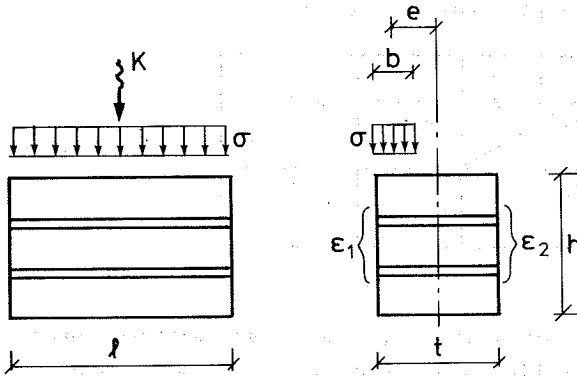
Undersøgte materialekombinationer og de dertil hørende talkoder.

mørtel type \ sten-type	massiv sten	hulsten
K 100	11	12
KC 50/50	21	22

Kombinationen af normalkraft og moment, som medfører brud, kan forsøgsteknisk findes på flere måder. En nærliggende, men forsøgsteknisk lidt besværlig metode er at holde normalkraften konstant, og øge momentet indtil man har opnået brud. Denne metode har den fordel, at man direkte kan måle arbejdskurven for momentet som funktion af vinkeldrejningen, og dermed direkte få et test på, om man med rimelighed for en sådan påvirkning kan benytte en plasticitetsmodel. En sådan undersøgelse har dog ikke den store interesse, da man på forhånd med sikkerhed kan sige, at dette er rimeligt, blot normalkraften er passende lille.

Der er derfor valgt en anden og noget nemmere metode, nemlig måling af punkter på brudfladen ($\sigma_{0,m}$) ved gennemførelse af ekscentriske trykforsøg. Prøvelegemerne er udført af tre sten sammenmuret med to 12 mm tykke mørtelfuger, og trykbelastningen påføres som et jævnt fordelt

tryk over et rektangulært areal som begrænses af de to endekanter, den ene langsgående kant, og en linie parallel med de langsgående kanter, se figur 3.1.2.



Figur 3.1.2. Ekcetrisk trykforsøg.

Under forsøget måles da både variationen af normalkraften K , og de på figur 1.1.2 viste to kanttøjninger ϵ_1 og ϵ_2 . Punkter på brudfladen bestemmes da, for den værdi K_c af normalkraften K hvor hældningen på en (ϵ_1, σ) kurve er faldet kraftigt - eventuelt til nul - med de på figur 3.1.2 anvendte betegnelser af følgende udtryk

$$(\sigma_o, m) = \left(\frac{K_c}{t \cdot l}, \frac{K_c \cdot e}{l} \right)$$

Da størrelserne t og l er geometriske konstante kan vi dog lige så godt afbilde

$$(K_c, K_c \cdot e)$$

(3.1.2)

Der gennemførtes forsøg med 4 forskellige trykfordelinger 1, 2, 3 og 4 givet ved

$$\left. \begin{aligned} \text{type 1: } b_1 &= t \Rightarrow e_1 = 0 \\ \text{type 2: } b_2 &= \frac{t}{2} \Rightarrow e_2 = \frac{1}{4} t \\ \text{type 3: } b_3 &= \frac{t}{4} \Rightarrow e_3 = \frac{3}{8} t \\ \text{type 4: } b_4 &= \frac{t}{8} \Rightarrow e_4 = \frac{7}{16} t \end{aligned} \right\} (3.1.3)$$

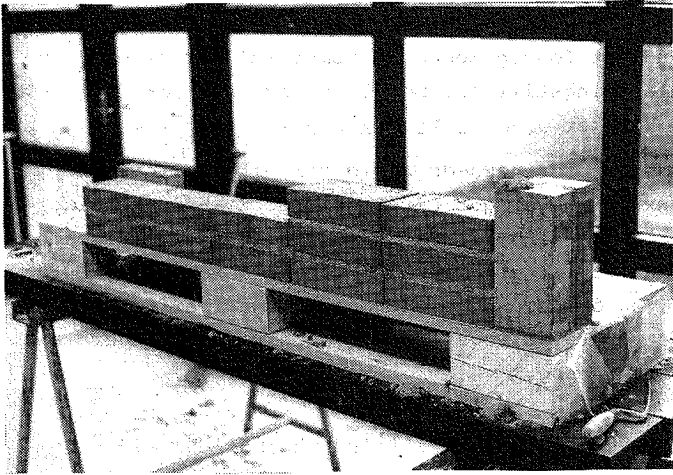
Der blev udført forsøg med alle kombinationer af materialer og belastningstilfælde med 5 gentagelser for hver kombination, hvilket giver ialt $4 \times 4 \times 5 = 80$ forsøg.

Hvert forsøg er for nemheds skyld tildelt et 4 cifret kodetal Txxx.x, hvor det første ciffer x angiver belastningstilfældet i henhold til formel (3.1.3), de følgende to cifre angiver materialekombinationen i henhold til tabel 3.1.1, og det sidste efter punktet angiver gentagelsesnummeret 1,2...5. Bogstavet "T" angiver at der er tale om et trykforsøg.

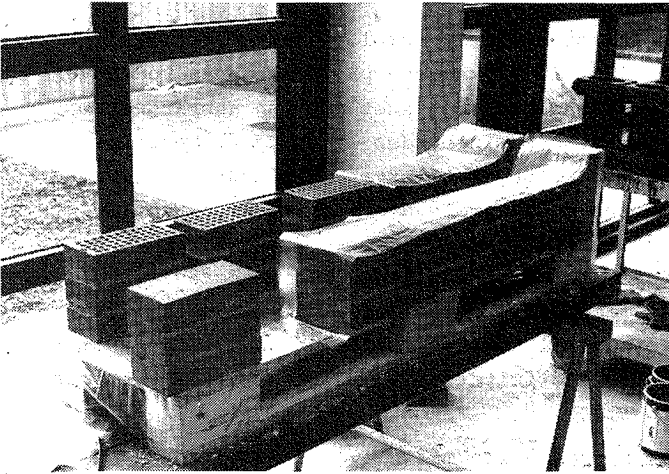
3.2. Prøvelegemernes fremstilling og lagring.

Til murung af prøvelegemer anvendes sten som har ligget i vand et døgn og været stillet til tørring i laboratorieluft i en time. Mørtelerne maskinblandes, idet tilslagsmaterialer og bindemidler er udtaget ved vejning af disse i tørret tilstand. Da stenene næsten er helt vandmættede skal mørtelen have et minimalt vandindhold, afpasset således at bearbejdigheden lige netop er tilstrækkelig.

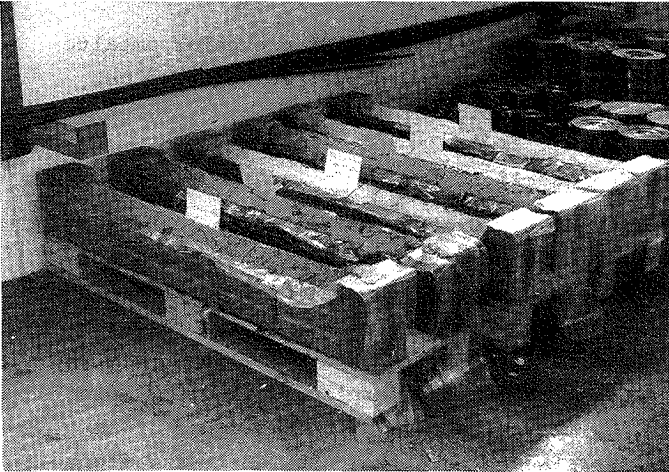
Prøvelegemerne mures da som vist på figurerne 3.2.1, 3.2.2 og 3.2.3 på en speciel palle, således at der står en række på 5 prøvelegemer, forsynet med et muret stop i hver ende langs hver af pallens længdesider. Alle prøvelegemerne på en palle, 10 i alt, er muret af samme mørtelblanding, og repræsenterer således to forsøgstilfælde, idet hver række prøvelegemer svarer til de 5 gentagelser af et enkelt forsøgstilfælde.



Figur 3.2.1. Muring af de enkelte prøvelegemer.



Figur 3.2.2. Sammenmuring af de færdige prøvelegemer med anvendelse af plastfolie, så utilsigtig udtørring hævnes.



Figur 3.2.3. Lagring af prøvelegemer.

Sammenmuringen foregår i to tempi. De enkelte prøvelegemer opmures, idet fugetykkelsen på 12 mm opnås ved anvendelse af afstandsholdere, og idet der kun anbringes mørtel mellem murstenenes indbyrdes liggefuger. Herefter, når liggefugerne er suget tilstrækkeligt tørre, fjernes afstandsholderne, og prøvelegemerne sammenmures nu med anvendelse af plastfoliestrimler, se figur 3.2.2, i en række, således at luften kun har direkte adgang til prøvelegemernes facadeside og bagmursside. Herved tilstræbes en endimensional symmetrisk diffusionstilstand som man har det i midterfeltet af en muret væg, som udtørres ens på de to sider.

Prøvelegemernes nominelle mål bliver derfor med de på figur 3.1.2 anvendte betegnelser

$$\left. \begin{aligned} l &= 228 \text{ mm.} \\ t &= 108 \text{ mm.} \\ h &= 189 \text{ mm.} \end{aligned} \right\} \quad (3.2.1)$$

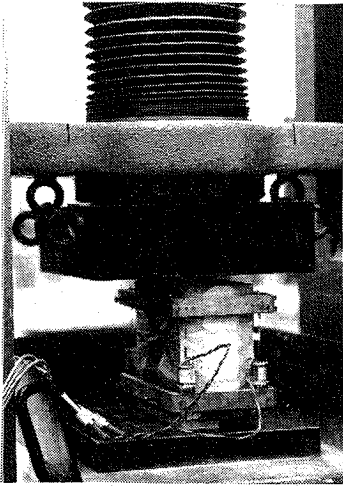
Efter at være blevet sammenmuret på den ovenfor omtalte måde, blev alle prøvelegemer lagret i 28 døgn ved ca. 20°C og 40% relativ fugtighed.

3.3. Opstilling og måleudstyr.

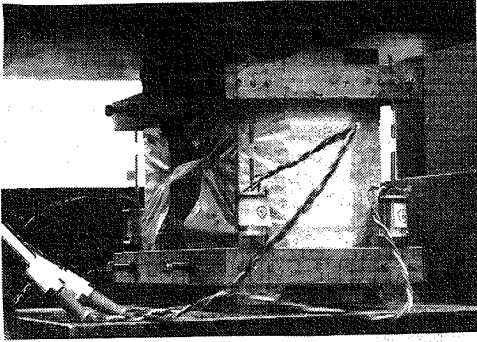
Prøvelegemerne blev trykprøvet i afdelingens 2000 kN MFL-betonprøvemaskine bortset fra nogle tilfælde med relativ lille brudkraft hvor trykprøvning blev foretaget i en 500 kN MAN-betonprøvemaskine udlånt af Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Dth. I begge tilfælde blev trykprøvning foretaget med fast underplan, og kugleskålslejret overplan, og med anvendelse af mellemlæg af 12 mm tyk blød træfiberplade anbragt således, at trykkraftens resultat var i pressens akse. Herved opnåedes på en sim-

pel måde tilnærmet de i afsnit 3.1 omtalte belastningsbetingelser. Se figur 3.3.1 og 3.3.2.

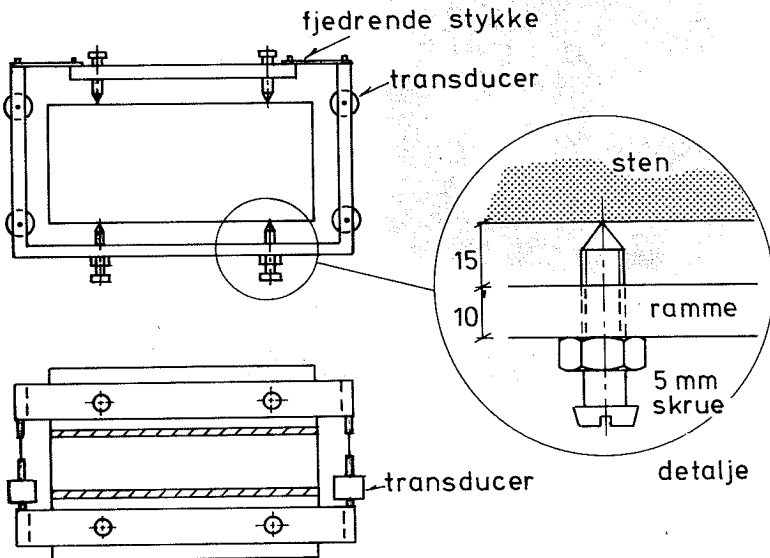
Kraftmålingen blev dels foretaget ved en viseraflæsning af maximalkraften, og en løbende måling af olietrykket ved anvendelse af olietrykstransducer.



Figur 3.3.1. Prøvelegeme trykprøves i 2000 kN MFL-betonprøvemaskine.



Figur 3.3.2. Prøvelegeme trykprøves. Man ser de bløde mellemæg, og målerammerne med de 4 transducere med hvilke tøjningerne måles.



Figur 3.3.3. System til måling af tøjninger.

Måling af tøjninger foregår på følgende måde. Midt på den øverste og den nederste sten fastspændes en vandretliggende fjedrende aluminiumsramme ved hjælp af 4 spidse tilspændingsskruer. På den nederste ramme er fire transducere fastgjort, en ved hver af prøvelegemets hjørner og anbragt med sin målelinie lodret og i flugt med prøvelegemets langside. Transducernes kerner er hver i gennem et slankt bøjeligt stykke pianotråd forbundet med den øvre ramme, således at transducerne måler de indbyrdes flytninger mellem de to rammer. Transducerne måler altså de fire lodrette flytninger δ_1 , δ_2 , δ_3 og δ_4 mellem den øverste og den nederste sten. Lad δ_1 og δ_2 være flytningerne målt i tryksiden, vi finder da kant-tøjningerne ϵ_1 og ϵ_2 af

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= (\delta_1 + \delta_2)/4 h_s \\ \epsilon_2 &= (\delta_3 + \delta_4)/4 h_s \end{aligned} \right\} (3.3.1)$$

hvor h_s er skifteøjden, $h_s = 67$ mm.

Til måling af olietryk benyttedes på afdelingens 2000 kN MFL-presse en HBM, P3M/500 transducer med en følsomhed på 2.00 mV/V ved et tryk på 500 kp/cm² og på den af LBM, DtH udlånte 500 kN MAN-presse en Statham UC 3, press. acc. UPG 4-1000 transducer med en følsomhed på 16 mV/V ved et tryk på 1000 psi.

Til måling af flytningerne $\delta_1 \dots \delta_4$ benyttedes HP 7-DCDT-100 transducere med en følsomhed på ca. 1.33 volt/mm ved en spænding på 6.0 volt.

Signalet fra olietrykstransducerne forstærkedes igennem en HBM KWS 3050 straingaugeforstærker, således, at enten 5000 μ eller 10000 μ på indgangssignalet svarede til fuldt udslag lig med 10 volt på udgangssignalet, alt ef-

ter hvilket olietryksinterval der var aktuelt.

Målingerne blev foretaget automatisk dels ved en samtidig udtegnning af kurverne (ϵ_1, K) og (ϵ_2, K) på 2-kanalskiver, og dels ved digital registrering ved hjælp af afdelingens Solartron scanner anlæg.

De 4 flytningstransducere blev kalibreret med de i tabel 3.3.1 angivne resultater, og alle med en maximal ulinearitet på ca. 1 o/oo indenfor området $-5.0, +5.0$ volt og ca. 1% indenfor området $-5.5, +5.5$ volt. Kalibreringskonstanten for kraftmålingerne (efter forstærkning) fremgår af tabel 3.3.1. Alle kalibreringer bortset fra olietryksmålingen på afdelingens 2000 kN MPL-presse er foretaget ved lineær regression på sammenhørende målinger af signal og målestørrelse. Kalibreringskonstanten for afdelingens 2000 kN MFL-presse er en veldokumenteret størrelse, og der er derfor ikke her foretaget nogen egentlig kalibreringsmåling.

Tabel 3.3.1.

Kalibreringskonstanter for kraftmålinger og flytningsmålinger.

kraftmåling.

Prøvemaskine +	2000 kN MFL-presse.	500 kN MAN-presse.
Forstærkerområde	Kalibreringskonstant. (kN/volt)	Kalibreringskonstant (kN/volt)
5000 μ	382.2	4.43
10000 μ	764.3	8.91

flytningsmåling.

Transducer nr.	Kalibreringskonstant. (mm/volt)
1	0.7628
2	0.7488
3	0.7433
4	0.7606

3.4. Databearbejdning.

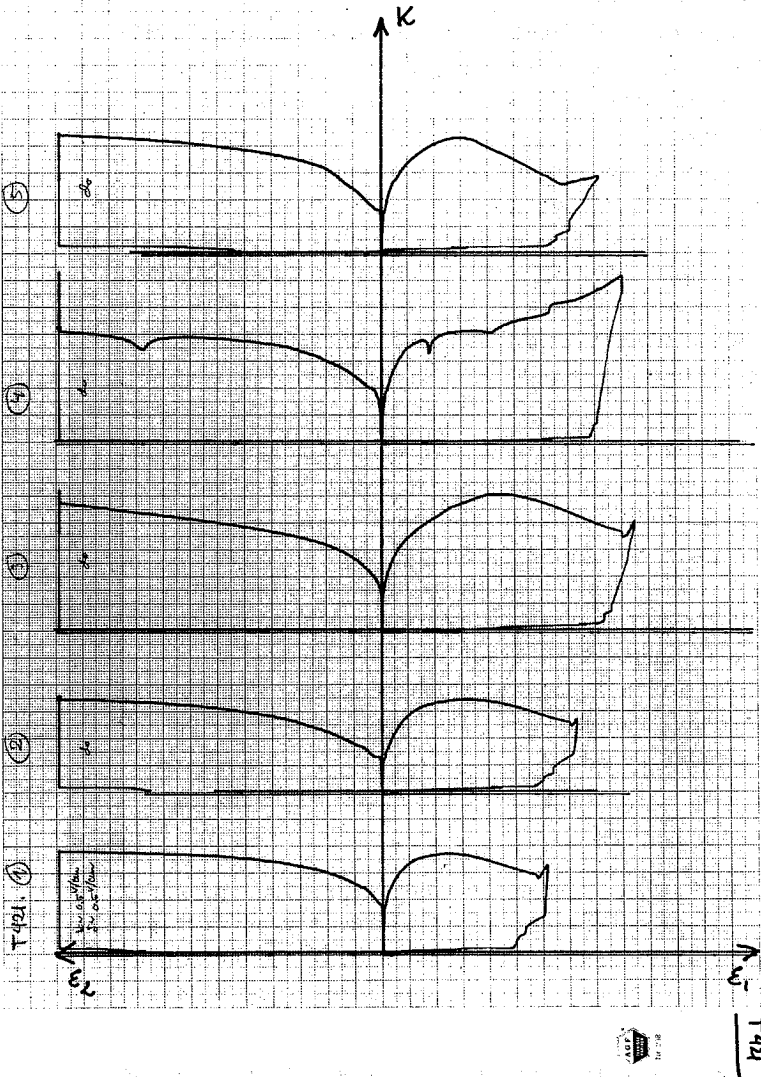
Ved hvert forsøg blev enkelte ting noteret manuelt i målebog, såsom belastningstilfælde, dato, viseraflæst brudkraft (maximalkraft) og forskellige uregelmæssigheder, men hovedparten af målingerne blev foretaget automatisk dels ved en samtidig udtegnning af kurverne (ε_1, K) og (ε_2, K) og dels ved hjælp af afdelingens Solartron scanner anlæg. Der er ikke foretaget nogen egentlig bearbejdning af de ved de samtidigt udtegnede kurver repræsenterende data, idet disse hovedsagelig har værdi under selve forsøget til en samtidig overvågning af hvorvidt forsøget forløber planmæssigt. Samtidige udtegninger for tilfælde T 421 er vist på figur 3.4.1.

Ved hjælp af Solartron scanner anlægget punches løbende data ud på hulstrimmel (papertape). Tabel 3.4.1 viser en listning af hulstrimmelen fra forsøget T 421.1. Det ses, at måledata består af et antal scan, i dette tilfælde 40, som hver består af en tidsmåling (indiceret med en '*') og en herefter følgende række målinger. Ved hver måling er angivet et trecifret kanalnummer i , et 6 cifret helt tal x_i , og et etcifret tal n_i , som angiver måleområdet. Den til den i 'te kanal svarende spænding u_i beregnes da af

$$u_i = x_i \cdot 10^{(n_i - 6)} \text{ mVolt} \quad (3.4.1)$$

På hver kanal måles altså en bestemt størrelse, på kanal 000 måles forsyningsspændingen V , som skal være 6.00 volt, på kanal 001 måles kraften K , på kanalerne 002-005 måles flytningerne $\delta_1 - \delta_4$, og på kanal 006 måles igen kraften K .

De på hulstrimlerne lagrede data er altså på en form som egner sig til edb-behandling. Der blev derfor lavet et



Figur 3.4.1. Samtidige udtegninger af kurverne (ϵ_1, K) for tilfældene $T_{421.1}$ - $T_{421.5}$.

Tabel 3.4.1.

Datafil for tilfælde T421.1.

Listning af papertape.

*105831						
000+060026	5	001+119213	4	002-022309	3	003-007777 3 004+006601 3
005+025292	3	006+119225	4			
*105835						
000+060026	5	001+119238	4	002-022320	3	003-007711 3 004+006616 3
005+025278	3	006+119263	4			
*110244						
000+060024	5	001+130328	4	002-020099	3	003-008642 3 004+005304 3
005+026918	3	006+130310	4			
*110248						
000+060025	5	001+131494	4	002-020503	3	003-008915 3 004+005330 3
005+027527	3	006+133089	4			
*110252						
000+060024	5	001+136085	4	002-020226	3	003-009689 3 004+004911 3
005+027752	3	006+139852	4			
*110256						
000+060023	5	001+143671	4	002-019794	3	003-010793 3 004+003679 3
005+028274	3	006+147915	4			
*110300						
000+060025	5	001+015207	5	002-019249	3	003-012031 3 004+001949 3
005+028817	3	006+157089	4			
*110304						
000+060024	5	001+016221	5	002-018605	3	003-013684 3 004-000365 3
005+029705	3	006+016836	5			
*110308						
000+060023	5	001+017192	5	002-017655	3	003-015249 3 004-002626 3
005+031225	3	006+017610	5			
*110312						
000+060024	5	001+017972	5	002-016555	3	003-016723 3 004-004921 3
005+032951	3	006+018324	5			
*110316						
000+060023	5	001+018601	5	002-015498	3	003-018070 3 004-007087 3
005+034758	3	006+018988	5			
*110320						
000+060024	5	001+019394	5	002-013638	3	003-020190 3 004-010415 3
005+037798	3	006+019872	5			
*110324						
000+060023	5	001+020271	5	002-010225	3	003-023191 3 004-014985 3
005+045621	3	006+020728	5			
*110328						
000+060024	5	001+021110	5	002+032082	3	003-034004 3 004-029745 3
005+069889	3	006+021582	5			
*110332						
000+060023	5	001+021976	5	002+066941	3	003-041875 3 004-041257 3
005+123460	3	006+022443	5			
*110336						
000+060024	5	001+022829	5	002+103503	3	003-049944 3 004-053477 3
005+016333	4	006+023296	5			
*110340						
000+060023	5	001+023665	5	002+015197	4	003-062141 3 004-072039 3
005+023321	4	006+024085	5			
*110344						
000+060023	5	001+024427	5	002+023747	4	003-077978 3 004-093026 3
005+030391	4	006+024853	5			
*110348						
000+060023	5	001+025193	5	002+031524	4	003-092618 3 004-114547 3
005+038321	4	006+025604	5			
*110352						
000+060024	5	001+025910	5	002+040307	4	003-108086 3 004-138696 3
005+047141	4	006+026287	5			
*110356						

Tabel 3.4.1 - fortsat

000+060023	5	001+026556	5	002+050027	4	003-124551	3	004-016475	4
005+056871	4	006+026889	5						
*110400									
000+060024	5	001+027141	5	002+060944	4	003-142416	3	004-019211	4
005+067947	4	006+027434	5						
*110404									
000+060024	5	001+027643	5	002+072815	4	003-016117	4	004-021935	4
005+079354	4	006+027875	5						
*110408									
000+060023	5	001+028191	5	002+086501	4	003-018280	4	004-025166	4
005+093976	4	006+028446	5						
*110412									
000+060023	5	001+028654	5	002+103279	4	003-020789	4	004-028786	4
005+111035	4	006+028887	5						
*110416									
000+060023	5	001+029115	5	002+123116	4	003-023698	4	004-032919	4
005+131886	4	006+029331	5						
*110420									
000+060023	5	001+029561	5	002+147786	4	003-027281	4	004-037809	4
005+158898	4	006+029735	5						
*110424									
000+060023	5	001+029870	5	002+017644	5	003-031266	4	004-042873	4
005+018973	5	006+029979	5						
*110428									
000+060022	5	001+030105	5	002+020786	5	003-035508	4	004-047971	4
005+022273	5	006+030167	5						
*110432									
000+060023	5	001+030283	5	002+024403	5	003-040249	4	004-053853	4
005+026355	5	006+030404	5						
*110436									
000+060022	5	001+030491	5	002+029453	5	003-046525	4	004-061877	4
005+032522	5	006+030621	5						
*110440									
000+060023	5	001+030616	5	002+039063	5	003-057669	4	004-077193	4
005+046028	5	006+030438	5						
*110444									
000+060023	5	001+029710	5	002+068088	5	003-091204	4	004-129052	4
005+096992	5	006+026141	5						
*110448									
000+060013	5	001+027052	5	002+082110	5	003-131227	4	004-016884	5
005+095079	5	006+028012	5						
*110452									
000+060012	5	001+026595	5	002+081358	5	003-132773	4	004-016932	5
005+096716	5	006+142342	4						
*110456									
000+060023	5	001+124501	4	002+023897	5	003-089249	3	004-149993	3
005+024329	5	006+120824	4						
*110500									
000+060023	5	001+120294	4	002+022817	5	003-049064	3	004-136966	3
005+023613	5	006+120397	4						
*110504									
000+060024	5	001+120096	4	002+022609	5	003-038094	3	004-133442	3
005+023366	5	006+119764	4						
*110508									
000+060024	5	001+119613	4	002+022466	5	003-029968	3	004-130684	3
005+023180	5	006+119602	4						
*110512									
000+060024	5	001+119628	4	002+022354	5	003-023528	3	004-128587	3
005+023026	5	006+119732	4						

Tabel 3.4.2.

Bearbejdede måledata.

TABEL FOR FORSOEGSTILFAELDE T421.1
FORSOEG KOERT D. 6. 4.78.

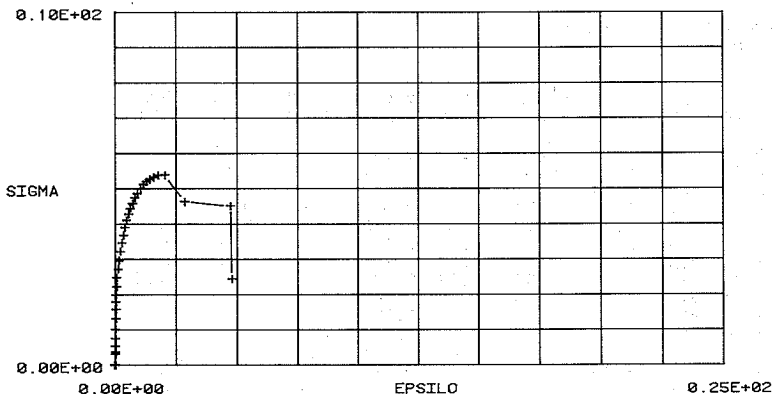
SCAN NR.	LOKAL KLOKKE	LOKAL TID	KRAFT (KN)	SIGMA (MN/M2)	EPSK (0/00)	MOMENT (KNM)	EPSM (0/00)	EPS1 (0/00)	EPS2 (0/00)
1	0. 0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
3	4.13	253	0.99	0.32	0.01	0.047	0.02	0.01	-0.01
4	4.17	257	1.16	0.38	0.01	0.055	0.02	0.01	-0.01
5	4.21	261	1.67	0.54	0.01	0.079	0.03	0.01	-0.01
6	4.25	265	2.37	0.77	0.01	0.112	0.04	0.02	-0.02
7	4.29	269	3.15	1.02	0.02	0.149	0.05	0.03	-0.02
8	4.33	273	4.10	1.33	0.03	0.194	0.07	0.04	-0.02
9	4.37	277	4.88	1.59	0.04	0.231	0.09	0.05	-0.03
10	4.41	281	5.55	1.80	0.05	0.262	0.12	0.06	-0.04
11	4.45	285	6.12	1.99	0.06	0.289	0.14	0.07	-0.05
12	4.49	289	6.87	2.23	0.07	0.325	0.18	0.08	-0.06
13	4.53	293	7.64	2.48	0.09	0.361	0.24	0.10	-0.09
14	4.57	297	8.40	2.73	0.14	0.397	0.64	0.18	-0.34
15	5. 1	301	9.17	2.98	0.18	0.433	0.94	0.23	-0.54
16	5. 5	305	9.93	3.22	0.22	0.469	1.28	0.29	-0.76
17	5. 9	309	10.65	3.46	0.28	0.503	1.81	0.38	-1.10
18	5.13	313	11.33	3.68	0.35	0.535	2.48	0.48	-1.55
19	5.17	317	12.01	3.90	0.42	0.567	3.16	0.58	-2.01
20	5.21	321	12.63	4.10	0.49	0.597	3.92	0.69	-2.51
21	5.25	325	13.19	4.28	0.57	0.623	4.75	0.81	-3.08
22	5.29	329	13.69	4.45	0.65	0.647	5.69	0.94	-3.71
23	5.33	333	14.11	4.58	0.73	0.667	6.66	1.07	-4.38
24	5.37	337	14.61	4.75	0.82	0.690	7.85	1.22	-5.20
25	5.41	341	15.01	4.88	0.92	0.709	9.25	1.40	-6.17
26	5.45	345	15.42	5.01	1.04	0.728	10.93	1.60	-7.35
27	5.49	349	15.79	5.13	1.17	0.746	13.05	1.83	-8.84
28	5.53	353	16.04	5.21	1.30	0.758	15.46	2.09	-10.56
29	5.57	357	16.23	5.27	1.43	0.767	18.05	2.35	-12.41
30	6. 1	361	16.41	5.33	1.57	0.776	21.13	2.65	-14.64
31	6. 5	365	16.60	5.39	1.75	0.784	25.58	3.06	-17.87
32	6. 9	369	16.58	5.39	2.03	0.783	34.64	3.81	-24.54
33	6.13	373	14.26	4.63	2.85	0.674	65.79	6.22	-47.61 ***
34	6.17	377	13.91	4.52	4.75	0.657	72.82	8.47	-51.11 ***
35	6.21	381	7.57	2.46	4.79	0.358	73.20	8.53	-51.36 ***
36	6.25	385	0.31	0.10	-0.24	0.014	17.82	0.67	-13.91
37	6.29	389	0.10	0.03	-0.35	0.005	17.00	0.52	-13.39
38	6.33	393	0.06	0.02	-0.38	0.003	16.79	0.48	-13.26
39	6.37	397	0.03	0.01	-0.40	0.002	16.64	0.45	-13.16
40	6.41	401	0.04	0.01	-0.42	0.002	16.51	0.43	-13.08

KMAX - VISERAFLAESNING : 16.33 KN.
 KMAX - BEREGNET: 16.60 KN.
 FEJLSTOERRELSE: 1.67 0/0.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T421.1.
 FORSOEG UDFOERT D. 6. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 47. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/OO.



Figur 3.4.2. Edb-plot af kurven (ϵ_k, σ) for tilfælde T 421.1.

edb-program i Fortran IV til afdelingens PDP-8 minicomputer ved hjælp af hvilket langt den største del af databearbejdningen blev foretaget. Trykkraften K_τ til tidspunktet τ findes da af

$$K_\tau = C ((u_{\tau,1} + u_{\tau,6}) - (u_{0,1} + u_{0,6}))/2. \quad (3.4.2)$$

hvor C er den aktuelle kalibreringskonstant angivet i tabel 3.3.1 (i eksemplet i tabel 3.4.1 er anvendt 500 kN MAN-presse, og forstærkerområde 10000 μ) og u_{01} og u_{06} angiver målesignalerne for udgangstilstanden, $\tau = 0$, d.v.s. det ubelastede prøvelegeme. Af formel (3.3.1) fås

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\tau,1} &= (k_1(u_{\tau,2} - u_{0,2}) + k_2(u_{\tau,3} - u_{0,3}))/4 h_s \\ \varepsilon_{\tau,2} &= (k_3(u_{\tau,4} - u_{0,4}) + k_4(u_{\tau,5} - u_{0,5}))/4 h_s \end{aligned} \right\} \quad (3.4.3)$$

hvor k_j er kalibreringskonstanten for flytningstransducer nr. i , se tabel 3.3.1, og $u_{\tau,i}$ og $u_{0,i}$ betegner de til transducer j på kanal i svarende målepændinger til henholdsvis tiden nul (udgangstilstanden), og tiden τ .

Desuden bestemtes

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{K}{l \cdot b} \\ M &= K \cdot e \end{aligned} \right\} \quad (3.4.4)$$

samt længdetøjningen ε_k i kraften K 's angrebslinie, og den indbyrdes vinkeldrejning ε_m af den øverste og den nederste sten.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_k &= \varepsilon_1 - \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{t} \cdot \frac{b}{2} \right) \\ \varepsilon_m &= (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot 2 h_s / t \end{aligned} \right\} \quad (3.4.5)$$

Bestemmelse af ε_k og ε_m på denne måde bygger direkte på en antagelse om, at der for stenene gælder, at plane tværsnit (parallele med liggefugen) forbliver plane. Denne antagelse kan selvsagt ikke opfyldes når stenene går i stykker, og man må da være opmærksom på, at ε_k og ε_m da ikke med rimelighed kan gives nogen sikker fysisk forklaring.

For hvert forsøg blev der pr. edb skrevet en tabel ud, som for hvert scan angiver de ovenfor omtalte beregnede

størrelser. Tabel 3.4.2 viser en sådan tabel for tilfældet T 421.1. I programmet blev det løbende kontrolleret, om nogen af de anvendte flytningstransducere afgav signaler som faldt uden for linearitetsintervallet $[-5,5; +5.5]$ volt; såfremt dette er tilfældet markeres det i tabellens højre margin med tre stjerner. Det ses altså, at flytningsmålingerne i scan 33 - 35 ikke kan anses for at være særligt troværdige, da linearitetsintervallet åbenbart her er overskredet.

Til sidst er der desuden foretaget en kontrol af, om der er en acceptabel overensstemmelse mellem den viseraflæste maksimalkraft, og den i programmet beregnede maksimale kraft.

Hvis vi for et specifikt forsøgsudfald betragter σ som funktion af ϵ_k , $\sigma = \sigma(\epsilon_k)$, så ses det, at det totale ydre arbejde $A(\epsilon_k)$ er

$$A(\epsilon_k) = 2 h_s b_l \cdot \int_{x=0}^{\epsilon_k} \sigma(x) dx \quad (3.4.6)$$

Kurven (ϵ_k, σ) er derfor arbejdskurven for det ekscentriske trykforsøg. For hver forsøg er kurven (ϵ_k, σ) derfor tegnet op på afdelingens digitalplotter styret af det tidligere omtale til forsøget udviklede software. Figur 3.4.2 viser et sådant edb-plot for forsøg T 421.1. Vedrørende de på akserne angivne grænser skal det nævnes, at der her er benyttet programmeringsnotation, således at f.eks. $0.25E+02$ skal opfattes som tallet $0.25 \cdot 10^2$.

3.5. Måleresultater.

Da det ville tage urimeligt meget plads op i rapporten at give alle de enkelte forsøgs detaljerende resultater

er det valgt, at bringe arbejdskurverne (ϵ_k, σ) for tilfældene T 121, T 221, T 321 og T 421, d.v.s. materialekombinationen mørtel KC 50/50 og massiv steb for alle 4 belastningstyper. Disse resultater er vist i appendix A; og svarer kvalitativt til hvad der er målt for de øvrige materialekombinationer. Af disse, samt øvrige målte arbejdskurver fremgår det, at arbejdskurveforløbet kan deles op i tre faser.

Første fase som svarer til en lineærelastisk opførsel, og som for de fleste målte tilfælde kun er aktuel i et meget lille spændingsinterval omkring $\sigma = 0$, se figur A.2.6 appendix, som viser tre aflastninger på arbejdskurven. Anden fase kan beskrives som en plastisk tilstand med kraftig tøjningshærdning. Tøjningshærdningen er karakteriseret ved at være næsten lineær, især for belastningstilfældene 1 og 2, og at være aktuel i et relativt stort spændingsinterval. Sidste fase, brudfasen, er karakteriseret ved at hældningen $d\sigma/d\epsilon_k$ falder kraftigt eventuelt helt til nul i forhold til hældningen på stykket med tøjningshærdning.

Brud er defineret ud fra arbejdskurverne (ϵ_k, σ) som det første sted på disse, som kan henføres under fase 3, brudspændingen σ_c , vil derfor ofte være noget mindre end maximalspændingen σ_{max} . Da brudspændingen σ_c , især for belastningstilfældene 1 og 2, ofte nås samtidig med, at stenene går i stykker, vil målepunkterne efter brud er opnået, af de i afsnit 3.5 omtalte grunde, have en tendens til at fordele sig på en temmelig tilfældig måde. Når stenene går i stykker falder nemlig forudsætningerne for bestemmelse af tøjningen ϵ_k væk.

Vi vil koncentrere os om hvorvidt brudtilstanden karakteriseret ved brudmomentet M og normalkraften K med rimelighed kan beskrives ved udtrykket (3.1.1). Tabellerne

3.5.1, 3.5.2, 3.5.3 og 3.5.4 angiver brudpunkterne (K, M) for alle de gennemførte forsøg, samt middelværdierne for de enkelte forsøgstilfælde. Middelværdierne for brudspændingerne σ_c er for de 16 forsøgstilfælde angivet i tabel 3.5.5. Det ses heraf, at brudspændingen σ_c er kraftigt afhængig af belastningstilfældet, altså belastningsbredden b . Det ville man også forvente, da brudspændingen for belastningstilfælde 1 er langt større end de tilsvarende egentrykstyrker for mørtelen. Det ses da også, at vi har den kraftigste afhængighed af belastningsbredden for materialekombinationen 11 hvor forholdet mellem trykstyrken for murværket for belastningsfordelingen 1 og egentrykstyrken af mørtelen er størst.

Udtrykket (3.1.1) forudsætter imidlertid at σ_c kan regnes konstant, og man kan derfor med rimelighed tvivle på om det da vil være forsvarligt at benytte det simple udtryk (3.1.1) til bestemmelse af brudmomentet som funktion af normaltrykket. Dette spørgsmål vil vi se på lidt senere. Antager man imidlertid for brudmomentet en kvalitativ afhængighed af normaltrykket som angivet i (3.1.1), så bliver brudfladen (brudkurven) (K, M) altså en andengradsparabel med rødderne $K = 0$ og $K = K_c$, hvor K_c er trykbrudkraften for belastningstilfælde 1.

I figur 3.5.1 er brudpunkterne (K, M) , som er angivet i tabellerne 3.5.1 - 3.5.4, samt det bedste 2.-gradsfit på disse punkter, plottet for de fire materialekombinationer. Kurverne er på formen

$$\frac{M}{M_0} = a_0 + a_1 \frac{K}{K_0} + a_2 \left(\frac{K}{K_0} \right)^2 \quad (3.5.1)$$

hvor M_0 er 1 kNm og $K_0 = 1$ kN.

BOEJNINGSMOMENTBRUDFLADER.

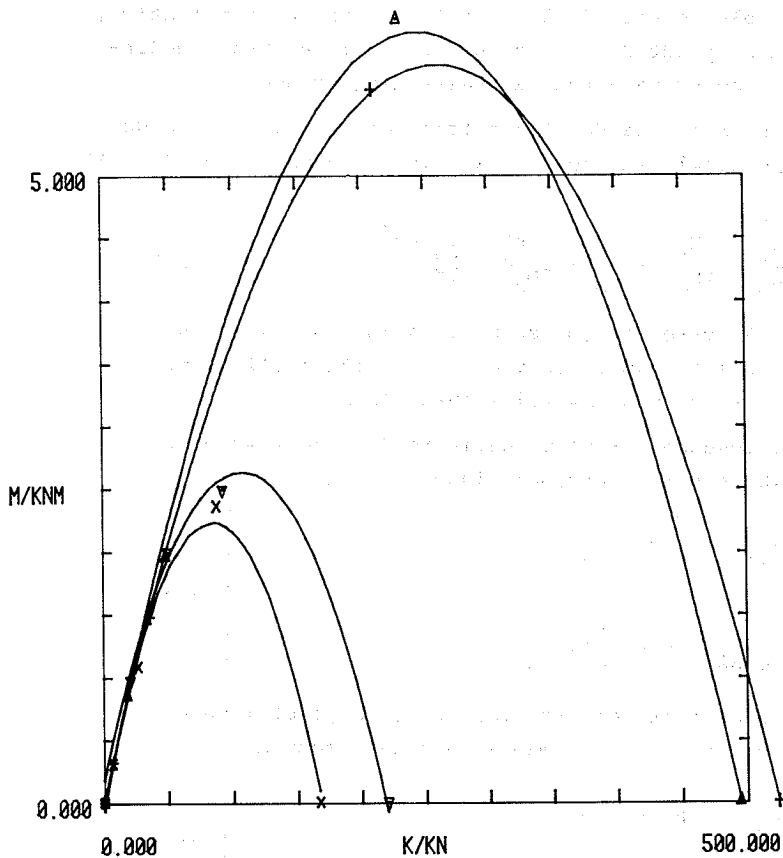
MAALEPUNKTER, TILFAELDE TX11 : +

MAALEPUNKTER, TILFAELDE TX12 : x

MAALEPUNKTER, TILFAELDE TX21 : Δ

MAALEPUNKTER, TILFAELDE TX22 : ▽

BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF NORMALKRAFT K.



Figur 3.5.1. Eksperimentelt bestemte brudflader.

Koefficienterne a_0 , a_1 og a_2 er for de 4 materialekombinationer angivet i tabel 3.5.6. Koefficienterne er fastlagt ud fra mindste kvadraters metode, d.v.s. en minimering af 2-normen.

Af figur 3.5.1 ses det, at forsøgsresultaterne tilsyneladende kvalitativt lader sig forklare helt tilfredsstillende ved den simple teori givet ved (3.1.1). Spørgsmålet er dels om beskrivelsen også er i orden kvantitativt, samt om hvorvidt der må tages hensyn til at brudspændingen σ_c ikke er uafhængig af belastningsbredden.

For at sammenligne det teoretiske udtryk (3.3.1) med de eksperimentielt fundne udtryk (3.5.1) så omskrives (3.3.1) til

$$\frac{M}{M_0} = \frac{tK_0}{2M_0} \cdot \frac{K}{K_0} - \frac{K_0^2}{2M_0^2 \sigma_c} \left(\frac{K}{K_0} \right)^2 \quad (3.5.2)$$

For at få overensstemmelse må vi altså sætte $a_0 = 0$, hvilket ses af tabel 3.5.6 at være helt rimeligt, da de fundne værdier helt må tilskrives tilfældigheder.

Det ses desuden, at vi må definere de effektive værdier for tykkelsen t og brudspændingen σ_c ved

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{eff}} &= \frac{2M_0}{K_0} \cdot a_1 \\ \sigma_{c,\text{eff.}} &= - \frac{K_0}{2M_0^2} \frac{1}{a_2} \end{aligned} \right\} (3.5.3)$$

De heraf bestemte effektivværdier er angivet i tabel 3.5.7. Det ses her, at man i snit kan regne med

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{eff}} &\cong 0.90 \cdot t \\ \sigma_{c,\text{eff.}} &\cong 1.11 \cdot \sigma_c \end{aligned} \right\} (3.5.4)$$

Ved anvendelse af formel (3.1.1) skal de effektive værdier altså helt erstatte de direkte målte. Spændingen σ_c skal f.eks. således bestemmes ud fra den effektive tykkelse.

Hvor stor en fejl begås der ved at regne med de effektive værdier for t og σ_c og undlade at tage hensyn til σ_c 's afhængighed af belastningsbredden? Hvis der for det tilfælde hvor afhængigheden er kraftigst, nemlig tilfælde TX11, regnes med de virkelige værdier for t og for σ_c (givet ved tabel 3.5.5) så kan afvigelserne for det fundne andengradsudtryk i forhold til den hertil svarende mere korrekte brudflade, som er bestemt under hensyntagen til variationen af σ_c , gøres op som følger. I intervallet $b/l \in [0;2.5]$ underestimeres der med en maximal fejl på 10.0% , i intervallet $b/l \in [2.5;5.5]$ overestimeres der med en maximal fejl på 4.0% , og i intervallet $b/l \in [5.5;1.0]$ underestimeres der med en maximal fejl på 10.0%. Da den gennemsnitlige numeriske fejl imidlertid er mindre end 5%, og da den kun overestimeres med max. 4%, kan det altså konkluderes, at udtrykket (3.1.1) kun i ringe grad er følsomt overfor hvorvidt antagelsen om, at trykflydespændingen σ_c er uafhængig af belastningsbredden, er opfyldt. Det må da være rimeligt, at benytte dette udtryk for momentbæreevnen på den ovenfor omtalte måde.

Det vil altså sige at flydemomentet pr. længdeenhed bestemmes af

$$m = \frac{1}{2} \sigma_o t^2 \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_o} \right) \quad (3.5.5)$$

hvor

$$\left. \begin{aligned} t &= t_{\text{eff}} \\ \sigma_c &= \sigma_{c,\text{eff}} \end{aligned} \right\} (3.5.6)$$

og σ_o bestemmes ud fra den effektive tykkelse. Effektivværdierne kan for de enkelte materialekombinationer findes af tabel 3.5.7, eller man kan benytte de ved forsøget fundne gennemsnitsværdier

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{eff}} &= 0.90 \cdot t \\ \sigma_{c,\text{eff}} &= 1.11 \cdot \sigma_c \end{aligned} \right\} (3.5.7)$$

Til slut skal det nævnes, at det for langt de fleste vægkonstruktioner vil være uforsvarligt at benytte de ovenfor udledte udtryk for normalspændingsniveau'er σ_o , som er af samme størrelsesorden som trykstyrken σ_c , uden at tage hensyn til slankhedseffekten. De ovenfor udledte udtryk har derfor i de fleste tilfælde kun en umiddelbar anvendelighed ved passende små normaltryk σ_o .

Tabel 3.5.1.

Brudkræfter K_c og brudmomenter M_c for tilfælde T x 11.

		Tilfælde T x 11			
Brud- størrelse	Prøve- legeme	x = 1	x = 2	x = 3	x = 4
K_c (kN)	1	495.	220.	30.3	6.81
	2	614.	216.	55.0	6.34
	3	529.	222.	32.5	7.14
	4	552.	220.	31.0	7.37
	5	531.	176.	34.0	7.78
middel	(kN)	524.	211.	36.6	7.09
Relativ spredning	(%)	8.1	9.4	29.	7.7
M_c (kNm)	1	0.	5.93	1.23	0.322
	2	0.	5.83	2.23	0.300
	3	0.	6.01	1.32	0.337
	4	0.	5.93	1.29	0.348
	5	0.	4.74	1.38	0.368
middel	(kN)	0.	5.69	1.49	0.335
Relativ spredning	(%)	-	9.4	29.	7.7

Tabel 3.5.2.

Brudkræfter K og brudmomenter M_c for tilfælde T x 12.

		Tilfælde T x 12			
Brudstørrelse	Prøvelegeme	x = 1	x = 2	x = 3	x = 4
K_c (kN)	1	mang.	103.	24.7	9.88
	2	mang.	87.2	29.6	7.00
	3	151.	86.1	32.9	3.41
	4	148.	89.5	24.6	6.96
	5	202.	73.2	24.4	7.21
middel	(kN)	167.	87.7	27.2	6.89
Relativ spredning	(%)	18.	12.	14.	33.
M_c (kNm)	1	0.	2.78	0.99	0.467
	2	0.	2.35	1.20	0.331
	3	0.	2.33	1.33	0.161
	4	0.	2.42	1.00	0.329
	5	0.	1.98	0.99	0.341
middel	(kN)	0.	2.37	1.10	0.326
Relativ spredning	(%)	-	12.	14.	33.

Tabel 3.5.3.

Brudkræfter K og brudmomenter
 M_c for tilfælde T x 1.

		Tilfælde T x 4			
Brud- størrelse	Prøve- legeme	x = 1	x = 2	x = 3	x = 4
K_c (kN)	1	476.	198.	64.5	16.6
	2	505.	257.	56.9	15.7
	3	508.	212.	37.0	22.9
	4	484.	257.	40.5	17.2
	5	496.	233.	44.4	19.5
middel	(kN)	494.	231.	48.7	18.4
Relativ spredning	(%)	2.8	12.	24.	16.
M_c (kNm)	1	0.	5.34	2.61	0.784
	2	0.	6.95	2.31	0.742
	3	0.	5.72	1.50	1.082
	4	0.	6.94	1.64	0.814
	5	0.	6.29	1.80	0.921
middel	(kN)	0.	6.25	1.97	0.869
Relativ spredning	(%)	-	12.	24.	16.

Tabel 3.5.4.

Brudkræfter K_c og brudmomenter M_c for tilfælde Tx22.

		Tilfælde T x 22			
Brudstørrelse	Prøvelegeme	x = 1	x = 2	x = 3	x = 4
K_c (kN)	1	230.	85.2	54.3	21.6
	2	214.	99.4	47.6	28.0
	3	217.	100.0	47.7	17.0
	4	230.	92.7	51.2	21.1
	5	206.	87.1	47.7	16.4
middel	(kN)	220.	92.9	49.7	21.0
Relativ spredning	(%)	4.7	7.3	6.0	21.
M_c (kNm)	1	0.	2.30	2.20	1.02
	2	0.	2.67	1.93	1.32
	3	0.	2.70	1.93	0.84
	4	0.	2.50	2.08	1.00
	5	0.	2.35	1.93	0.78
middel	(kN)	0.	2.50	2.01	0.99
Relativ spredning	(%)	-	7.3	6.0	21.

Tabel 3.5.5.

Målt jævnt fordelt brudspænding σ_c for de forskellige forsøgstilfælde.

	x = 1	x = 2	x = 3	x = 4
Forsøgs-tilfælde	σ_c (MN/m ²)	σ_c (MN/m ²)	σ_c (MN/m ²)	σ_c (MN/m ²)
Tx11	21.3	17.1	5.95	2.30
Tx12	6.78	5.56	4.42	2.24
Tx21	20.1	18.8	7.91	5.98
Tx22	8.93	7.55	8.07	6.82

Tabel 3.5.6.

Koefficienter til eksperimentelt bestemte brudflader.

Forsøgs-tilfælde	a_0 (10 ⁻²)	a_1 (10 ⁻²)	a_2 (10 ⁻⁵)
Tx11	2.12	4.48	- 8.56
Tx12	-5.58	5.41	-31.9
Tx21	-2.59	4.99	-10.1
Tx22	1.91	4.57	-21.3

Tabel 3.5.7.

Sammenligning mellem direkte målte og effektive værdier af t og σ_c .

Tilfælde	Målt t (mm)	Effektiv t_{eff} (mm)	Forhold t_{eff}/t	Målt σ_c (MN/m ²)	Effektiv $\sigma_{c,\text{eff } 2}$ (MN/m ²)	Forhold $\frac{\sigma_{c,\text{eff}}}{\sigma_c}$
Tx11	108	89.6	0.83	21.3	25.6	1.20
Tx12	108	108.2	1.00	6.78	6.87	1.01
Tx21	108	99.8	0.92	20.1	21.7	1.08
Tx22	108	91.4	0.85	8.93	10.3	1.15
Middelværdi			0.90			1.11
Relativ spredning (%)			8.8			7.0

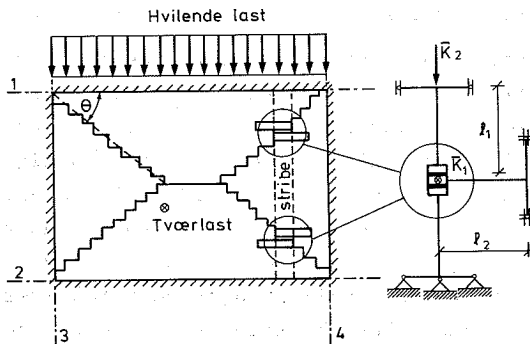
Kapitel 4. VRIDEBØJEFORSØG.

4.1. Forsøgets princip.

I dette kapitel omtales nogle undersøgelser af brudforholdene i en skrå brudlinie i en tværbelastet muret væg.

Der er for de her omtale forsøgs vedkommende taget udgangspunkt i det i figur 4.1.1 viste specifikke brudtilfælde, hvor der er tale om en langs alle 4 rande simpelt understøttet muret væg uden huller og udført i almindeligt løberforbandt belastet med en jævnt fordelt linielast i væggens plan langs den øvre rand, og en jævnt fordelt tværlast på hele væggens areal. Med de begrænsninger der følger af de forskellige idealiseringer og antagelser og de få undersøgte materialekombinationer, må resultaterne imidlertid anses for at gælde for skrå brudlinier i al almindelighed.

Der er i litteraturen, se nærmere herom i indledningen, angivet en del resultater fra forsøg med netop det i figur 4.1.1 viste tilfælde. Det fremgår heraf, at der i en muret væg, som er understøttet og belastet på den her viste måde, vil dannes et brudmønster som helt svarer til brudliniemønsteret i en tilsvarende understøttet og belastet jernbetonplade. De skrå brudlinier, som løber ud til væggens hjørner er, dog forskellige fra de tilsvarende brudlinier i en jernbetonplade derved, at de antager et systematisk trappeformet forløb, idet bruddene næsten udelukkende sker i mørtelfugerne. Det er desuden en kendsgerning, at der i de skrå brudlinier udføres et relativt stort bidrag til de indre kræfters arbejde, især når skivebelastningen er lille, og det er derfor af betydning for en eventuel anvendelse af brudteori på en sådan muret væg, at vide hvor store disse bidrag er, og hvilke faktorer de afhænger af. Disse spørgsmål er helt centrale



Figur 4.1.1. Principskitse for forsøg med kombineret vridning og bøjning. Det er søgt anskueliggjort, hvorledes prøvemaskinens mekaniske princip er afledt af brudforholdene i en tværbelastet muretvæg med et lodret kanttryk.

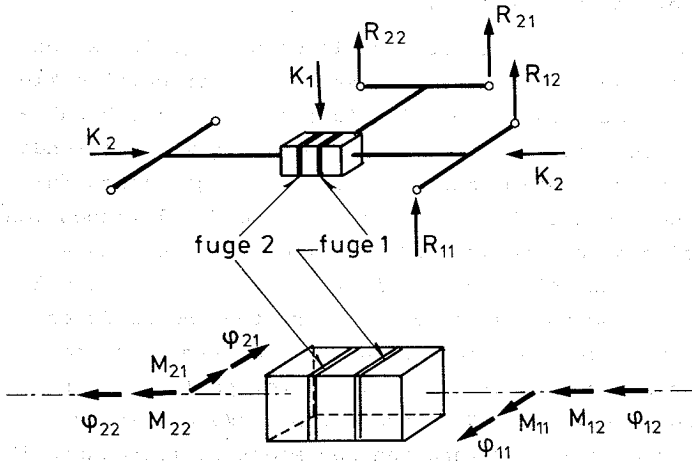
for de i dette kapitel omtalte undersøgelser, og for hele projektet iøvrigt.

Der er i det følgende gjort visse idealiserende antagelser om forholdene i de betragtede i figur 4.1.1 viste skrå brudlinier. Det er antaget af brudlinierne helt forløber i fugerne, samt der kan ses bort fra studsfugernes bidrag til det indre arbejde. Betragtes som vist på figur 4.1.1 en lodret stribe i murværket, ser man, at den består af tre dele, nemlig en del som drejer sig om understøtningslinie 1, en del som drejer sig om understøtningslinie 4 og en del som drejer sig om understøtningslinie 2, og at

disse kombinerede bevægelser giver anledning til både et vridende og et bøjende moment i de to liggefuger, som adskiller de tre bruddele.

Problemet kan derfor reduceres til en betragtning af en liggefuge, som udsættes for de samme ovenfor omtalte kinematiske betingelser som liggefugerne i de skrå brudlinier. Dette gøres ved prøvning af prøvelegemer bestående af 3 halve sten sammenmuret med 2 mørtelfuger (liggefuger), idet de korrekte kinematiske forhold tilstræbes ved anvendelse af en speciel prøvemaskine, hvis mekaniske princip er anskueliggjort i figur 4.1.1. Som det fremgår af denne principskitse er der i hver sten indspændt en "arm" som er understøttet således, at systemet ved belastning af en normalkraft K_2 vinkelret på liggefugens plan, og en tværkraft K_1 vinkelret på prøvemaskinens plan i brudmæssig forstand kan repræsentere forholdene i de to delstykker af brudlinien som forløber igennem dem på figur 4.1.1 markerede lodrette murværksstribe. Af praktiske grunde blev prøvemaskinens plan imidlertid anbragt i et vandret plan, således at normalkraften K_2 blev påført som en vandret kraft, og tværkraften som en lodret nedad virkende kraft, som vist på figur 4.1.2.

Måles de fire reaktioner R_{11} , R_{12} , R_{21} og R_{22} som vist på figuren, så kan der på grundlag heraf bestemmes de ialt fire vridende og bøjende momenter M_{11} , M_{12} , M_{21} og M_{22} i de to fuger. Det første indeks angiver stedet, fuger 1 eller fuger 2, og det andet indeks retningen, se figur 4.1.2. Defineret på helt tilsvarende måde er desuden indført vinkeldrejningerne φ_{11} , φ_{12} , φ_{21} og φ_{22} af de to ydersten i forhold til den midterste. Snitmomenterne henføres til prøvelegemets akse, og både momenter og vinkeldrejninger regnes opfattet som vektorer positivt i følgende højreskruereglen med de på figur 4.1.2 angivne orien-



Figur 4.1.2. Princip for forsøg med kombineret vridning og bøjning. Fortegnsregning for snitmomenter M_{ij} og vinkeltojnninger ϕ_{ij} , $i, j = 1, 2$ i overensstemmelse med højreskruereglen.

teringer.

Tænker man sig, at man for et specifikt forsøg har bestemt kurverne

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_i(\tau) &= (M_{i1}(\tau), M_{i2}(\tau)) \\ \bar{\phi}_i(\tau) &= (\phi_{i1}(\tau), \phi_{i2}(\tau)) \end{aligned} \right\} (4.1.1)$$

for fugerne $i = 1, 2$, hvor τ er tiden, så kan de indre kræfters arbejde A_i , $i = 1, 2$ for de to fuger, idet der

ses bort fra normalkræfternes bidrag bestemmes af kurveintegralerne

$$A_i(\tau) = \int_{t=0}^{\tau} \bar{M}_i \cdot \frac{d\bar{\varphi}_i}{dt} \cdot dt \quad (4.1.2)$$

Hvis forsøget imidlertid er udført sådan, at tøjningerne er stadigt voksende, så kan vi benytte tøjningen φ_{i1} som kurveparameter i stedet for tiden τ . Vi kan altså skrive

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_i(\varphi_{i1}) &= (M_{i1}(\varphi_{i1}), M_{i2}(\varphi_{i1})) \\ \bar{\varphi}_i(\varphi_{i1}) &= (\varphi_{i1}, \varphi_{i2}(\varphi_{i1})) \end{aligned} \right\} \quad (4.1.3)$$

(4.1.2) får da formen

$$\begin{aligned} A_i(\varphi_{i1}) &= \int_{\varphi_{i1}=0}^{\varphi_{i1}} \bar{M}_i \cdot \frac{d\bar{\varphi}_i}{d\varphi_{i1}} d\varphi_{i1} \\ A_i(\varphi_{i1}) &= \int_{\varphi_{i1}=0}^{\varphi_{i1}} \left\{ M_{i1} + M_{i2} \frac{d\varphi_{i2}}{d\varphi_{i1}} \right\} d\varphi_{i1} \quad (4.1.4) \end{aligned}$$

Vi kan altså for et specifikt forsøg opfatte det indre arbejde A_i i hver af fugerne som funktion af bøjningsdeformationen φ_{i1} .

Vi definerer da for hver af fugerne den generaliserede*) spænding

*) Bemærk, at definitionerne, p.g.a. den inhomogene tøjningstilstand, afviger lidt fra hvad man almindeligvis forstår ved generaliserede spændinger og tøjninger.

$$\begin{aligned}\sigma_i^* &= \frac{1}{t^3} \cdot \frac{dA_i}{d\varphi_{i1}} \\ &= \frac{1}{t^3} M_{i1} + M_{i2} \frac{d\varphi_{i2}}{d\varphi_{i1}}\end{aligned}\quad (4.1.5)$$

Af ovenstående fremgår det da, at kurverne $(\varphi_{i1}, \sigma_i^*)$ kan opfattes som generaliserede arbejdskurver for de to fuger, d.v.s. at de med hensyn til de givne påvirkninger kan tolkes som arbejdskurven for et almindeligt enakset brudforsøg, blot med den ene forskel, at spændingen σ_i^* ikke har nogen direkte relation til de fysiske tilstedeværende spændinger i materialet.

Ud fra arbejdskurverne $(\varphi_{i1}, \sigma_i^*)$ kan det altså vurderes hvorvidt det er rimeligt at benytte en plasticitetsmodel på murværk som udsættes for brud på den ovenfor omtalte måde.

Hvis prøvemaskinen skal kunne reproducere brudforholdene i brudlinier, som danner vinklen θ med liggefugerne, så skal der om længderne på prøvemaskinens arme (se figur 4.1.1) gælde at

$$\frac{l_1}{l_2} = \tan\theta = \alpha \quad (4.1.6)$$

Såfremt disse arme, og prøvemaskinen i øvrigt kan regnes uendelig stiv, så må der for alle φ_{i1} gælde at

$$\frac{d\varphi_{i2}}{d\varphi_{i1}} = \alpha \quad (4.1.7)$$

d.v.s. at kurven $(\varphi_{i1}, \varphi_{i2})$ vil blive en ret linie med hældningsvinklen θ . Man kan altså ved at betragte kurven $(\varphi_{i1}, \varphi_{i2})$ for et specifikt forsøg, se i hvor stor udstrækning det er lykkedes at styre deformationerne som tilsig-

tet efter den rette linie $\varphi_{i2} = \alpha \cdot \varphi_{i1}$.

Brudegenskabernes afhængighed af materialeforholdene er undersøgt ved anvendelse af de samme materialekombinationer som blev anvendt for de i kapitel 3 omtalte trykforsøg, og der er anvendt de samme talkoder, se tabel 3.1.1. Desuden er undersøgt brudforholdenes afhængighed af normalkraften K_2 , og af tøjningsforholdet (brudliniehældningen) α . K_2 er varieret gennem 5 niveau'er, og α gennem 4 niveau'er; med 3 gentagelser for hver kombination giver det altså i alt $2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3 = 240$ forsøg

De 5 valgte niveau'er for K_2 er forskellige for de 4 materialekombinationer, idet niveau'erne er søgt valgt således, at

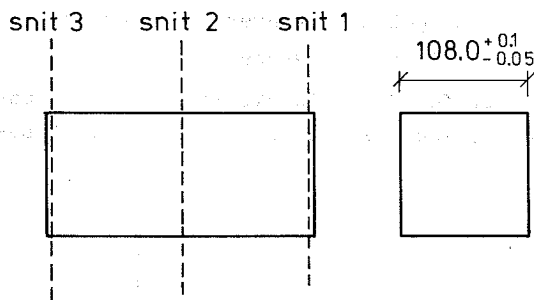
$$\left. \begin{aligned} K_{2,5} &\cong \frac{1}{4} K_C \\ K_{2,4} &\cong \frac{1}{8} K_C \\ K_{2,3} &\cong \frac{1}{16} K_C \\ K_{2,2} &\cong \frac{1}{32} K_C \\ K_{2,1} &\cong K_{2,\min} \end{aligned} \right\} (4.1.8)$$

hvor $K_{2,\min}$ vælges så lille som måleteknisk muligt, og K_C er trykbrudstyrken for de anvendte prøvelegemer. Niveau'erne for α er for alle materialekombinationerne valgt til

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 1.149 \\ \alpha_2 &= 0.940 \\ \alpha_3 &= 0.795 \\ \alpha_4 &= 0.689 \end{aligned} \right\} (4.1.9)$$

4.2. Prøvelegemernes fremstilling og lagring.

Prøvelegemerne blev sammenmuret af halve sten, som blev tildannet ved skæring i Afdelingens stensav på den på figur 4.2.1 viste måde.



Figur 4.2.1. Skæring af sten.

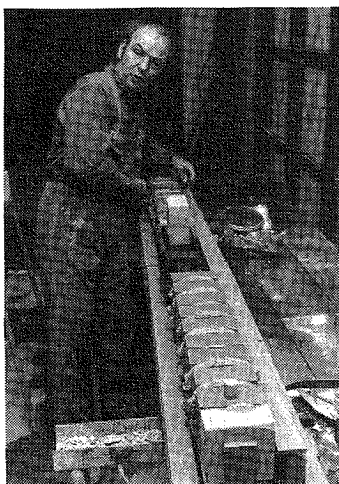
Af hensyn til prøvelegemernes anbringelse i den specielt udviklede prøveopstilling var det nødvendigt, at denne opskæring blev foretaget særdeles nøjagtigt. Skæring af de 3 i figur 4.2.1 viste parallelle snit blev foretaget i samme opspænding ved hjælp af et specielt til formålet udformet stykke opspændingsværktøj, og man opnåede herved, at der ud af en hel sten kunne skæres to halve sten, hver med to parallelle renskårne endeflader med afstanden 108.0 mm, således at tolerancerne på denne afstand blev + 0.10 mm - 0.05 mm.

Sammenmuringen blev foretaget på nogle til formålet fremstillede murerbænke af stål, således at stenene kunne

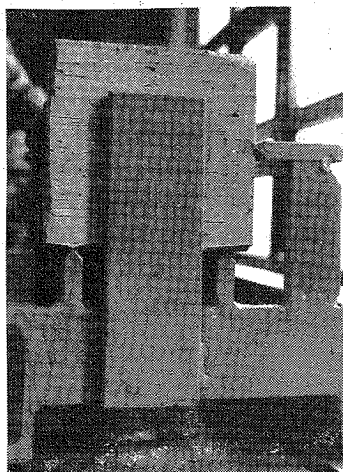
sammenmures så præcist som muligt, og dermed opnås en veldefineret prøvelegemegeometri. Sammenmuringen af de enkelte prøvelegemer er vist i figur 4.2.2 og 4.2.3. Stenene fixeres i forhold til hinanden i det lodrette plan ved at den ene af de renskårne endeflader ligger om mod to bearbejdede stålskinner, de fixeres i det vandrette plan ved hjælp af en enkelt stålskinne, og fugetykkelsen på 12 mm opnås ved anvendelse af afstandsholdere, som fjernes når fugerne er suget tilstrækkelig tørre. I øvrigt blev prøvelegemerne fremstillet og lagret helt svarende til de til trykforsøgene i kapitel 3 omtalte anvendte prøvelegemer, bortset fra, at lagringstiden var en hel del længere og varierende en del (ca. 170 - 210 døgn).

Prøvelegemerne lagredes således på pallerne, at luften kun havde direkte adgang til de to modstående flader som udgjordes af de renskårne endeflader for de enkelte sten.

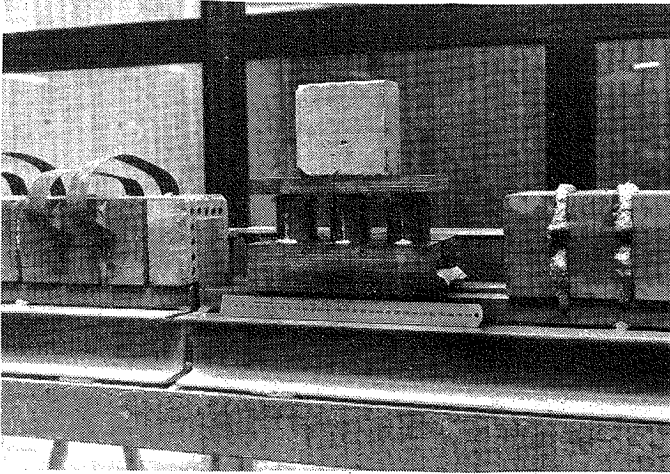
På hver palle lagredes i alt 12 prøvelegemer, 3 prøvelegemer for hver materialekombination, svarende til 4 forsøgstilfælde. Til bestemmelse af mørtelstyrken blev der til hver palle for hver af de to anvendte mørteltyper udstøbt 3 cylinderformede prøvelegemer (omtalt nærmere i kapitel 2), som lagredes sammen med murværksprøvelegemerne. Se figur 4.2.4, 4.2.5 og 4.2.6, som viser henholdsvis støbning af mørtelprøvelegemer, anbringelse af prøvelegemer på palle, samt de færdige prøvelegemers lagring.



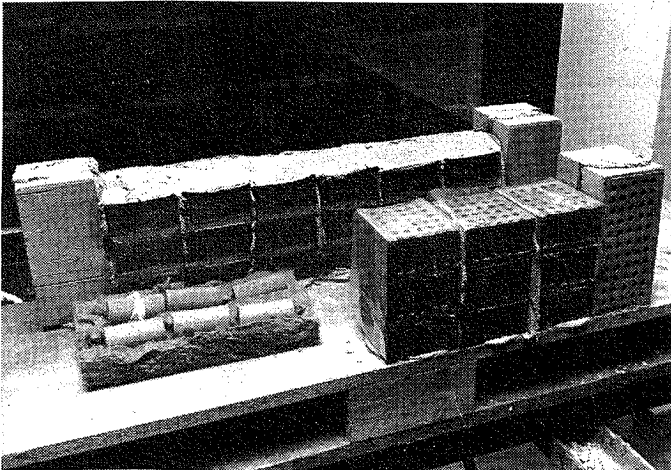
Figur 4.2.2. Muring af prøvelegemer på specielt udformede murerbænke.



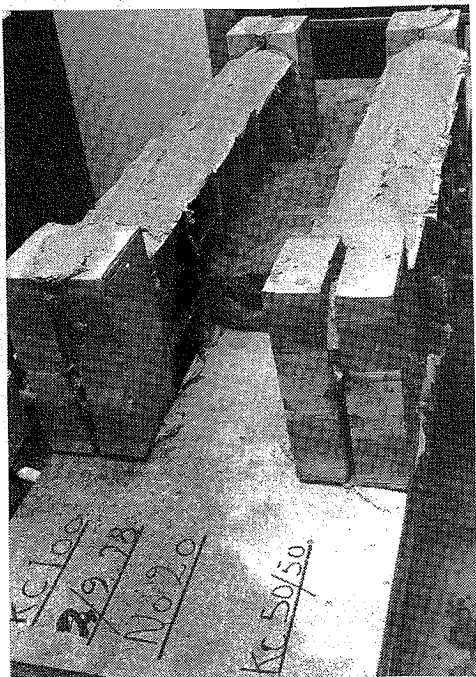
Figur 4.2.3. Nærbillede af murerbænk visende de bearbejdede stålskinner, som fixerer de enkelte sten.



Figur 4.2.4. Udstøbning af mørtelprøvelegemer.



Figur 4.2.5. Anbringelse af murværksprøvelegemer og mørtelprøvelegemer på palle.

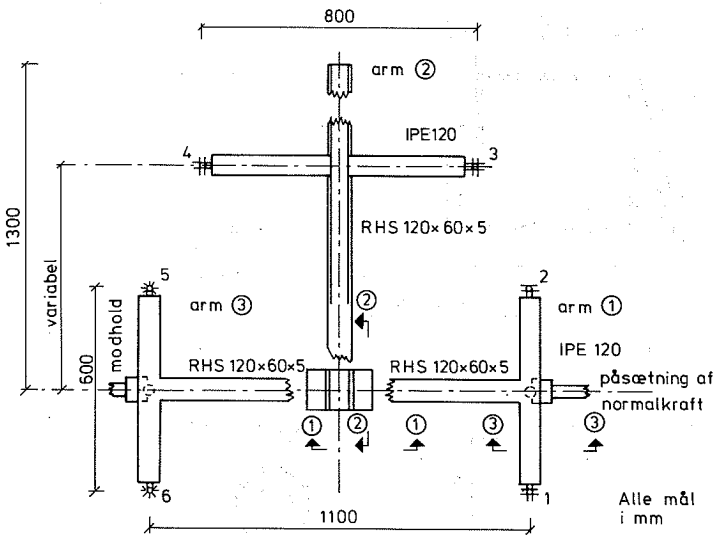


Figur 4.2.6. *Prøvelegemer til lagring.*

4.3. Opstilling og måleudstyr.

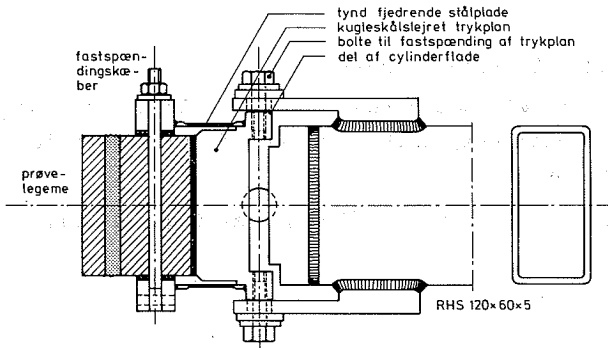
Der skal i det følgende gøres rede for valg af prøvemaskinens hovedgeometri, samt hvorledes de vigtigste detaljer er udformet.

Prøvemaskinens hovedgeometri fremgår af figur 4.3.1.

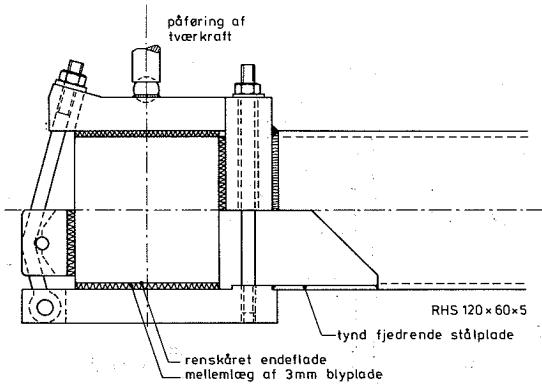


Figur 4.3.1. Prøvemaskinens hovedgeometri.

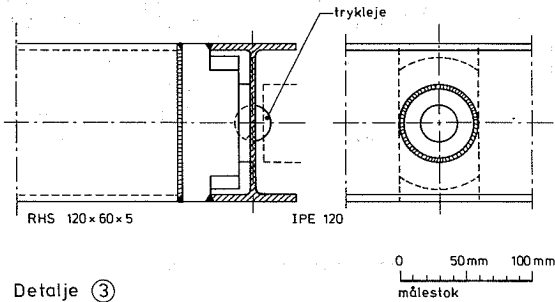
4.14



Detalje ①



Detalje ②



Detalje ③

Figur 4.3.2. Konstruktionsdetaljer 1, 2 og 3

Hver af de tre arme, 1, 2 og 3 er sammensat af et forlængerstykke, i hvilket prøvelegemet er indspændt og et tværstykke, som er understøttet simpelt i hver ende. Af de i afsnit 1 foretagne betragtninger fremgår det, at der i forlængerstykkerne vil optræde både vridende og bøjende momenter, og at der i tværstykkerne kun vil optræde bøjende momenter. Overfor disse påvirkninger skal armene være stive, de er derfor udformet som en svejst stålkonstruktion med forlængerstykkerne bestående af et lukket tyndfliget profil, et RHS 120 x 60 x 5 med den stærke akse i prøvemaskinens plan, og tværstykkerne bestående af et tyndfliget I-profil, et IPE 120 med den stærke akse i prøvemaskinens plan. Tværstykket på arm nr. 2 (se figur 4.3.1) kan forskydes således at understøtningsliniens afstand til prøvelegemet kan varieres, svarende til forskellige værdier for brudliniehældningen α . Samlingen foretages med en forspænding, således at tværstykket kan regnes effektivt indspændt i forlængerstykket under belastning.

Prøvemaskinen er undersøgt i de seks punkter 1, 2, ..., 6, se figur 4.3.1. Alle understøtningerne er simple understøtninger hvor bevægelser ud af prøvemaskinens plan er forhindret. Understøtningerne 5 og 6 er udformet som faste simple understøtninger, og understøtning 2 er udformet med mulighed for bevægelser i normalkraftens retning, hvorimod de øvrige understøtningspunkter frit kan bevæge sig i planen inden for visse grænser. Understøtningerne 5 og 6 er realiseret ved hjælp af 2 sfæriske glidelejer, stål mod bronze med lejepladediameter ≈ 19 mm. De øvrige understøtninger er realiseret ved hjælp af ca. 500 mm lange pendulstænger, som er anbragt lodret og dermed vinkelret på prøvemaskinens plan, og som både foroven er fast simpelt understøttet på den ydre konstruktion og for neden forbundet til prøvemaskinens understøtningspunkt

ved anvendelse af sfæriske glidelejer, stål mod teflon med lejepladediameter $\cong 16$ mm.

De centrale forsøgstekniske problemer i disse forsøg er imidlertid problemerne omkring indspænding af prøvelegemet i de tre arme, samt påføringen af belastningerne, som skal foretages således, at uønskede initialspændinger i prøvelegemet og tvangskræfter i opstillingen reduceres til et minimum. Der skal dog ikke her gåes nærmere ind på en diskussion og vurdering af disse ting, men blot vises de vigtigste løsninger, som har vist sig at fungere tilfredsstillende. Figur 4.3.2 viser i detalje 1 og 2 hvorledes fastspænding af prøvelegemet er foretaget, og i detalje 2 og 3 hvorledes tværkraft, henholdsvis normalkraft er påsat.

Detalje 2 i figur 4.3.1 viser hvorledes fastspænding af prøvelegemet i arm nr. 2 er foretaget. Det ses, at fastholdelsen af prøvelegemet i forhold til armen hovedsagelig er foretaget ved hjælp af friktionskræfter hvorved der opnås en meget stiv forbindelse mellem prøvelegeme og arm. Det ses, at samlingen er udformet således, at der kan overføres påvirkninger som i armens forlængerstykke giver anledning til vridningsmomenter med vilkårligt fortegn og bøjende momenter om en vandret akse, som giver træk i forlængerstykkets underflange, samt at samlingens stivhed er optimal med hensyn til overførelse af disse snitkræfter.

Ved fastgørelse af prøvelegemet i prøvemaskinen fastspændes prøvelegemet først i ovenfor nævnte fastspændingsanordning, hvorved prøvelegemets position i rummet er fastlagt bortset fra translationer i prøvemaskinens plan. De to øvrige fastspændingsanordninger må derfor udformes således, at trykplanerne til overførelse af normalkraften K_2 kan justeres ind efter de små vilkårlige vinkeldrejning-

ger af prøvelegemets endeflader i forhold til K_2 's normalplan, som er følgen af forskellige unøjagtigheder i opstilling og prøvelegemegeometri. Af detalje 1 i figur 4.3.1 fremgår det, at trykplanerne er udformet som kugleskålslejrede trykplaner med en friktionslås, således, at de i den låste tilstand kan overføre de nødvendige vridende og bøjende momenter. Friktionslåsen aktiveres ved tilspænding af 2 bolte foroven og 1 bolt forned, således at der kan overføres momenter om både en lodret og en vandret akse.

Selve fastspændingen sker også her ved hjælp af friktionskæber, som spænder på prøvelegemets over- og underside. Det ses, at samlingen udformet på denne måde er optimalt stiv overfor påvirkninger, som giver anledning til vridende og bøjende momenter i armenes forlængerstykke.

Prøvelegemets over- og underside udgøres af de renskårne stenendeflader, og de friktionskæber, som spænder på disse flader er forsynet med mellemlæg af 3 mm blyplade. De øvrige trykflader er forsynet med mellemlæg af 3,5 mm hård træfiberplade.

Helt afgørende for at nedbringe initialspændinger i prøvelegemet til et minimum er, at der ved fastspænding af prøvelegemet benyttes en med hensyn hertil hensigtsmæssig fastspændingsprocedure. Der skal i det følgende kort gøres rede for den procedure som syntes at være mest optimal, og som derfor er anvendt ved de udførte forsøg. Proceduren dels bekvemt op i 10 punkter som følger:

- 1) Prøvemaskinens 3 arme 1, 2 og 3 fixeres ved hjælp af nogle dertil indrettede fixeringsanordninger, således at de ikke kan dreje ud af planen, og desuden således, at centerlinien for arm 1's forlængerstykke ligger i normalkraftens angrebslinie og centerlinien

for arme 2's forlængerstykke står vinkelret herpå, men samtidig således at armen 1 frit kan forskydes i normalkraftens retning, og armen 2 frit (inden for visse grænser) kan forskydes i planen.

- 2) Prøvelegemet fastspændes i arm 2. Der er tale om en let tilspænding, således at der ikke er risiko for beskadigelse af prøvelegemet, men dog sådan at alle spændeflader ligger helt om og stramt mod prøvelegemets overflade. Prøvelegemet er nu bortset fra translationer i planen helt fixeret i rummet.
- 3) Idet der påsættes et helt minimalt normaltryk, $K_2 \cong 1 \text{ kN}$, anbringes prøvelegemets centerlinie i normalkraftens angrebslinie, og således at de to trykplaner ligger stramt og helt om mod prøvelegemets endeflader.
- 4) K_2 øges til en værdi som er den mindste af værdierne $K_{2,n}$ og $K_{2,0}$, hvor $K_{2,n}$, $n = 1, 2, \dots, 5$ er den aktuelle værdi af normalkraften, se udtryk (4.1.8), og hvor $K_{2,0}$ er bestemt som den maximale kraft det er forsvarligt at sætte på systemet under de givne omstændigheder, de forskellige muligheder for stabilitetskollaps taget i betragtning. Værdien $K_{2,0}$ er bestemt til $K_{2,0} = 20 \text{ kN}$.
- 5) Venstre (d.v.s. hørende til arm 3) trykplan låses.
- 6) De under pkt. 1) omtale fixeringsanordninger fjernes.
- 7) Oplastning til aktuelt niveau af K_2 , kun såfremt $K_{2,n} > K_{2,0}$ (se under pkt. 4)).
- 8) Højre (d.v.s. hørende til arm 1) trykplan låses.
- 9) Alle endnu helt uspændte anordninger til fastspænding af selve prøvelegemet spændes let.
- 10) Alle anordninger til fastspænding af prøvelegemerne spændes grundtigt op til et niveau, som er fastlagt

således, at prøvelegemet for det aktuelle forsøgstilfælde gennem hele forsøget, er fastholdt mod glidningen i spændingsanordningerne, men samtidig således, at spændingsanordningerne ikke giver anledning til beskadigelse af prøvelegemet.

Påføring af tryknormalkraften K_2 sker som vist i detalje 3 figur 4.3.2 ved anvendelse af et sfærisk leje med lejepladediameter = 25 mm. Kraften påføres ved arm 1, og optages af et symmetrisk anbragt og udformet modholdsarrangement ved arm 3. Modholdet er udformet meget stift og samtidigt med en vis forspænding, således at optagelsen af normalkraften kun i yderste ringe grad sker i understøtningspunkterne 5 og 6. Lejepladernes centrum er anbragt i forbindelseslinien mellem understøtningerne 1 og 2 henholdsvis 5 og 6, med en total tolerance på 0.05 mm, således at uønskede tvangskræfter ved drejninger af armene 1 og 2 er reduceret til et minimum. Lejepladerne blev smurt med Molykote.

Påførelse af tværkraften K_1 sker ligeledes som vist i detalje 2 figur 4.3.2 ved anvendelse af et sfærisk leje her med lejepladediameter = 16 mm. Som smøremiddel blev der her anvendt et mellemlag af tynd teflonfolie.

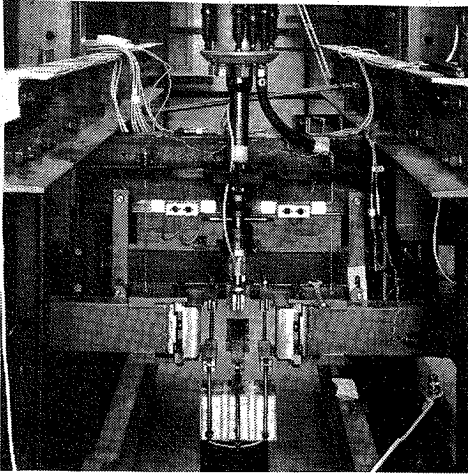
De ovenfor omtalte tryklejer blev alle tildannet ved nedpresning af en kuglelejekugle af hårdet stål i en plade af blødt stål. Herved opnåedes en perfekt tilpasning af lejepladerne mod hinanden, og desuden p.g.a. den kraftige tøjningshårdning og gunstige spændingstilstand, at lejerne havde en bæreevne svarende til en jævnt fordelt trykspænding på ca. 5 gange flydespændingen for det anvendte bløde stål.

Tryklejerne kunne, da maximalværdierne for K_1 og K_2 ligger på henholdsvis ca. 10 kN og 50 kN, derfor på grund-

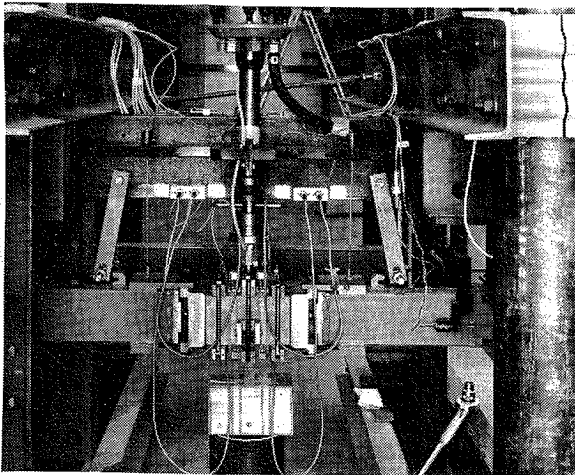
lag af bæreevnebetrægtninger alene, være givet betydeligt mindre dimensioner. Det er dog tvivlsomt, om dette ville nedsætte friktionsmomenterne i lejerne, da større lejetryk vil øge tendensen til fortrængning af smøremidlet, og dermed øge friktionen. Ved så store lejetryk kan mellemlæg af teflonfolie f.eks. ikke anvendes, da folien simpelthen trykkes i stykker.

Hele prøvemaskinen er i øvrigt ophængt i en ydre (stor og drabelig) konstruktion, som er opbygget på Afdelingens spændeplan af det dertil beregnede standard spændepansudstyr. Figurerne 4.3.3 - 4.3.6 viser fotos af detaljer i opstillingen, samt af opstillingens helhed.

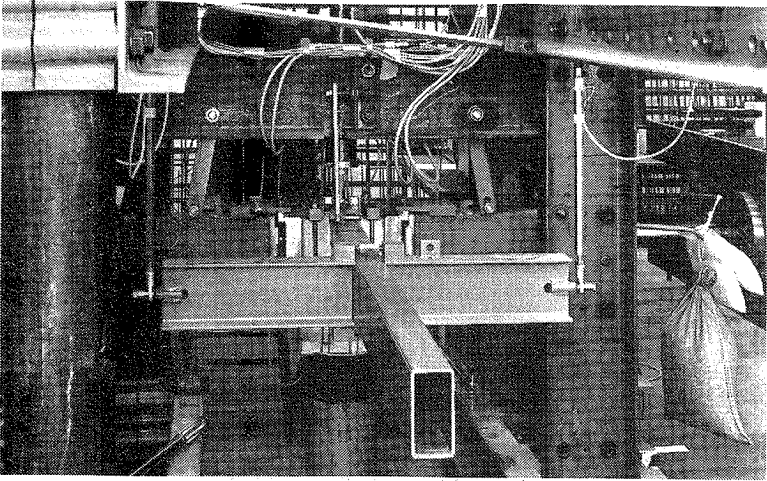
Tværkraften K_1 og normalkraften K_2 påsættes begge med en 50 kN Amsler EPZ 5/2.5 hydraulisk presse. Olietrykket til den vandrette presse (på sætter K_2) styres af en Amsler trykholderenhed og måles med en HBM olietrykstransducer type P3M/500. Under forsøget måles løbende den lodrette flytning δ_1 , som regnes positiv nedad, af prøvelegemet i forhold til prøvemaskinens plan, og olietrykket til den lodrette presse (på sætter K_1) styres da ved hjælp af afdelingens Amsler servopacer, således at deformationshastigheden $d\delta_1/dt$ tilstræbes konstant. Olietrykket måles også her ved hjælp af en HBM, P3M/500 olietrykstransducer. De forskellige enheder til styring af belastningerne er vist på figur 4.3.7.



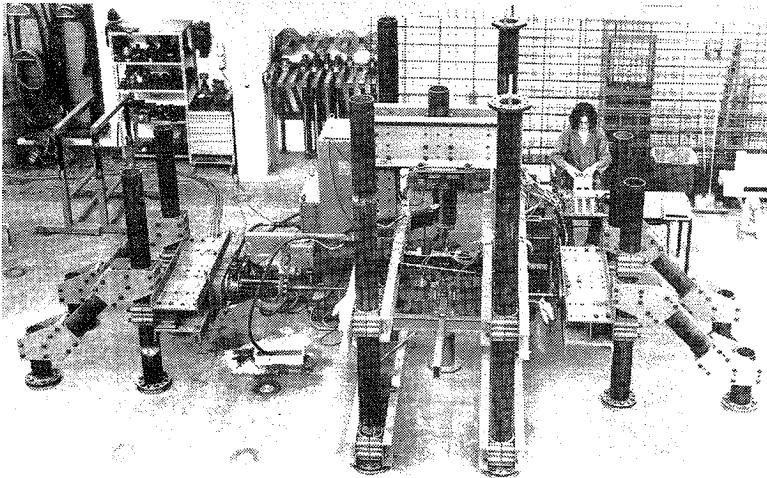
Figur 4.3.3. Prøvemaskine til forsøg med kombineret vridning og bøjning.



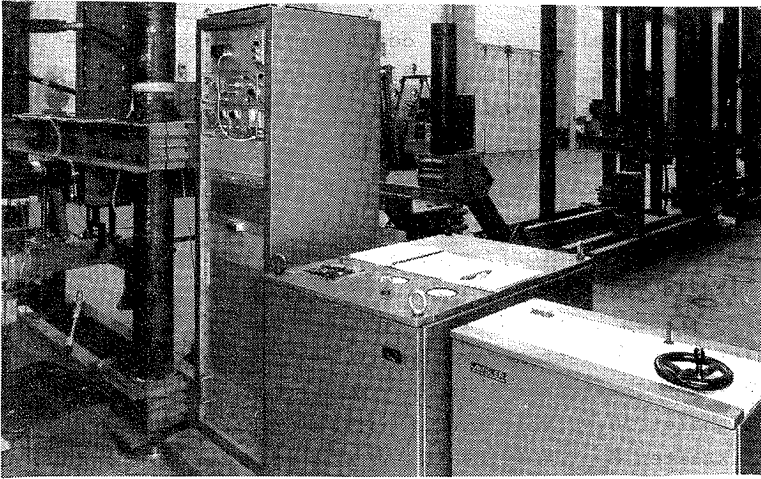
Figur 4.3.4. Prøvemaskine med monteret prøvelegeme. Bemærk de fire ekstensometre, som er pålimet prøvelegemets over- og underside.



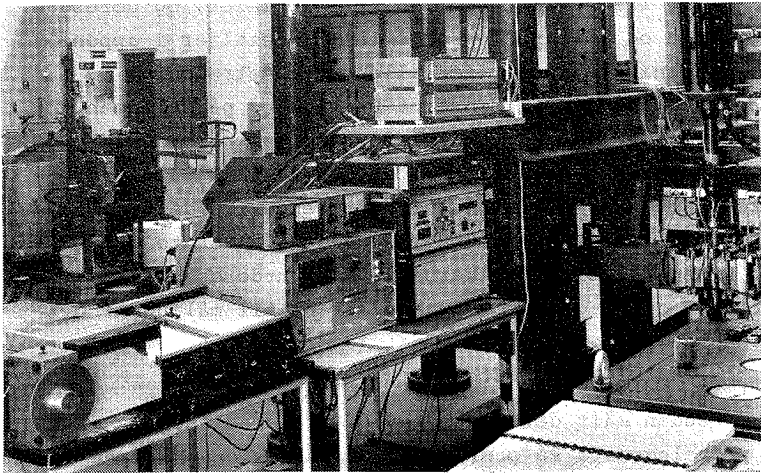
Figur 4.3.5. Prøvemaskine set bagfra. Man ser arm 2 med det forskydelige tværstykke og de to pendulstænger.



Figur 4.3.6. Opstillingens helhed set bagfra og fra oven.



*Figur 4.3.7. Belastningsudstyr. Fra højre trykholderen-
 enhed, pumpeenhed til servopacer og sty-
 repunkt til servopacer.*



*Figur 4.3.8. Udstyr til registrering og opsamling
 af data.*

Der er i forbindelse med de i dette kapitel omtalte forsøg foretaget ret omfattende målinger for hvilke der i det følgende kort skal gøres rede.

Der er ved hvert forsøg målt forløbet af belastningerne K_1 og K_2 og af reaktioner R_{11} , R_{12} , R_{21} og R_{22} , se figur 4.1.2. Målingen af K_2 er foretaget ud fra måling af olietrykket (se ovenfor), hvorimod de øvrige kræfter er målt direkte ved hjælp af indskudte dynamometre (olietryksmålingen på den lodrette presse anvendes kun til styring). Signalerne fra olietrykstransducere til måling af K_1 og K_2 blev hver forstærket i en forstærker, således at udgangssignalet 10.00 volt svarer til fuldt olietryk svarende til kraften $K_{\max} = 49.04$ kN. Måling af K_1 er foretaget ved at indskyde et dynamometer mellem presse og prøvelegeme, og måling af reaktionerne er foretaget ved at indskyde et dynamometer i hver af de fire pendulstænger umiddelbart under det øverste kugleled. De fem anvendte dynamometre blev fremstillet specielt til formålet, og deres konstruktion og kalibrering er omtalt i detaljer i appendix C. Opløsningsevnen er for alle dynamometre ca. 1 N, som må betragtes som en konstant usikkerhed på målingen. Herudover er der tale om en relativ måleusikkerhed hidrørende hovedsagelig fra ulinearitet, usikkerhed på kalibreringskonstanten og fra signaler hidrørende fra de bøjende momenter som påføres dynamometrene ved de anvendte glidelejer. Disse relative usikkerheder kan vurderes til at være totalt ca. 5 o/oo for dynamometrene til måling af relationerne R_{11}, \dots, R_{22} og til ca. 10 o/oo for dynamometrene til måling af tværkraften K_1 .

Der er desuden målt deformationer af prøvemaskinen og af selve prøvelegemet. På prøvemaskinen målt dels armene 1 og 3's gennemsnitlige lodrette flytninger δ , i forhold til det plan som bestemmes af linierne der forbinder un-

derstøtningerne 1 og 2 henholdsvis 5 og 6, og den vandrette flytning δ_2 af de to linier i forhold til hinanden. δ_1 regnes positiv nedad i K_1 's retning og δ_2 regnes positivt som afstandsforøgelse, d.v.s. modsat K_2 's positive retning. Deformationerne δ_1 og δ_2 målttes hver med 2 HP 7-DCDT-100 transducere som er nummereret og kalibreret med de i tabel 4.3.1 angivne resultater.

Tabel 4.3.1.

Kalibrering og nummerering af transducere til måling af deformationen δ_1 og δ_2 .

Deformationsmåling	transducer nr.	Kalibreringskonstant (mm/volt)
δ_1	1	0.7488
	2	0.7433
δ_2	3	0.7606
	4	0.7628

Deformationerne af selve prøvelegemet blev målt med 4 to-komponentekstensometre, som blev pålimet prøvelegemets over- og underside, således at de i afsnit 1 omtalte indbyrdes vinkeldrejninger φ_{ij} af stenene kunne bestemmes, se figur 4.3.4. Desuden kunne på grundlag af disse målinger bestemmes de til deformationerne φ_{ij} svarende nullinieafstande x_{ij} defineret som den afstand fra prøvelegemets overside (regnet positivt nedad) hvor drejningsak-

sen for drejninger φ_{ij} kunne beregnes at ligge.

Disse ekstensometre som blev fremstillet specielt til dette formål, er med hensyn til måleprincip, konstruktion og kalibrering udførligt omtalt i appendix B.

Det fremgår heraf, at de forskellige målinger er koblet på en ikke helt simpel måde hvorfor både kalibrering og måling med disse ekstensometre i disse forsøg er relativt kompliceret. I det der ved fortolkning af disse målinger imidlertid er taget alle de beregningsmæssige hensyn som det har været muligt, se appendix B afsnit 7, skønnes den proportionale usikkerhed (relative usikkerhed) på måling af deformationerne φ_{ij} at være ca. 2-3%, og opløsningsevnen til ca. 10^{-5} radian = 0.01 o/oo.

Registrering og dataopsamling blev foretaget dels ved en samtidig udtegnning af kurven (σ_1, K_1) til overvågning af om forsøget forløber planmæssigt, samt ved en digital registrering ved hjælp af Afdelingens Solartron scanner anlæg, som løbende under forsøget punchedede alle data ud på hulstrimmel, se figur 4.3.8.

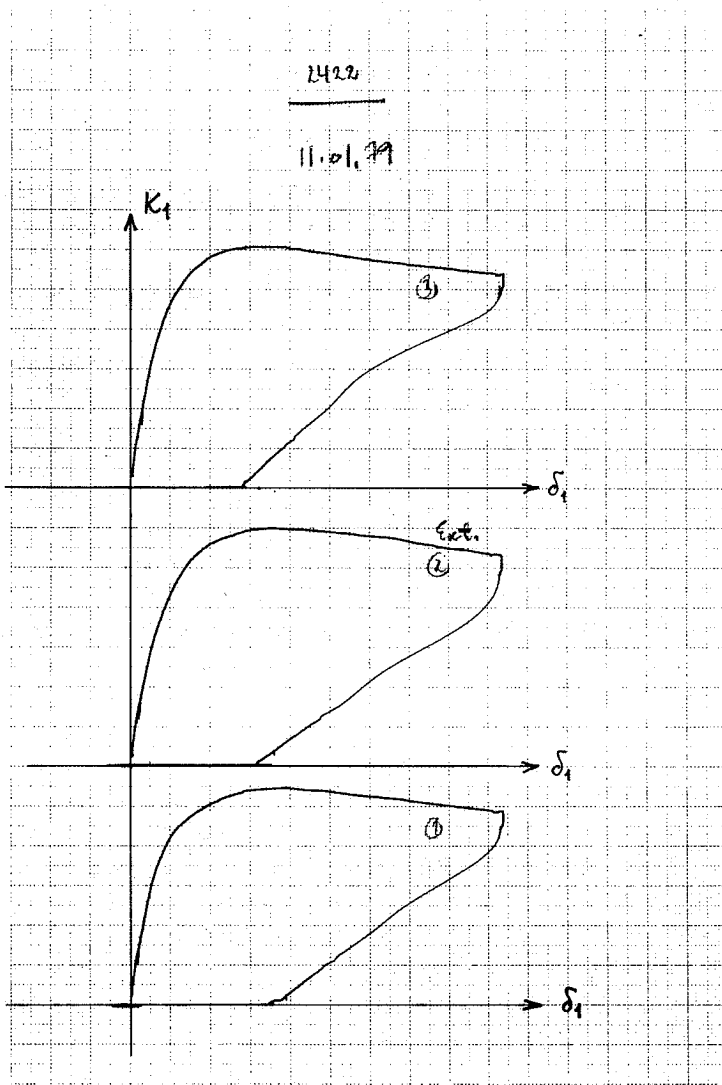
4.4. Databearbejdning.

Databearbejdningen er udelukkende baseret på de på hulstrimmel udpunchede data suppleret med enkelte manuelt i målebog noterede hovedoplysninger, idet de ved de samtidige udtegnede kurver repræsenterede data kun er benyttet som en kontrol under selve forsøget af om dette forløb planmæssigt. Figur 4.4.1 viser de tre samtidigt udtegnede kurver (σ_1, K_1) for forsøgstilfældene 2422.1, 2422.2 og 2422.3. I tilfælde 2422.2 er der foretaget målinger med ekstensometre, og de på hulstrimmel udpunchede data er for dette forsøg vist i tabel 4.4.1. Datafilen består i dette tilfælde af 21 scan, som hvert består af

en tidsmåling og en derefter følgende række målinger, som omtalt tidligere i kapitel 3 afsnit 4 under omtale af databehandling af data fra trykforsøg. Som det ses foretages der i hver scan foruden tidsmålingen, måling på 40 kanaler nummereret fra 50 til 89.

På kanal 50 og 51 måles henholdsvis forsyningsspændingen V_1 som skal være ca. 2.00 volt (forsyner ekstensometre). På kanal 052 måles signalet efter forstærkning fra olie-trykstransducer til måling af K_1 og på kanal 053 måles signalet (efter forstærkning) fra transducer til måling af K_2 . På kanal 54 måles signalerne fra transducerne 1 og 2 til måling af δ_1 , idet de er lagt sammen analogt og givet en forstærkning, som kan varieres fra forsøg til forsøg, i dette valgt således, at fuldt udslag = 10.00 volt svarer til en flytning af begge transducere på 3.876 mm. På kanalerne 55 og 56 måles signalerne fra henholdsvis transducer 3 og 4 til måling af deformationen δ_2 , og på kanalerne 57 til 60 måles signalerne fra de fire dynamometre 1, 2, 3 og 4 til måling af reaktionerne R_{11} , R_{12} , R_{21} og R_{22} . På kanalerne 61 til 68 måles de otte signaler fra de fire benyttede ekstensometre i rækkefølgen u_{A11} , u_{A12} , u_{B11} , u_{B12} , u_{A21} , u_{A22} , u_{B21} og u_{B22} , idet der benyttes de i appendix B afsnit 7 introducerede betegnelser. På kanal 69 og 70 måles signalerne fra de to strainingaugebroer på dynamometret til måling af K_1 , hvorefter alle de øvrige ovenfor omtalte målinger gentages i modsat rækkefølge. Herved opnås, ved midling af de to gange i samme scan målte størrelser, tilnærmet at henføre alle målinger i samme scan til samme tidspunkt, hvorved unøjagtigheden hidrørende fra ikke samtidighed af målingerne reduceres.

Hulstrimlerne for hvert enkelt forsøg indlæstes i Afdelingens PDP-8 minicomputer, og databehandlingen foreto-



Figur 4.4.1. Samtidige udtegninger for tilfælde 2422.

Tabel 4.4.1.

Rådatafil for tilfælde 2422.2.
Listning af hulstrimmel.

*103116									
050+020073	5	051+060003	5	052-019524	3	053+025134	5	054+017347	4
055-041599	4	056-017930	4	057-000011	3	058+000006	3	059+000005	3
060-000007	3	061+000009	3	062-000005	3	063+000006	3	064+000004	3
065+000010	3	066+000009	3	067+000007	3	068-000006	3	069+000522	3
070+000417	3	071-000005	3	072+000009	3	073+000011	3	074+000009	3
075+000003	3	076+000005	3	077-000004	3	078+000008	3	079-000007	3
080+000004	3	081+000006	3	082-000012	3	083-017929	4	084-041595	4
085+017380	4	086+025124	5	087-019594	3	088+060003	5	089+020073	5
*103339									
050+020073	5	051+060004	5	052+005405	3	053+025115	5	054+019702	4
055-041988	4	056-018471	4	057+000008	3	058+000016	3	059+000012	3
060-000001	3	061+000015	3	062-000002	3	063+000003	3	064+000005	3
065+000011	3	066+000015	3	067+000007	3	068-000009	3	069+000553	3
070+000468	3	071-000009	3	072+000005	3	073+000014	3	074+000014	3
075+000009	3	076+000001	3	077-000002	3	078+000017	3	079+000020	3
080+000032	3	081+000041	3	082+000077	3	083-018475	4	084-042022	4
085+029239	4	086+025126	5	087+087450	3	088+060004	5	089+020073	5
*103356									
050+020073	5	051+060004	5	052+102792	3	053+025133	5	054+032995	4
055-042047	4	056-018473	4	057+000137	3	058+000069	3	059+000070	3
060+000062	3	061+000026	3	062+000000	3	063-000015	3	064+000010	3
065+000024	3	066+000011	3	067-000006	3	068-000015	3	069+000785	3
070+000683	3	071-000013	3	072-000005	3	073+000012	3	074+000024	3
075+000011	3	076-000015	3	077+000001	3	078+000026	3	079+000060	3
080+000071	3	081+000070	3	082+000154	3	083-018469	4	084-042068	4
085+035705	4	086+025123	5	087+110544	3	088+060005	5	089+020073	5
*103413									
050+020073	5	051+060005	5	052+148478	3	053+025144	5	054+043422	4
055-042090	4	056-018456	4	057+000243	3	058+000101	3	059+000109	3
060+000100	3	061+000032	3	062+000002	3	063-000029	3	064+000015	3
065+000030	3	066+000010	3	067-000016	3	068-000021	3	069+000886	3
070+000788	3	071-000022	3	072-000018	3	073+000008	3	074+000032	3
075+000015	3	076-000040	3	077+000003	3	078+000038	3	079+000130	3
080+000143	3	081+000122	3	082+000331	3	083-018455	4	084-042085	4
085+059151	4	086+025124	5	087+023458	4	088+060007	5	089+020073	5
*103429									
050+020073	5	051+060007	5	052+024604	4	053+025122	5	054+064260	4
055-042087	4	056-018452	4	057+000387	3	058+000136	3	059+000177	3
060+000165	3	061+000045	3	062+000006	3	063-000054	3	064+000023	3
065+000041	3	066+000006	3	067-000037	3	068-000032	3	069+001049	3
070+000949	3	071-000030	3	072-000039	3	073+000005	3	074+000044	3
075+000026	3	076-000066	3	077+000009	3	078+000053	3	079+000192	3
080+000208	3	081+000148	3	082+000459	3	083-018398	4	084-042085	4
085+079634	4	086+025122	5	087+031226	4	088+060007	5	089+020073	5
*103445									
050+020073	5	051+060007	5	052+032179	4	053+025134	5	054+084884	4
055-042046	4	056-018307	4	057+000507	3	058+000154	3	059+000240	3
060+000223	3	061+000059	3	062+000011	3	063-000090	3	064+000035	3
065+000052	3	066+000001	3	067-000057	3	068-000044	3	069+001180	3
070+001080	3	071-000042	3	072-000060	3	073+000000	3	074+000054	3
075+000039	3	076-000098	3	077+000014	3	078+000067	3	079+000247	3
080+000268	3	081+000156	3	082+000564	3	083-017944	4	084-041725	4
085+100213	4	086+025139	5	087+037271	4	088+060004	5	089+020073	5
*103501									
050+020073	5	051+060004	5	052+037992	4	053+025124	5	054+105420	4
055-041567	4	056-017723	4	057+000600	3	058+000157	3	059+000296	3
060+000273	3	061+000076	3	062+000018	3	063-000122	3	064+000051	3
065+000061	3	066-000003	3	067-000078	3	068-000059	3	069+001278	3
070+001178	3	071-000058	3	072-000080	3	073-000007	3	074+000063	3
075+000055	3	076-000133	3	077+000019	3	078+000080	3	079+000293	3

Tabel 4.4.1.

fortsat.

080+000322	3	081+000154	3	082+000644	3	083-017327	4	084-041234	4
085+120692	4	086+025121	5	087+041906	4	088+060002	5	089+020073	5
*103517									
050+020073	5	051+060003	5	052+042514	4	053+025131	5	054+125912	4
055-041064	4	056-017086	4	057+000674	3	058+000151	3	059+000348	3
060+000316	3	061+000091	3	062+000023	3	063-000162	3	064+000068	3
065+000070	3	066-000009	-3	067-000100	3	068-000074	3	069+001359	3
070+001259	3	071-000074	3	072-000103	3	073-000012	3	074+000075	3
075+000077	3	076-000181	3	077+000026	3	078+000099	3	079+000344	3
080+000384	3	081+000140	3	082+000731	3	083-016125	4	084-040094	4
085+148415	4	086+025133	5	087+047151	4	088+060005	5	089+020073	5
*103533									
050+020073	5	051+060004	5	052+047953	4	053+025120	5	054+015860	5
055-039402	4	056-015278	4	057+000774	3	058+000124	3	059+000426	3
060+000383	3	061+000116	3	062+000034	3	063-000239	3	064+000106	3
065+000087	3	066-000020	3	067-000148	3	068-000119	3	069+001470	3
070+001371	3	071-000122	3	072-000154	3	073-000021	3	074+000090	3
075+000117	3	076-000264	3	077+000040	3	078+000126	3	079+000407	3
080+000462	3	081+000105	3	082+000822	3	083-136769	3	084-037598	4
085+018903	5	086+025134	5	087+051753	4	088+060002	5	089+020074	5
*103549									
050+020074	5	051+060002	5	052+052271	4	053+025131	5	054+019889	5
055-036707	4	056-126944	3	057+000848	3	058+000091	3	059+000491	3
060+000430	3	061+000142	3	062+000049	3	063-000330	3	064+000158	3
065+000104	3	066-000034	3	067-000201	3	068-000175	3	069+001538	3
070+001437	3	071-000180	3	072-000207	3	073-000037	3	074+000108	3
075+000173	3	076-000352	3	077+000054	3	078+000151	3	079+000444	3
080+000512	3	081+000077	3	082+000878	3	083-110004	3	084-034715	4
085+022931	5	086+025114	5	087+054455	4	088+060003	5	089+020074	5
*103605									
050+020074	5	051+060003	5	052+054713	4	053+025113	5	054+023919	5
055-033715	4	056-098913	3	057+000892	3	058+000069	3	059+000530	3
060+000454	3	061+000168	3	062+000064	3	063-000419	3	064+000228	3
065+000122	3	066-000049	3	067-000255	3	068-000243	3	069+001572	3
070+001471	3	071-000248	3	072-000261	3	073-000052	3	074+000125	3
075+000253	3	076-000449	3	077+000069	3	078+000179	3	079+000456	3
080+000541	3	081+000068	3	082+000899	3	083-079532	3	084-031553	4
085+026957	5	086+025123	5	087+055875	4	088+060003	5	089+020073	5
*103621									
050+020073	5	051+060004	5	052+056046	4	053+025115	5	054+027988	5
055-030543	4	056-067487	3	057+000907	3	058+000071	3	059+000558	3
060+000463	3	061+000199	3	062+000085	3	063-000529	3	064+000328	3
065+000141	3	066-000070	3	067-000323	3	068-000327	3	069+001605	3
070+001504	3	071-000339	3	072-000334	3	073-000073	3	074+000145	3
075+000364	3	076-000577	3	077+000094	3	078+000217	3	079+000466	3
080+000575	3	081+000073	3	082+000913	3	083-035242	3	084-026598	4
085+032925	5	086+025124	5	087+057324	4	088+060005	5	089+020074	5
*103637									
050+020074	5	051+060005	5	052+057491	4	053+025130	5	054+034531	5
055-024671	4	056-017106	3	057+000915	3	058+000074	3	059+000577	3
060+000465	3	061+000244	3	062+000115	3	063-000676	3	064+000466	3
065+000166	3	066-000100	3	067-000436	3	068-000457	3	069+001619	3
070+001517	3	071-000466	3	072-000452	3	073-000101	3	074+000171	3
075+000503	3	076-000719	3	077+000129	3	078+000262	3	079+000462	3
080+000576	3	081+000085	3	082+000904	3	083+016177	3	084-020284	4
085+039445	5	086+025131	5	087+057532	4	088+060006	5	089+020074	5
*103653									
050+020074	5	051+060006	5	052+057436	4	053+025112	5	054+041061	5
055-018354	4	056+035174	3	057+000893	3	058+000099	3	059+000570	3
060+000453	3	061+000287	3	062+000152	3	063-000815	3	064+000619	3
065+000193	3	066-000124	3	067-000561	3	068-000594	3	069+001610	3

Tabel 4.4.1.

070+001509	3	071-000600	3	072-000575	3	073-000130	3	074+000199	3
075+000661	3	076-000853	3	077+000165	3	078+000308	3	079+000446	3
080+000565	3	081+000115	3	082+000878	3	083+066674	3	084-141338	3
085+045984	5	086+025111	5	087+057179	4	088+060007	5	089+020074	5
*103709									
050+020074	5	051+060006	5	052+057101	4	053+025131	5	054+047581	5
055-122080	3	056+085774	3	057+000866	3	058+000133	3	059+000555	3
060+000435	3	061+000334	3	062+000189	3	063-000947	3	064+000783	3
065+000223	3	066-000158	3	067-000688	3	068-000733	3	069+001602	3
070+001499	3	071-000741	3	072-000702	3	073-000161	3	074+000231	3
075+000823	3	076-000988	3	077+000200	3	078+000350	3	079+000426	3
080+000545	3	081+000153	3	082+000847	3	083+119205	3	084-077889	3
085+052511	5	086+025130	5	087+056657	4	088+060008	5	089+020074	5
*103725									
050+020074	5	051+060008	5	052+056543	4	053+025133	5	054+054094	5
055-058695	3	056+137963	3	057+000839	3	058+000167	3	059+000534	3
060+000415	3	061+000377	3	062+000222	3	063-001081	3	064+000944	3
065+000257	3	066-000186	3	067-000817	3	068-000874	3	069+001591	3
070+001488	3	071-000883	3	072-000833	3	073-000192	3	074+000264	3
075+000989	3	076-001119	3	077+000232	3	078+000394	3	079+000407	3
080+000526	3	081+000181	3	082+000825	3	083+017280	4	084-013820	3
085+059053	5	086+025125	5	087+055953	4	088+060007	5	089+020074	5
*103741									
050+020074	5	051+060007	5	052+055863	4	053+025120	5	054+060597	5
055+005407	3	056+019228	4	057+000817	3	058+000191	3	059+000515	3
060+000395	3	061+000421	3	062+000253	3	063-001212	3	064+001105	3
065+000288	3	066-000217	3	067-000949	3	068-001025	3	069+001576	3
070+001474	3	071-001032	3	072-000967	3	073-000223	3	074+000292	3
075+001148	3	076-001251	3	077+000263	3	078+000439	3	079+000388	3
080+000509	3	081+000198	3	082+000806	3	083+022594	4	084+049953	3
085+065592	5	086+025121	5	087+055333	4	088+060007	5	089+020074	5
*103758									
050+020073	5	051+060007	5	052+055241	4	053+025137	5	054+067493	5
055+072056	3	056+024715	4	057+000800	3	058+000205	3	059+000500	3
060+000376	3	061+000470	3	062+000286	3	063-001350	3	064+001276	3
065+000317	3	066-000245	3	067-001091	3	068-001184	3	069+001560	3
070+001458	3	071-001195	3	072-001107	3	073-000250	3	074+000323	3
075+001317	3	076-001390	3	077+000298	3	078+000490	3	079+000364	3
080+000488	3	081+000211	3	082+000788	3	083+028118	4	084+116824	3
085+072489	5	086+025112	5	087+054179	4	088+060008	5	089+020074	5
*103815									
050+020074	5	051+060006	5	052+053895	4	053+025121	5	054+074368	5
055+137973	3	056+030128	4	057+000782	3	058+000214	3	059+000472	3
060+000343	3	061+000524	3	062+000320	3	063-001499	3	064+001443	3
065+000340	3	066-000272	3	067-001231	3	068-001364	3	069+001534	3
070+001432	3	071-001373	3	072-001246	3	073-000278	3	074+000344	3
075+001482	3	076-001539	3	077+000332	3	078+000542	3	079+000333	3
080+000465	3	081+000215	3	082+000773	3	083+033328	4	084+018087	4
085+079279	5	086+025128	5	087+053033	4	088+060005	5	089+020074	5
*103831									
050+020073	5	051+060004	5	052+052910	4	053+025120	5	054+080800	5
055+019734	4	056+034853	4	057+000771	3	058+000214	3	059+000457	3
060+000321	3	061+000575	3	062+000353	3	063-001628	3	064+001593	3
065+000358	3	066-000291	3	067-001358	3	068-001522	3	069+001515	3
070+001413	3	071-001534	3	072-001374	3	073-000293	3	074+000358	3
075+001631	3	076-001668	3	077+000366	3	078+000599	3	079+000312	3
080+000456	3	081+000212	3	082+000763	3	083+037790	4	084+023751	4
085+085596	5	086+025130	5	087+052197	4	088+060006	5	089+020073	5
*103847									
050+020073	5	051+060006	5	052+052109	4	053+025125	5	054+087151	5
055+025418	4	056+039212	4	057+000759	3	058+000206	3	059+000458	3
060+000301	3	061+000635	3	062+000389	3	063-001767	3	064+001735	3
065+000371	3	066-000305	3	067-001478	3	068-001675	3	069+001499	3
070+001377	3	071-001686	3	072-001491	3	073-000308	3	074+000372	3
075+001771	3	076-001807	3	077+000402	3	078+000662	3	079+000294	3
080+000462	3	081+000192	3	082+000753	3	083+041453	4	084+028997	4
085+091889	5	086+025115	5	087+051238	4	088+060010	5	089+020074	5

Tabel 4.4.2.

TABEL TYPE 1 FOR FORSØEGSTILFAELDE 2422.2.
 FORSØEG STARTET D. 11. 1.79. KL. 10.31.

LOKAL KLOKKE	LOKAL TID	K1 (KN)	K2 (KN)	DE1 (MM)	DE2 (MM)	R11 (KN)	R12 (KN)	R21 (KN)	R22 (KN)
0. 0	0	0.000	12.32	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.23	143	0.104	12.32	0.028	-0.004	0.048	0.019	0.016	0.014
2.40	160	0.668	12.32	0.066	-0.004	0.140	0.053	0.059	0.059
2.57	177	0.928	12.33	0.131	-0.004	0.266	0.088	0.108	0.106
3.13	193	1.337	12.32	0.212	-0.004	0.388	0.114	0.168	0.162
3.29	209	1.668	12.33	0.291	-0.002	0.488	0.124	0.223	0.211
3.45	225	1.916	12.32	0.371	0.002	0.565	0.125	0.272	0.253
4. 1	241	2.120	12.32	0.464	0.009	0.637	0.117	0.322	0.294
4.17	257	2.402	12.32	0.606	0.025	0.722	0.091	0.392	0.350
4.33	273	2.571	12.32	0.763	0.046	0.780	0.065	0.443	0.387
4.49	289	2.657	12.32	0.919	0.068	0.809	0.052	0.474	0.403
5. 5	305	2.741	12.32	1.113	0.098	0.822	0.055	0.501	0.411
5.21	321	2.775	12.32	1.366	0.141	0.822	0.061	0.510	0.410
5.37	337	2.753	12.31	1.620	0.184	0.800	0.084	0.502	0.398
5.53	353	2.730	12.32	1.872	0.228	0.774	0.114	0.487	0.381
6. 9	369	2.702	12.32	2.125	0.272	0.752	0.140	0.469	0.364
6.25	385	2.666	12.32	2.378	0.317	0.734	0.157	0.453	0.347
6.42	402	2.625	12.32	2.646	0.363	0.719	0.169	0.437	0.329
6.59	419	2.560	12.32	2.910	0.408	0.704	0.174	0.414	0.301
7.15	435	2.512	12.32	3.157	0.448	0.694	0.173	0.403	0.282
7.31	451	2.471	12.32	3.402	0.484	0.685	0.161	0.406	0.265

Tabel 4.4.3.

TABEL TYPE 2 FOR FORSØEGSTILFAELDE 2422.2.
 FORSØEG STARTET D. 11. 1.79. KL. 10.31.

LOKAL KLOKKE	LOKAL TID	K1 (KN)	K2 (KN)	M11 (KNM)	M12 (KNM)	M21 (KNM)	M22 (KNM)	U (O/O)
0. 0	0	0.000	12.32	0.000	0.000	0.000	0.000	*****
2.23	143	0.104	12.32	0.035	0.009	0.020	0.007	79.99
2.40	160	0.668	12.32	0.101	0.028	0.143	0.037	29.57
2.57	177	0.928	12.33	0.186	0.057	0.187	0.061	0.43
3.13	193	1.337	12.32	0.263	0.088	0.266	0.093	0.10
3.29	209	1.668	12.33	0.322	0.116	0.327	0.122	0.08
3.45	225	1.916	12.32	0.364	0.141	0.371	0.147	0.21
4. 1	241	2.120	12.32	0.399	0.167	0.404	0.172	1.58
4.17	257	2.402	12.32	0.432	0.202	0.449	0.206	0.13
4.33	273	2.571	12.32	0.452	0.229	0.477	0.228	0.40
4.49	289	2.657	12.32	0.464	0.242	0.493	0.240	0.21
5. 5	305	2.741	12.32	0.476	0.245	0.513	0.256	0.25
5.21	321	2.775	12.32	0.484	0.243	0.527	0.263	0.58
5.37	337	2.753	12.31	0.490	0.229	0.532	0.266	0.21
5.53	353	2.730	12.32	0.497	0.211	0.540	0.266	0.22
6. 9	369	2.702	12.32	0.504	0.196	0.547	0.262	0.20
6.25	385	2.666	12.32	0.509	0.185	0.551	0.255	0.10
6.42	402	2.625	12.32	0.512	0.176	0.555	0.245	0.15
6.59	419	2.560	12.32	0.512	0.169	0.558	0.223	0.13
7.15	435	2.512	12.32	0.512	0.167	0.560	0.210	0.03
7.31	451	2.471	12.32	0.506	0.167	0.561	0.202	0.02

Tabel 4.4.4.

TABEL TYPE 3 FOR FORSØEGSTILFÆLDE 2422.2.
 FORSØEG STARTET D. 11. 1.79. KL. 10.31.

LOKAL KLOKKE	LOKAL TID	FI11 (0/00)	FI12 (0/00)	FI21 (0/00)	FI22 (0/00)	X11 (MM)	X12 (MM)	X21 (MM)	X22 (MM)
0. 0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	-8.00	-5.00	-8.00	-5.00
2.23	143	0.048	0.025	0.021	-0.005	77.30	43.07	64.53	526.95
2.40	160	0.165	0.050	0.123	0.033	48.83	42.74	54.80	-24.47
2.57	177	0.288	0.077	0.204	0.078	40.86	37.93	47.78	5.02
3.13	193	0.460	0.138	0.348	0.137	38.78	36.38	42.14	15.46
3.29	209	0.668	0.212	0.485	0.214	35.18	33.20	39.35	21.20
3.45	225	0.878	0.305	0.616	0.308	33.83	30.95	36.95	22.94
4. 1	241	1.143	0.413	0.762	0.402	31.92	28.39	35.56	23.92
4.17	257	1.602	0.631	1.053	0.654	28.89	26.30	31.37	20.85
4.33	273	2.101	0.922	1.366	0.975	26.40	23.90	28.99	20.47
4.49	289	2.621	1.305	1.684	1.344	24.90	20.76	27.40	19.28
5. 5	305	3.285	1.851	2.085	1.827	23.68	18.99	25.43	18.85
5.21	321	4.105	2.579	2.712	2.525	23.06	18.19	22.46	18.18
5.37	337	4.887	3.396	3.386	3.243	22.84	17.72	20.51	17.23
5.53	353	5.655	4.244	4.088	4.007	22.77	17.20	19.50	17.20
6. 9	369	6.413	5.079	4.813	4.764	22.68	16.54	18.92	16.87
6.25	385	7.170	5.893	5.534	5.564	22.68	16.02	18.12	16.58
6.42	402	7.981	6.764	6.291	6.396	22.85	15.66	17.38	15.94
6.59	419	8.850	7.618	7.007	7.305	22.96	15.44	16.33	15.19
7.15	435	9.637	8.401	7.642	8.080	23.39	15.42	15.30	14.24
7.31	451	10.499	9.159	8.225	8.813	23.91	15.60	14.41	13.39

Tabel 4.4.5.

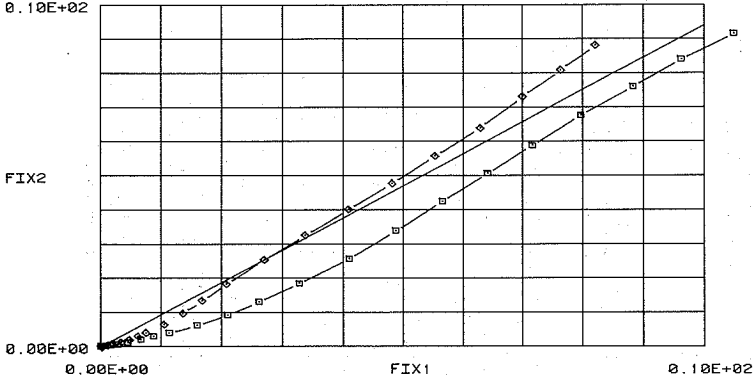
TABEL TYPE 4 FOR FORSØEGSTILFÆLDE 2422.2.
 FORSØEG STARTET D. 11. 1.79. KL. 10.31.

LOKAL KLOKKE	LOKAL TID	S1 (0/0)	FI11 (0/00)	FI12 (0/00)	NY1	S2 (0/0)	FI21 (0/00)	FI22 (0/00)	NY2	U (0/0)
0. 0	0	0.00	0.000	0.000	0.287	0.00	0.000	0.000	0.298*****	
2.23	143	0.87	0.048	0.025	0.254	0.52	0.021	-0.005	0.394	79.99
2.40	160	2.52	0.165	0.050	0.283	3.67	0.123	0.033	0.414	29.57
2.57	177	4.71	0.288	0.077	0.306	5.00	0.204	0.078	0.471	0.43
3.13	193	6.83	0.460	0.138	0.360	7.33	0.348	0.137	0.543	0.10
3.29	209	8.53	0.668	0.212	0.395	9.25	0.485	0.214	0.592	0.08
3.45	225	9.84	0.878	0.305	0.434	11.10	0.616	0.308	0.736	0.21
4. 1	241	11.13	1.143	0.413	0.492	12.79	0.762	0.402	0.863	1.58
4.17	257	12.67	1.602	0.631	0.570	15.05	1.053	0.654	0.974	0.13
4.33	273	14.04	2.101	0.922	0.674	16.74	1.366	0.975	1.084	0.40
4.49	289	15.14	2.621	1.305	0.785	17.72	1.684	1.344	1.139	0.21
5. 5	305	16.05	3.285	1.851	0.886	18.54	2.085	1.827	1.124	0.25
5.21	321	16.66	4.105	2.579	0.969	18.89	2.712	2.525	1.102	0.58
5.37	337	16.85	4.887	3.396	1.040	18.94	3.386	3.243	1.077	0.21
5.53	353	16.81	5.655	4.244	1.085	19.11	4.088	4.007	1.075	0.22
6. 9	369	16.60	6.413	5.079	1.088	19.23	4.813	4.764	1.084	0.20
6.25	385	16.30	7.170	5.893	1.059	19.40	5.534	5.564	1.125	0.10
6.42	402	16.04	7.981	6.764	1.029	19.50	6.291	6.396	1.173	0.15
6.59	419	15.71	8.850	7.618	0.982	19.19	7.007	7.305	1.214	0.13
7.15	435	15.54	9.637	8.401	0.955	19.01	7.642	8.080	1.247	0.03
7.31	451	15.32	10.499	9.159	0.933	18.77	8.225	8.813	1.237	0.02

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2422.2.
 FORSOEG STARTET D. 11. 1.79. KL. 10.31.

FUGE 1 : ◻
 FUGE 2 : ◊

FI I 0/0 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/0 FOR RETN. 1.

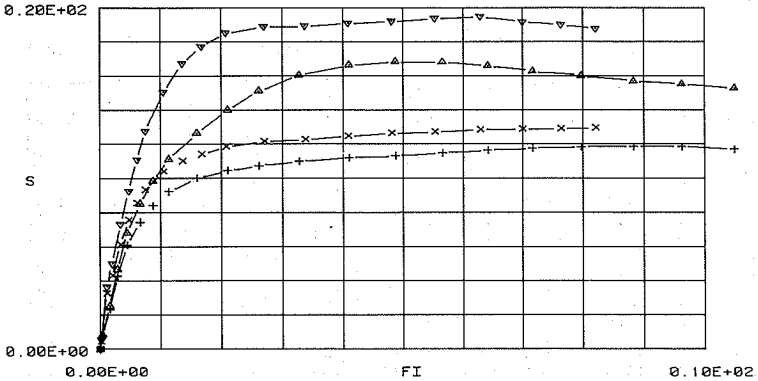


Figur 4.4.2.

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2422.2.
 FORSOEG STARTET D. 11. 1.79. KL. 10.31.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 3.43 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/0.



Figur 4.4.3.

ges med et til formålet udviklet fortranprogramsystem. Alle målinger bortset fra måling af forsyningsspændinger og normalkraft blev nulpunktskorrigeret, idet det første scan blev benyttet som referencescan svarende til udgangstilstanden hvor alle målestørrelser, bortset fra forsyningsspændinger og normalkraft, pr. definition skal være nul. Prøvelegemets deformationer karakteriseret ved størrelserne φ_{ij} og x_{ij} blev bestemt som omtalt i appendix B afsnit 7, og de øvrige størrelser blev bestemt ved multiplikation med diverse kalibreringsfaktorer.

Ved simple ligevægtsligninger bestemtes da momenterne M_{11} , M_{12} , M_{21} og M_{22} , se figur 4.1.2; idet momenterne blev bestemt under hensyntagen til deformationer, således at momenterne altid refererer til prøvelegemets centerlinie. Da vi både har målt belastningen K_1 og de fire reaktioner R_{ij} , er der en statisk overbestemthed i systemet som gør, at der kan bestemmes en fejlparameter u , bestemt som det halve relative gab mellem resultaterne for de to bestemmelser af momentet M_{21} , som den statiske overbestemthed giver mulighed for. Desuden er bestemt størrelserne

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{d\varphi_{12}}{d\varphi_{11}} \\ v_2 &= \frac{d\varphi_{22}}{d\varphi_{21}} \\ s_1^* &= \frac{\sigma_1^*}{\sigma_{mc}} = \frac{1}{t^3 \sigma_{mc}} \{M_{11} + v_1 M_{12}\} \\ s_2^* &= \frac{\sigma_2^*}{\sigma_{mc}} = \frac{1}{t^3 \sigma_{mc}} \{M_{21} + v_2 M_{22}\} \end{aligned} \right\} (4.4.1)$$

Vedrørende disse størrelses betydning, se afsnit 1. Forholdene v_1 og v_2 er bestemt som hældningerne på kurverne $(\varphi_{11}, \varphi_{12})$ henholdsvis $(\varphi_{21}, \varphi_{22})$ for hvert enkelt scan ved lineær regression på et antal punkter, som kunne vælges fra forsøg til forsøg afhængigt af punktafstand, måleusikkerhed etc. Bortset fra forsøgets start og slutning blev der anvendt symmetrisk lineær regression, og antallet af punkter var som regel lig med fem. De fiktive spændinger σ_1^* er gjort dimensionsløse ved division med mørteltrykstyrken σ_{mc} , som blev målt for hver forsøgs-kombination på små cylinderformede prøvelegemer.

De beregnede størrelser blev da for hvert enkelt forsøg læst ud i op til 4 tabeller. De fire tabeltyper er for tilfælde 2422.2 vist i tabel 4.4.2, 4.4.3, 4.4.4 og 4.4.5. Tabel type 1 (tabel 4.4.2) angiver forløbet for størrelserne K_1 , K_2 , δ_1 , δ_2 og R_{11} , R_{12} , R_{21} og R_{22} . Tabel type 2 (tabel 4.4.3) angiver forløbet for K_1 , K_2 og M_{11} , M_{12} , M_{21} , M_{22} samt fejlparameteren u . Tabel type 3 (tabel 4.4.4) angiver forløbet for deformationsstørrelserne φ_{11} , φ_{12} , φ_{21} , φ_{22} og x_{11} , x_{12} , x_{21} og x_{22} , og tabel type 4 (tabel 4.4.5) angiver forløbet for størrelserne s_1^* , φ_{11} , φ_{12} , v_1 og s_2^* , φ_{21} , φ_{22} , v_2 og fejlparameteren u .

Ved de forsøg hvor der blev målt med ekstensiometre, blev alle 4 tabeller udskrevet for hvert forsøg, medens kun tabel type 1 og type 2 blev udskrevet for de forsøg hvor der ikke var blevet anvendt ekstensiometre.

For de forsøg hvor der var blevet målt med ekstensiometre, blev der lavet plots af de vigtigste sammenhænge. Der blev lavet plots, dels af kurverne $(\varphi_{i1}, \varphi_{i2})$, $i = 1, 2$ og (φ_{i1}, s_i^*) , $i = 1, 2$; disse plots er for tilfælde 2422.2 vist i figur 4.4.2 henholdsvis 4.4.3. Ved kurverne (φ_{i1}, s_i^*) , $i = 1, 2$ er desuden til sammenligning også plottet

kurverne $(\varphi_{i1}, \Delta s_i^*)$, $i = 1, 2$, som angiver bøjningsmomenternes bidrag alene, idet

$$\Delta \sigma_i = \frac{1}{t^3 \sigma_{mc}} \cdot M_{i1}, \quad i = 1, 2 \quad (4.4.2)$$

4.5. Forsøgsresultater.

Som det fremgår af de foregående afsnit, er der for forsøgene med kombineret vridning og bøjning tale om en særdeles stor datamængde, idet der dels er lavet mange forsøg, og dels for hvert enkelt forsøg foretaget relativt mange målinger.

Tabel 4.5.1 viser en oversigt over hvorledes alle de planlagte forsøg er gennemført. Det ses, at der for $\alpha = \alpha_1$, d.v.s. tilfældene 1xxx, er målt med ekstensometre på alle prøvelegemer, hvorimod der for de resterende forsøgs vedkommende af tidsbesparende grunde kun er målt med ekstensometre på et prøvelegeme for hver kombination. Når der nogle steder ses at mangle en af de tre planlagte gentagelser, skyldes det enten, at det pågældende prøvelegeme, trods de mange anstrengelser for at opnå et nøjagtig prøvelegemegeometri, alligevel er blevet for unøjagtigt, og derfor er blevet kasseret, eller at prøvelegemet af en eller anden grund er gået i stykker for det blev prøvet i opstillingen. Forsøgene svarende til kombinationerne 42xx og 44xx ses helt at mangle. Dette skyldes, at det i starten var nødvendigt at køre en del flere pilotforsøg end forudset, med den konsekvens, at der blev færre prøvelegemer til rådighed til de egentlige forsøg.

Lagringstiderne for de anvendte prøvelegemer, samt de målte mørtelstyrker, er angivet i tabel 4.5.2. Det ses, at lagringstiderne for de fleste prøvelegemers vedkommende ligger i intervallet 170 - 200 døgn, og at mørtelstyrkerne for K100-mørtelen ligger i intervallet 1.0 - 1.7 MN/m²,

og for KC 50/50-mørtelen i intervallet 3.0 - 5.2 MN/m².

Trykstyrken for den avendte type prøvelegeme blev bestemt ved et simpelt trykforsøg i afdelingens 200 kN MFL-betonpresse. Prøvelegemerne blev efter 121 døgn's lagring på samme måde som de til forsøgene med kombineret vridning og bøjning anvendte prøvelegemer trykprøvet med anvendelse af mellemlag af bløde træfiberplader på begge trykplader og med fast underplan og kugleskålslejret overplan. Resultaterne heraf fremgår af tabel 4.5.3, som også angiver resultaterne af prøvningen af de til murværksprøvelegemerne hørende mørtelprøvelegemer. Se til sammenligning tabel 3.5.5.

Der skal ikke her i detaljer gøres rede for alle de mange og relativt omfattende målinger, der er foretaget i forbindelse med udførelsen af forsøgene med kombineret vridning og bøjning, men blot gøres rede for de vigtigste resultater.

I appendix D er vist kurverne $(\varphi_{i1}, \varphi_{i2})$, (φ_{i1}, s_i^*) og $(\varphi_{i1}, \Delta s^*)$ $i = 1, 2$ for tilfældene 2x11, $x = 1, 2, \dots, 5$ og 2x22, $x = 1, 2, \dots, 5$ og 1321.x, $x = 1, 2, 3$. Disse kurver er repræsentative for stort set alle de gennemførte forsøg. Som tidligere omtalt, se afsnit 1 samt afsnit 4, kan det af disse kurver ses, dels hvorvidt deformationerne af prøvelegemerne er styret som tilsigtet, og dels hvorvidt det er rimeligt at benytte en plasticitetsmodel på materialet når det udsættes for de ved forsøgene anvendte belastninger.

Af kurverne $(\varphi_{i1}, \varphi_{i2})$, $i = 1, 2$ for de i appendix D viste tilfælde, fremgår det, at der er nogen forskel fra forsøg til forsøg, hvorvidt det er lykkedes at styre prøvelegemers deformationer som tilsigtet. Generelt gælder det dog, at styringen er dårligst ved forsøgets start, men som regel er acceptabel god når deformationerne er

blevet passende store. Dette ses af, at hældningen i starten er ganske lille, men for passende store deformationer nævner sig den tilstræbte værdi. Fænomenet må skyldes, at prøvemaskinen, trods den gunstige udformning den i alle detaljer synes at være givet, ikke har været tilstrækkelig stiv overfor vridende momenter i prøvelegemets fuger. Prøvemaskinen har derfor kun kunnet påtvinge prøvelegemet de korrekte vridningsdeformationer, når fugerne først er svækket gennem påsætning af passende store bøjningsdeformationer. Det skønnes imidlertid, at disse afvigelser fra det tilsigtede ikke i væsentlig grad har påvirket undersøgelsernes resultater.

Kurverne (φ_{i1}, s_i^*) kan som omtalt tidligere opfattes som generaliserede arbejdskurver for murmaterialet når det udsættes for de i forsøget aktuelle påvirkninger. Det kan af disse kurver direkte ses, hvorvidt det er rimeligt at benytte en plasticitetsmodel på materialet i denne belastningssituation. Det ses af de viste kurver, hvad der også gælder generelt for de øvrige målte kurver, at der i de tilfælde hvor deformationsstyringen har været rimelig god er en helt klar tendens til, at der først på kurverne (φ_{i1}, s_i^*) , $i = 1, 2$, er et stykke med i begyndelsen stor og derefter kraftigt aftagende hældning, og derefter et stykke hvor hældningen tilnærmet er nul. Det ses også, at der generelt gælder, at det første stykke af kurven svarer til et relativt lille interval på tøjningsaksen sammenlignet med hvad der gælder for det andet stykke af kurven. Selv de tilfælde med minemal normalkraft viser denne helt klare tendens til at "flyde" i et relativt stort interval på tøjningsaksen. Da forsøgene ikke er stoppet på grund af et pludseligt totalbrud i prøvelegemet, men ud fra et krav om passende store plastiske deformationer, må man formode, at man såfremt for-

søgene var fortsat, havde målt arbejdskurver med endnu større intervaller på tøjningsaksen i hvilke spændingsparameteren s_i^* , $i = 1, 2$, tilnærmet kan regnes konstant.

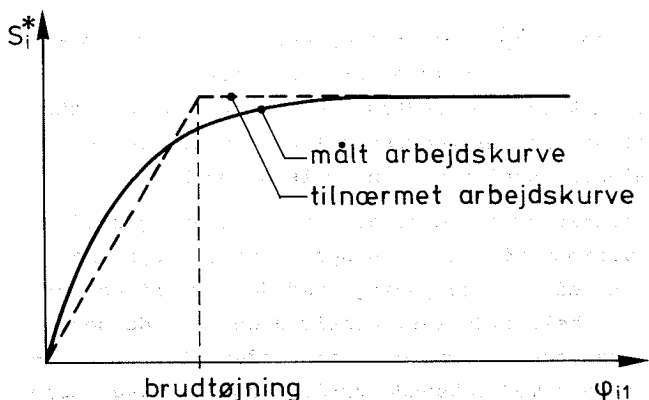
På grund af af de i dette kapitel omtalte forsøg kan det altså som et resultat konkluderes, at murværk helt tydeligt har egenskaber som gør, at det synes forsvarligt at benytte en plasticitetsmodel på materialet over for en kombination af normalkraft (som holdes konstant) og vridningsdeformation og bøjningsdeformation i liggefugerne, når disse størrelser ligger i de i denne rapport undersøgte intervaller.

Rent kvalitativt synes vejen til anvendelse af en plasticitetsteori på en murettværbelastet væg derfor at være banet. Spørgsmålet er blot, om man kan tilskrive en muret væg nogle få karakteristiske størrelser (flydemomenter) på grundlag af hvilke man på simpel vis kan bestemme det indre arbejde i en skrå brudlinie med vilkårlig hældning, eller om man må bestemme det indre arbejde for vilkårlige retninger ved mere komplicerede metoder. Dette spørgsmål skal i det følgende undersøges nøjere.

For hvert forsøg er der ud fra tabel type 2 (se tabel 4.4.3) bestemt brudtværkraften K_1 , og de fire flydemomenter (brudmomenter) M_{11} , M_{12} , M_{21} og M_{22} . Brudtværkraften K_1 er defineret som den værdi af tværkraften for hvilken kurven (δ_1, K_1) for første gang får vandret tangent, og brudmomenterne er aflæst ved den værdi af tværkraften, som første gang er lig med tværbrudkraften.

Desuden er bøjningsbrudtøjningerne φ_{11} bestemt ud fra kurverne (φ_{11}, s_1^*) på den på figur 4.5.1 viste måde.

De fundne værdier for brudtøjningerne er for de 4 materialekombinationer angivet i tabel 4.5.4 idet der er midlet over den geometriske parameter α . I figur 4.5.6 er



Figur 4.5.1. Bestemmelse af brudtøjninger.

de målte brudtøjninger plottet ind mod den relative normalkraft K_2/K_C , hvor K_C er trykbrudstyrken, se tabel 4.5.3. Der ses at være en kraftig afhængighed af normalspændingsniveau'et, således at brudtøjningerne tiltager med voksende normalspændingsniveau.

De fundne værdier for brudtværkraften K_1 er angivet i tabellerne 4.5.5, 4.5.6, 4.5.7 og 4.5.8, og de fundne middelbrudmomenter (middel over fuger (1 og 2) samt over gentagelser) er angivet i tabellerne 4.5.9, 4.5.10, 4.5.11 og 4.5.12. Spredningerne på enkeltmålinger ses for tilfældende med lille normalkraft at være relativt store, hvilket kan forklares ved, at en del tilfældigt varierende parametre, især initialspændingerne i prøvelegeme og prøvemaskine, har forholdsvis større indflydelse på målingerne i disse tilfælde.

I figur 4.5.2 og 4.5.3 er bøjningsbrudmomenternes, henholdsvis vridningsbrudmomenternes variation med den geo-

metriske prøvemaskineparameter α optegnet. For hver materialekombination er brudmomenterne plottet mod α , og tendensen er markeret ved indtegnning af den bedste rette linie (fundet ved lineær regression) gennem punkterne ved hvert belastningsniveau af normalkraften K_2 .

Af disse afbildninger ses det, at der for bøjningsbrudmomenternes vedkommende ikke kan spores nogen systematisk variation med α af betydning. Ved de lave niveau'er for K_2 er dette helt tydeligt, hvorimod der for de højere niveau'er kan ses at være en svag tendens til at brudmomenterne aftager med voksende værdier for α . Ikke desto mindre synes det at være en meget god approximation til de i figur 4.5.2 viste målinger at antage at bøjningsbrudmomenterne ikke afhænger af parameteren α . For vridningsmomenternes vedkommende er der derimod en noget klarere systematisk variation med α , idet der er tendens til at vridningsbrudmomenterne tiltager med voksende værdier for α , og det synes derfor ikke her umiddelbart at være nogen helt god tilnærmelse at se bort herfra. Denne variationstendens er imidlertid gennemgående ikke så stærk ved de lave som ved de højere niveau'er af K_2 , og da vridningen, som det vil fremgå senere, kun bidrager væsentligt til tværbæreevnen for en muret væg når normalspændingerne er små, kan det derfor være en rimelig god tilnærmelse, for de i figur 4.5.3 viste målinger, at antage, at vridningsbrudmomenterne ikke afhænger af α . Der ses i øvrigt at være den ejendommelighed ved disse målinger, at der i alle afbildningerne for det største niveau af K_2 ses at være en iøjnefaldende systematisk fordeling af målepunkterne som sammenlignet med hvad der gælder for de øvrige niveau'er afviger ret meget fra et ret linie. Dette har det ikke været muligt af finde nogen forklaring på bortset fra, at alle målinger ved et

givet niveau af K_2 og en given værdi af α er foretaget på prøvelegemer som har været lagret på samme palle, og at målingerne ved det højeste niveau for K_2 da kan være blevet særligt kraftigt påvirkede af forskelle i lagringsbetingelserne for de på de fire forskellige paller lagrede prøvelegemer.

I figur 4.5.4 er desuden plottet vridningsbrudmomenterne mod bøjningsbrudmomenterne for de forskellige belastningsniveau'er og for de forskellige værdier af den geometriske parameter α . Antagelsen om at brudmomenterne er uafhængige af α er opfyldt i samme grad som målepunkterne i disse diagrammer for en given materialekombination og et givet normalkraftniveau kan siges at klumpe sig sammen om det samme punkt og i øvrigt være fordelt på en ikke systematisk måde. Af disse figurer ses det da også, at det synes at være en rimelig god antagelse, at antage brudmomenterne uafhængige af den geometriske parameter α .

Antager vi altså nu, at bøjningsmomenterne og vridningsmomenterne ikke afhænger af α , så kan alle målinger svarende til en bestemt materialekombination og niveau for K_2 poolles. Resultaterne heraf er angivet i tabel 4.5.13, idet de angivne spredninger er spredningen på middelværdierne, altså spredningerne på de i tabellen angivne værdier for brudmomenterne. Disse resultater er også vist på figurerne 4.5.7 og 4.5.8 hvor bøjningsbrudmomenterne henholdsvis vridningsbrudmomenterne er afbildet mod normalkraften K_2 . Der er desuden for hver materialekombination optegnet det 2. gradspolynomium som bedst (mindste kvadraters metoder) tilnærmer målepunkterne. De optegnede 2.gradspolynomier er skrevet på formen

$$\frac{M}{M_0} = a_0 + a_1 \frac{K_2}{K_0} + a_2 \left(\frac{K_2}{K_0} \right)^2 \quad (4.5.1)$$

hvor $M_0 = 1$ kNm og $K_0 = 1$ kN. De fundne koefficienter a_0 , a_1 og a_2 er angivet i tabel 4.5.14. Disse kurver kan altså betegnes som brudflader for snitkræfterne M_{x1} og K_2 samt M_{x2} og K_2 .

Det ses, at bøjningsmomentbrudfladerne alle tilnærmet går gennem (0,0), og at de alle tilnærmet har samme begyndelseshældning. Konstanterne a_0 og a_2 må siges at være dårligt bestemt, hvorimod konstanten a_1 må siges at være relativt godt bestemt. For vridningsmomentbrudfladerne gælder det imidlertid, at de har en begyndelsesværdi som afviger systematisk fra nul, og deres begyndelseshældning er forskellig. Begge konstanterne a_0 og a_1 må her siges at være rimeligt godt bestemte, hvorimod krumningskonstanten a_2 må siges at være noget dårligere bestemt.

Som en kontrol af rimeligheden af at bestemme flydemomenterne (brudmomenterne) må den ovenfor omtalte måde, kan vi ud fra de fundne flydemomenter beregne tværbrudkraften K_1 for de forskellige forsøgstilfælde, og sammenligne disse værdier mod de målte. Idet vi kender brudmåden for konstruktionen (opstillingen går i brud ved dannelse af et flydeled i hver af prøvelegemets to fuger) kan vi ved at benytte arbejdsligningen (øvre værdisætningen) bestemme den efter en førsteordensteori korrekte værdi for tværbrudlasten. For tværbrudkraften K_1 findes

$$K_1 = \frac{2}{l_1} \{M_{x1} + M_{x2}\alpha\} \quad (4.5.2)$$

idet der for bøjningsflydemomentet M_{x1} , vridningsflydemomentet M_{x2} og den geometriske parameter α skal indsættes de for forsøgstilfældet aktuelle værdier. I figur 4.5.5

er for de forskellige materialekombinationer og de forskellige niveauer af K_2 vist hvorledes tværbrudkraften varierer med α , dels som det direkte er målt (fuldt optrukket linie) og dels som det er beregnet (prikket linie) ud fra udtrykket (4.5.2).

Det ses, at der er fin overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier af tværbrudkraften K_1 ved lave niveau'er af tryknormalkraften K_2 , men at der ved de højere niveau'er, især det sidste, er en tydelig tendens til at udtrykket (4.5.2) overestimerer tværbæreevnen. Dette skyldes, at man ved store normalkræfter ikke kan bruge en lineær teori. Som det allerede er set, er bruddeformationerne voksende med voksende normaltryk, og det er derfor nødvendigt ved store normaltryk at benytte en teori som tager hensyn til deformationernes indflydelse på tværbæreevnen. Udtrykket (4.5.2) kan også opfattes som en ligevægtsligning (da brudfiguren er korrekt) opstillet under antagelse af forsvindende små deformationer. Opstilles imidlertid den til (4.5.2) svarende ligevægtsligning under hensyntagen til deformationerne fås

$$K_1 = \frac{2}{l_1} \{M_{x1} + M_{x2}\alpha - K_2 \cdot \delta_1\} \quad (4.5.3)$$

hvor δ_1 er den lodrette flytning af prøvelegemets centerlinie ud af prøvemaskinens plan. Beregnes tværbæreevnen ud fra dette udtryk (δ_1 bestemmes ud fra målingerne) fås der for alle niveau'er af K_2 lige så god overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier for tværbæreevnen som der fås af (4.5.2) ved de lave niveau'er af K_2 . Tværdeformationen δ_1 kan imidlertid ikke bestemmes ud fra prøvelegemets brudtøjninger, da der også indgår ikke ubetydelige bidrag fra de elastiske deformationer af prøvemaskinens arme. Da de enkelte bruddele i en tværbelastet

muret væg, se eventuelt figur 4.1.1, i praksis ikke kan regnes uendelig stive, må noget tilsvarende regnes at gælde her. Man vil derfor ikke i almindelighed kunne bestemme tværbruddeformationen δ_1 med rimelig sikkerhed, og det vil derfor i almindelighed ikke være muligt at benytte en 2. ordens teori som tager hensyn til endelige tværdeformationer i brudtilstanden.

Derimod er det muligt ud fra de foretagne målinger at danne et udtryk ved hjælp af hvilket man kan vurdere hvorvidt det i et givet tilfælde vil være forsvarligt at benytte en førsteordensteori (lineær teori) baseret på en anvendelse af øvre værdisætningen på den korrekte brudfigur. Som en grov tilnærmelse til (4.5.3) benyttes

$$\begin{aligned} K_1 &\cong \frac{1}{h} \cdot M_{x1} \\ &\cong \frac{1}{h} \cdot \frac{1}{2} t K_2 \end{aligned} \quad (4.5.4)$$

hvor $h \cong 2 l_1$ lig med afstanden mellem understøtningslinjerne. Vedrørende faktoren $\frac{1}{2} t$, se udtrykket (4.5.1) og tabel 4.5.14.

Fejlen ved ikke at tage hensyn til deformationernes endelige størrelse ses af (4.5.3) at kunne skrives

$$\Delta K_1 = \frac{1}{h} \cdot K_2 \cdot \delta_1 \quad (4.5.5)$$

Tvæardeformationen δ_1 vurderes til

$$\delta_1 \cong \frac{h}{2} \cdot \varphi_{x1} \cdot 2 \quad (4.5.6)$$

idet der groft er taget hensyn til bidraget fra de elastiske deformationer ved multiplikation med en faktor 2. Af figur 4.5.6 ses det, at brudtøjningerne φ_{x1} med tilnærmel-

se kan skrives

$$\varphi_{x1} \cong \mu \cdot \frac{K_2}{K_C}, \mu \cong 2.0\% \quad (4.5.7)$$

Indsættes (4.5.7) og (4.5.6) i (4.5.5) fås

$$\begin{aligned} \Delta K_1 &\cong \frac{1}{h} \cdot \frac{h}{2} \cdot 2 \cdot \mu \cdot \frac{K_2}{K_C} \cdot K_2 \\ &\cong \mu \cdot \frac{K_2^2}{K_C} \end{aligned} \quad (4.5.8)$$

Den relative fejl ε der begås ved ikke at tage hensyn til de endelige deformationer i bruttilstanden kan da vurderes til

$$\varepsilon = \frac{\Delta K_1}{K_1}$$

og ved anvendelse af (4.5.4) og (4.5.8)

$$\varepsilon \cong \frac{\mu}{2} \cdot \frac{h}{t} \cdot \frac{K_2}{K_C} \quad (4.5.9)$$

Antages normalkraften K_2 at svare til den jævnt fordelte normalspænding σ_0 kan (4.5.9) skrives

$$\varepsilon \cong \frac{h}{h_0} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_C} \quad (4.5.10)$$

hvor $h_0 = \frac{t}{2\mu}$, $\mu = 2.0\%$

Som det fremgår af det ovenstående må udtrykket (4.5.10) antages at gælde generelt^{*)} som et vurderingsudtryk for hvorvidt man på en tværbelastet muret væg med højden h og med den jævnt fordelte normalspænding σ_0 kan benytte en

*) Slnkhedseffekternes indflydelse må dog undersøges specielt hvis normalkræfterne ikke er små sammenlignet med bucklinglasten.

lineær brudteori baseret på en anvendelse af øvre værdisætningen til beregning af tværbæreevnen.

Benyttes udtrykket (4.5.10) til vurdering af hvor stor en fejl der er begået ved for de udførte forsøg at beregne tværbæreevnen K_1 ud fra (4.5.2), fås idet $h/h_0 \cong 0.5$

$$K_2 = K_{2,1} \Rightarrow \epsilon \cong 0.6\%$$

$$K_2 = K_{2,2} \Rightarrow \epsilon \cong 1.3\%$$

$$K_2 = K_{2,3} \Rightarrow \epsilon \cong 2.5\%$$

$$K_2 = K_{2,4} \Rightarrow \epsilon \cong 5.0\%$$

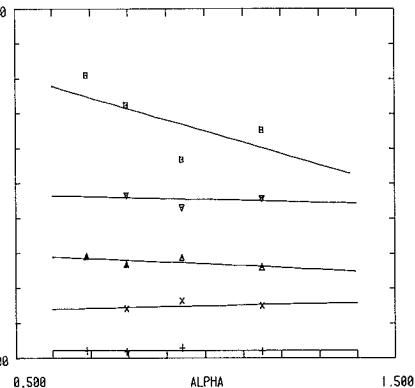
$$K_2 = K_{2,5} \Rightarrow \epsilon \cong 10.0\%$$

Dette synes at stemme godt med hvad der kan aflæses af figur 4.5.5.

Konklusionen må da være, at brudmomenterne kan sammenfattes i de i figur 4.5.7 og 4.5.8 viste brudflader, men at man ved anvendelse af øvre værdisætningen, eller en statisk tilladelig snitkraftfordeling, til bestemmelse af tværbæreevnen, må være opmærksom på den fejl der begås ved ikke at tage hensyn til de endelige deformationer i brudstadiet.

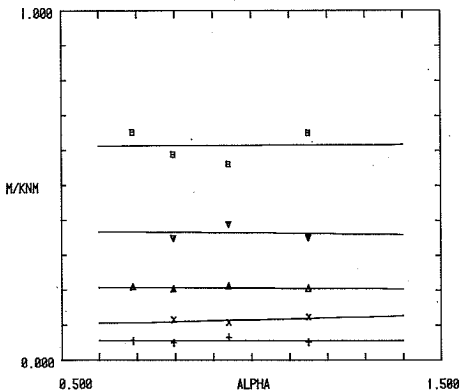
BOEJNINGSRUDMOMENTER, VARIATION MED ALPHA, TILFAELDE XX11.

 MAALEPUNKTER, K2 = 1.25 KN : +
 MAALEPUNKTER, K2 = 7.39 KN : x
 MAALEPUNKTER, K2 = 14.78 KN : Δ
 MAALEPUNKTER, K2 = 29.53 KN : ▽
 MAALEPUNKTER, K2 = 49.24 KN : □
 BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF ALPHA.



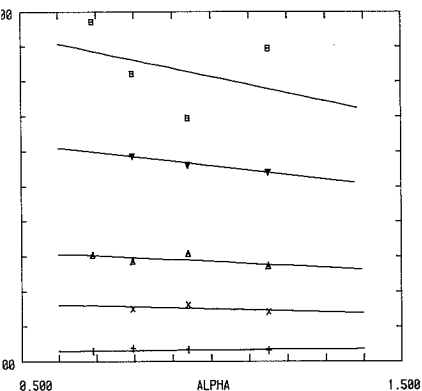
BOEJNINGSRUDMOMENTER, VARIATION MED ALPHA, TILFAELDE XX12.

 MAALEPUNKTER, K2 = 1.24 KN : +
 MAALEPUNKTER, K2 = 2.47 KN : x
 MAALEPUNKTER, K2 = 4.93 KN : Δ
 MAALEPUNKTER, K2 = 9.86 KN : ▽
 MAALEPUNKTER, K2 = 19.72 KN : □
 BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF ALPHA.



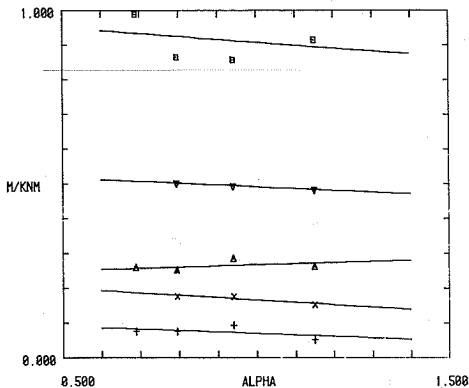
BOEJNINGSRUDMOMENTER, VARIATION MED ALPHA, TILFAELDE XX21.

 MAALEPUNKTER, K2 = 1.25 KN : +
 MAALEPUNKTER, K2 = 7.99 KN : x
 MAALEPUNKTER, K2 = 14.78 KN : Δ
 MAALEPUNKTER, K2 = 29.54 KN : ▽
 MAALEPUNKTER, K2 = 49.25 KN : □
 BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF ALPHA.



BOEJNINGSRUDMOMENTER, VARIATION MED ALPHA, TILFAELDE XX22.

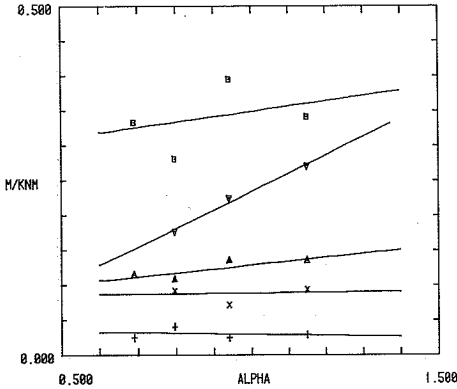
 MAALEPUNKTER, K2 = 1.24 KN : +
 MAALEPUNKTER, K2 = 3.86 KN : x
 MAALEPUNKTER, K2 = 6.17 KN : Δ
 MAALEPUNKTER, K2 = 12.32 KN : ▽
 MAALEPUNKTER, K2 = 24.64 KN : □
 BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF ALPHA.



Figur 4.5.2. Bøjningsbrudmomenternes variation med den geometriske parameter α .

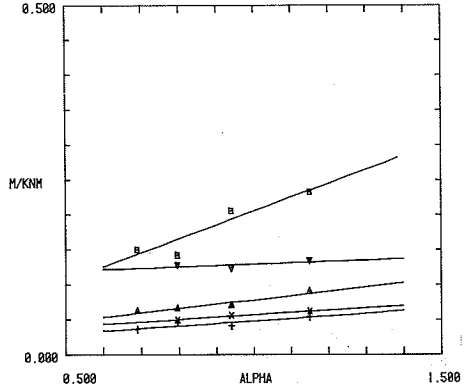
VRIDNINGSBRUDMOMENTER, VARIATION MED ALPHA, TILFAELDE XX11.

 MAALEPUNKTER, K2 = 1.25 KN : +
 MAALEPUNKTER, K2 = 7.39 KN : x
 MAALEPUNKTER, K2 = 14.78 KN : Δ
 MAALEPUNKTER, K2 = 29.53 KN : ▽
 MAALEPUNKTER, K2 = 49.24 KN : □
 BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF ALPHA.



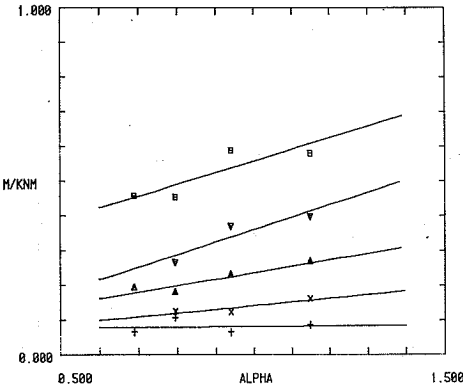
VRIDNINGSBRUDMOMENTER, VARIATION MED ALPHA, TILFAELDE XX12.

 MAALEPUNKTER, K2 = 1.24 KN : +
 MAALEPUNKTER, K2 = 2.47 KN : x
 MAALEPUNKTER, K2 = 4.93 KN : Δ
 MAALEPUNKTER, K2 = 9.86 KN : ▽
 MAALEPUNKTER, K2 = 19.72 KN : □
 BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF ALPHA.



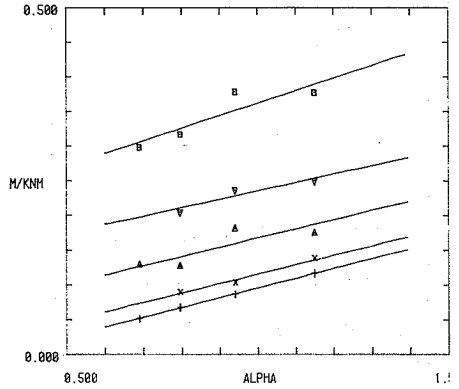
VRIDNINGSBRUDMOMENTER, VARIATION MED ALPHA, TILFAELDE XX21.

 MAALEPUNKTER, K2 = 1.25 KN : +
 MAALEPUNKTER, K2 = 7.39 KN : x
 MAALEPUNKTER, K2 = 14.78 KN : Δ
 MAALEPUNKTER, K2 = 29.54 KN : ▽
 MAALEPUNKTER, K2 = 49.25 KN : □
 BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF ALPHA.



VRIDNINGSBRUDMOMENTER, VARIATION MED ALPHA, TILFAELDE XX22.

 MAALEPUNKTER, K2 = 1.24 KN : +
 MAALEPUNKTER, K2 = 3.08 KN : x
 MAALEPUNKTER, K2 = 6.17 KN : Δ
 MAALEPUNKTER, K2 = 12.32 KN : ▽
 MAALEPUNKTER, K2 = 24.64 KN : □
 BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF ALPHA.



Figur 4.5.3. Vridningsbrudmomenternes variation med den geometriske parameter α .

BRUDFLADER (MX1, MX2), TILFAELDE XX11.

MAALEPUNKTER, K2 = 1.25 KN : +

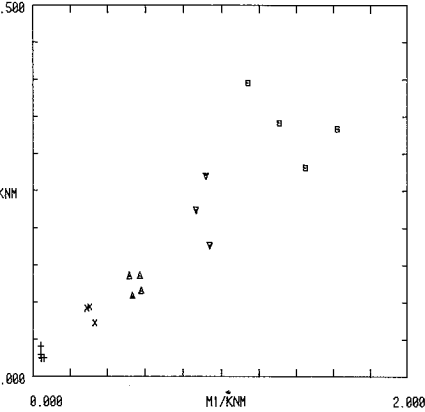
MAALEPUNKTER, K2 = 7.39 KN : x

MAALEPUNKTER, K2 = 14.78 KN : Δ

MAALEPUNKTER, K2 = 29.53 KN : ▽

MAALEPUNKTER, K2 = 49.24 KN : □

VRIDNINGSMOMENTER SOM FKT. AF BØJNINGSMOMENTER.



BRUDFLADER (MX1, MX2), TILFAELDE XX21.

MAALEPUNKTER, K2 = 1.25 KN : +

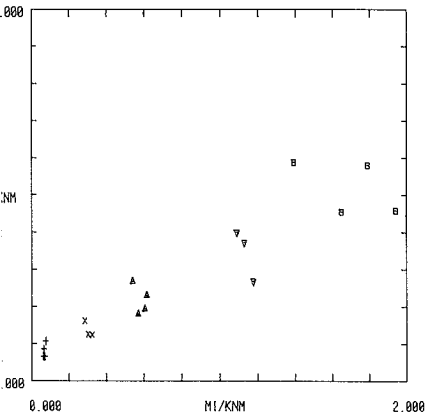
MAALEPUNKTER, K2 = 7.39 KN : x

MAALEPUNKTER, K2 = 14.78 KN : Δ

MAALEPUNKTER, K2 = 29.54 KN : ▽

MAALEPUNKTER, K2 = 49.25 KN : □

VRIDNINGSMOMENTER SOM FKT. AF BØJNINGSMOMENTER.



BRUDFLADER (MX1, MX2), TILFAELDE XX12.

MAALEPUNKTER, K2 = 1.24 KN : +

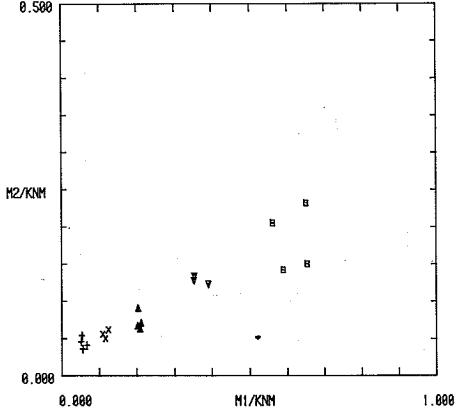
MAALEPUNKTER, K2 = 2.47 KN : x

MAALEPUNKTER, K2 = 4.93 KN : Δ

MAALEPUNKTER, K2 = 9.86 KN : ▽

MAALEPUNKTER, K2 = 19.72 KN : □

VRIDNINGSMOMENTER SOM FKT. AF BØJNINGSMOMENTER.



BRUDFLADER (MX1, MX2), TILFAELDE XX22.

MAALEPUNKTER, K2 = 1.24 KN : +

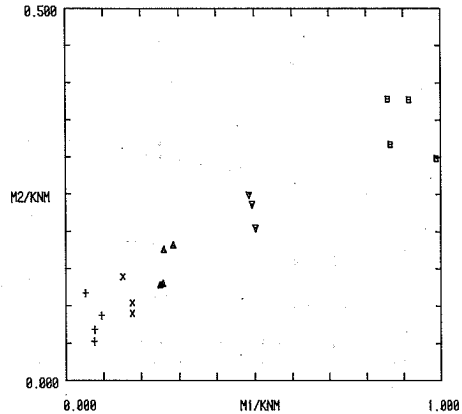
MAALEPUNKTER, K2 = 3.08 KN : x

MAALEPUNKTER, K2 = 6.17 KN : Δ

MAALEPUNKTER, K2 = 12.32 KN : ▽

MAALEPUNKTER, K2 = 24.64 KN : □

VRIDNINGSMOMENTER SOM FKT. AF BØJNINGSMOMENTER.

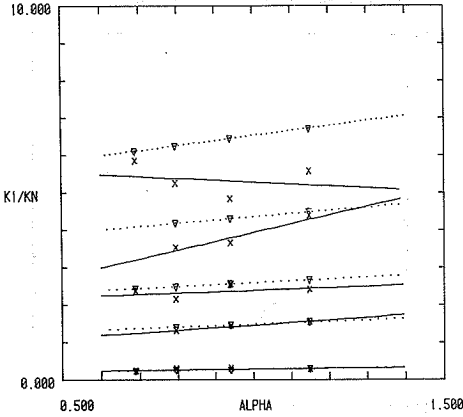


Figur 4.5.4. Vridningsbrudmomenterne plottet mod bøjningsbrudmomenterne for forskellige belastningsniveau'er og værdier af den geometriske parameter α .

BEREGNET OG MAALT TVAERBAEREEVNE, TILFAELDE XX11.

MAALT : x, REGRESSION : FULDT OPTRUKKET
 BEREGNET : v, REGRESSION : PRIKKET.

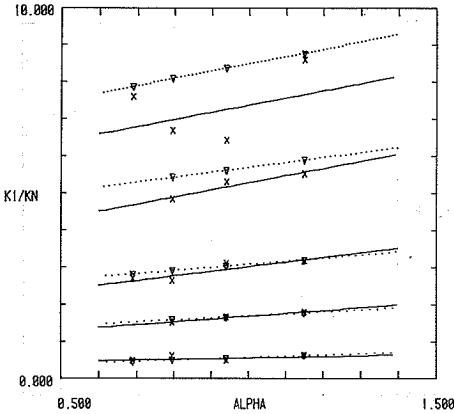
TVAERBAEREEVNER SOM FUNKTION AF GEOMETRISK PARAMETER.



BEREGNET OG MAALT TVAERBAEREEVNE, TILFAELDE XX21.

MAALT : x, REGRESSION : FULDT OPTRUKKET
 BEREGNET : v, REGRESSION : PRIKKET.

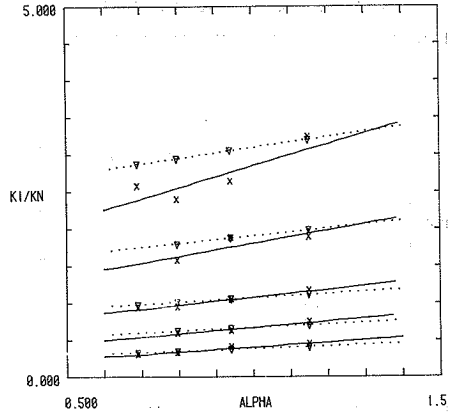
TVAERBAEREEVNER SOM FUNKTION AF GEOMETRISK PARAMETER.



BEREGNET OG MAALT TVAERBAEREEVNE, TILFAELDE XX12.

MAALT : x, REGRESSION : FULDT OPTRUKKET
 BEREGNET : v, REGRESSION : PRIKKET.

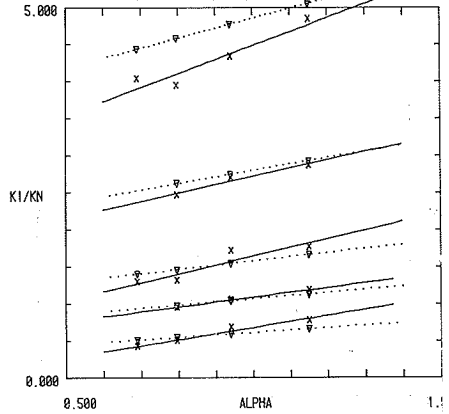
TVAERBAEREEVNER SOM FUNKTION AF GEOMETRISK PARAMETER.



BEREGNET OG MAALT TVAERBAEREEVNE, TILFAELDE XX22.

MAALT : x, REGRESSION : FULDT OPTRUKKET
 BEREGNET : v, REGRESSION : PRIKKET.

TVAERBAEREEVNER SOM FUNKTION AF GEOMETRISK PARAMETER.



Figur 4.5.5. Målte og beregnede kurver for tværbrudkraften K_1 's variation med den geometriske parameter α .

BOEJNINGSBRUDTOEJNINGER.

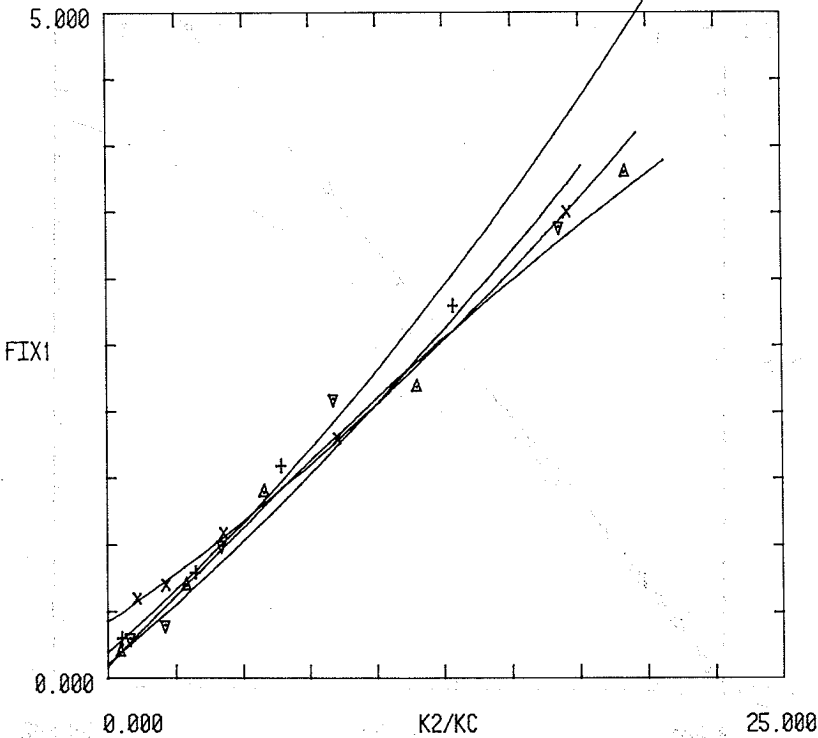
MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX11 : +

MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX12 : x

MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX21 : Δ

MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX22 : ▽

BRUDTOEJN. FIX1 I 0/00 SOM FUNKT. AF REL. KRAFT K2/KC I 0/0.

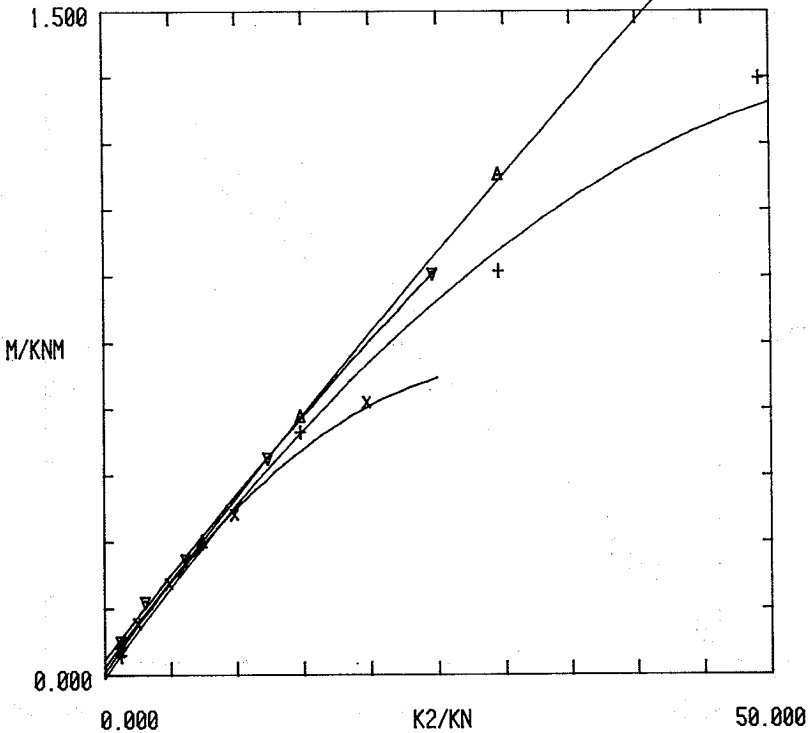


Figur 4.5.6. Brudtøjningernes variation med normal-kraftniveau'et. Brudtøjningerne er afbilledet som funktion af den relative normalkraft K_2/K_C , hvor K er trykbrudstyrken. For hver materialékombination er desuden optegnet det bedst approximerende 2. gradspolynomium.

BOEJNINGSMOMENTBRUDFLADER.

MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX11 : +
 MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX12 : x
 MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX21 : Δ
 MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX22 : ▽

BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF NORMALKRAFT K2.



Figur 4.5.7. Målte brudflader for bøjningsmomentet som funktion af normalkraften. Målepunkterne er for hver materialekombination ved mindste kvadraters metode tilnærmet med et 2. gradspolynomium.

VRIDNINGSMOMENTBRUDFLADER.

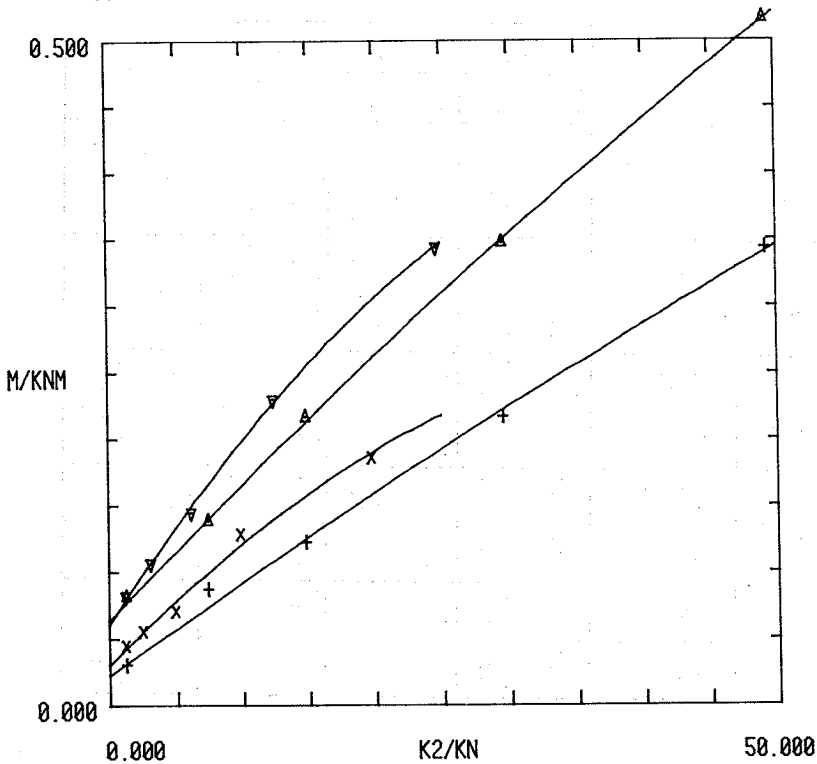
MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX11 : +

MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX12 : x

MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX21 : Δ

MAALEPUNKTER, TILFAELDE XX22 : ▽

BRUDMOMENTER M SOM FUNKTION AF NORMALKRAFT K2.



Figur 4.5.8. Målte brudflader for vridningsmomentet som funktion af normalkraften. Målepunkterne er for hver materialekombination ved mindste kvadraters metode tilnærmet med et 2. gradspolynomium.

Tabel 4.5.1.

Øversigt over hvorledes forsøgene svarende til de forskellige kombinationer er gennemført. Der er anvendt følgende betegnelser:

÷ : ikke gennemført

* : gennemført, men uden måling med ekstensometre.

** : gennemført med fuld instrumentering.

		$\alpha = \alpha_1$		$\alpha = \alpha_2$		$\alpha = \alpha_3$		$\alpha = \alpha_4$	
		1XXX		2XXX		3XXX		4XXX	
		K 100 1X1X	KC 50/50 1X2X	K 100 2X1X	KC 50/50 2X2X	K 100 3X1X	KC 50/50 3X2X	K 100 4X1X	KC 50/50 4X2X
$K_2 = K_{2,1}$ X1XX	Massiv sten X1X1	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 **	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 **	1 * 1 * 2 * 2 * 3 ** 3 **	1 * 1 * 2 * 2 * 3 ** 3 **	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 * 2 * 3 ÷ 3 ÷	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	
	Hulsten X1X2	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 **	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 **	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 **	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 **	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	
$K_2 = K_{2,2}$ X2XX	Massiv sten X2X1	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ÷ 3 **	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 **	1 ÷ 1 * 2 ** 2 ** 3 ÷ 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 ÷ 1 ÷ 2 ÷ 2 ÷ 3 ÷ 3 ÷	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	
	Hulsten X2X2	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 ÷	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 ÷	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 ÷ 3 *	1 ÷ 1 ÷ 2 ÷ 2 ÷ 3 ÷ 3 ÷	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	
$K_2 = K_{2,3}$ X3XX	Massiv sten X3X1	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 **	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 **	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	
	Hulsten X3X2	1 ** 1 ** 2 ÷ 2 * 3 ** 3 **	1 ** 1 ** 2 * 2 * 3 ** 3 **	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 ÷ 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 ÷ 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	
$K_2 = K_{2,4}$ X4XX	Massiv sten X4X1	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ÷ 3 **	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 **	1 ÷ 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 ÷ 1 ÷ 2 ÷ 2 ÷ 3 ÷ 3 ÷	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	
	Hulsten X4X2	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 ÷	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 ÷	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 ÷ 1 ÷ 2 ÷ 2 ÷ 3 ÷ 3 ÷	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	
$K_2 = K_{2,5}$ X5XX	Massiv sten X5X1	1 * 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 ÷	1 * 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 ÷	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 ÷ 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 ÷ 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	
	Hulsten X5X2	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 **	1 ** 1 ** 2 ** 2 ** 3 ** 3 **	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 ÷ 3 ÷	1 * 1 * 2 * 2 * 3 ** 3 *	1 * 1 * 2 ** 2 ** 3 * 3 *	

Tabel 4.5.2.

Lagringstider og målte mørteltrykstyrker for vridebøjeprovelegemer.

		1XXX		2XXX		3XXX		4XXX	
		XX11 og XX12	XX21 og XX22	XX11 og XX12	XX21 og XX22	XX11 og XX12	XX21 og XX22	XX11 og XX12	XX21 og XX22
X1XX	Lagringstid(døgn)	180	180	210	210	189	189	168	168
	Mørteltrykstyrke. (mN/m ²)	0.99 1.30 1.28	4.55 3.53 3.51	1.31 0.74 /	3.25 3.30 3.13	1.24 1.14 1.54	3.69 4.48 4.38	1.40 1.09 1.31	3.69 3.70 3.43
	Middel	1.19	3.86	1.03	3.23	1.31	4.18	1.27	3.61
X2XX	Lagringstid(døgn)	184	184	192	192	189	189	/	/
	Mørteltrykstyrke. (mN/m ²)	1.07 0.86 1.17	3.86 4.09 4.23	1.44 1.19 1.36	3.83 3.95 3.86	/	3.28 3.92 /	/	/
	Middel	1.03	4.06	1.33	3.88	1.41 ^{*)}	3.60	/	/
X3XX	Lagringstid(døgn)	190	190	194	194	170	170	124	124
	Mørteltrykstyrke. (mN/m ²)	1.41 1.14 1.44	4.87 4.67 4.07	1.27 1.22 1.42	3.92 4.32 4.00	/	3.47 3.60 3.58	1.50 1.45 1.61	2.88 3.23 2.54
	Middel	1.33	4.53	1.30	4.08	1.49	3.55	1.52	2.88
X4XX	Lagringstid(døgn)	194	194	187	187	172	172	/	/
	Mørteltrykstyrke. (mN/m ²)	1.81 1.62 1.71	4.17 4.02 3.99	1.47 1.47 1.59	3.49 3.31 3.51	0.96 1.25 /	3.22 3.55 3.35	/	/
	Middel	1.71	4.06	1.51	3.43	1.11	3.37	/	/
X5XX	Lagringstid(døgn)	192	192	185	185	168	168	266	120
	Mørteltrykstyrke. (mN/m ²)	1.61 1.52 1.83	3.70 3.74 /	1.53 1.47 1.52	3.49 3.73 3.41	1.05 1.05 1.21	3.34 3.82 3.99	0.61 ^{**)}	5.04 5.52 5.14
	Middel	1.65	3.72	1.51	3.54	1.10	3.72	0.74	5.23

*) Ingen prøvelegemer, middelværdien for de foregående forsøg 45XX og 31XX er anvendt.

***) Mørteltrykstyrken bestemt efter 156 døgn.

Tabel 4.5.3.

Trykstyrker for materialekombinationerne 11, 12, 21 og 22. Lagringstid 121 døgn.

		11	12	21	22
Trykstyrker.	1	20.8	11.1	24.1	13.8
Vridebøje- prøvelegemer (mN/m ²)	2	19.6	10.2	19.0	11.3
	3	18.7	8.6	22.8	12.7
Middel (mN/m ²)		19.7	9.9	22.0	12.6
spredning (%)		5.2	12.4	12.1	10.1
Mørteltryk- styrker (mN/m ²)		1.46		4.47	

Tabel 4.5.4.

Brudtøjningerne φ_1 i o/oo for kombinationer af normalkraft og materialevalg.

	X1XX	X2XX	X3XX	X4XX	X5XX
XX11	0.3	0.8	1.6	2.8	5.8
XX12	0.6	0.7	1.1	1.8	3.5
XX21	0.2	0.7	1.4	2.2	3.8
XX22	0.3	0.4	1.0	2.1	3.4

Tabel 4.5.5.

Værdier for tværbrudkraften K_1
for materialekombinationen XX11.

		$\alpha = 1.149$	$\alpha = 0.940$	$\alpha = 0.795$	$\alpha = 0.689$
K_2 (kN)		K_1 (kN)	K_1 (kN)	K_1 (kN)	K_1 (kN)
1.25	1	0.292	0.332	0.295	0.251
	2	0.259	-	0.304	0.250
	3	0.335	0.311	0.293	-
7.39	1	1.564	-	1.276	-
	2	1.547	1.470	1.286	-
	3	-	-	1.418	-
14.78	1	2.569	2.531	1.402	2.324
	2	2.275	2.482	2.003	2.349
	3	2.428	2.656	2.105	2.474
29.53	1	4.359	-	3.404	-
	2	4.399	3.991	3.437	-
	3	-	3.323	3.818	-
49.24	1	5.776	6.002	-	5.926
	2	4.721	4.139	5.203	5.832
	3	6.246	4.416	5.311	-

Tabel 4.5.6.

Værdier for tverbrudkraften K_1
for materialekombinationen XX12.

		$\alpha = 1.149$	$\alpha = 0.940$	$\alpha = 0.795$	$\alpha = 0.689$
K_2 (kN)		K_1 (kN)	K_1 (kN)	K_1 (kN)	K_1 (kN)
1.24	1	0.441	-	0.389	0.302
	2	0.457	0.428	0.307	0.312
	3	0.460	0.398	0.326	0.326
2.47	1	0.722	0.621	0.586	-
	2	0.747	0.613	0.611	-
	3	0.767	0.648	-	-
4.93	1	1.143	1.082	0.954	0.964
	2	-	1.024	0.952	0.954
	3	1.200	-	-	0.914
9.86	1	1.906	1.882	1.473	-
	2	1.932	1.939	1.606	-
	3	1.828	1.826	1.650	-
19.72	1	3.037*)	2.704	2.702	2.826
	2	3.305	2.563	2.088	2.191
	3	3.390	2.671	-	2.753

*) mindre målefejl.

Tabel 4.5.7.

Værdier for tverbrudkraften K_1
for materialekombinationen XX21.

		$\alpha = 1.149$	$\alpha = 0.940$	$\alpha = 0.795$	$\alpha = 0.689$
K_2 (kN)		K_1 (kN)	K_1 (kN)	K_1 (kN)	K_1 (kN)
1.25	1	-	0.502	0.640	0.549
	2	0.656	0.504	0.567	0.480
	3	0.625	-	0.667	0.456
7.39	1	1.716	1.667	1.519	-
	2	1.857	1.659	1.550	-
	3	1.828	1.700	1.507	-
14.78	1	3.073	2.996	2.790	2.677
	2	3.035	3.111	2.386	2.648
	3	3.442	3.202	2.733	2.787
29.54	1	5.485	5.382	4.865	-
	2	5.752	5.465	4.594	-
	3	5.346	5.048	5.062	-
49.25	1	8.612	6.623	7.088	7.381
	2	8.598	7.156	6.172*)	7.745
	3	-	5.504	6.812	7.698

*) mindre målefejl.

Tabel 4.5.8.

Verdier for tverbrudkraften K_1
for materialekombinationen XX22.

		$\alpha = 1.149$	$\alpha = 0.940$	$\alpha = 0.795$	$\alpha = 0.689$
K_2 (kN)		K_1 (kN)	K_1 (kN)	K_1 (kN)	K_1 (kN)
1.24	1	0.806	0.697	0.597	0.419
	2	0.812	0.643	0.446	0.427
	3	0.723	0.714	0.479	0.457
3.08	1	1.174	1.005	0.864	-
	2	1.214	1.085	1.019	-
	3	-	1.085	0.983	-
6.17	1	1.765	1.763	1.386	1.280
	2	-	1.694	1.219	1.340
	3	1.773	1.737	1.352	1.282
12.32	1	2.930	2.536	2.485	-
	2	2.809	2.775	2.445	-
	3	-	2.803	-	-
24.64	1	4.893	4.115	3.866	3.753
	2	4.783	4.812	4.028	4.271
	3	4.865	4.084	-	4.105

Tabel 4.5.9.

Brudmomenter for materialekombination XX11.
Der er midlet over fuger 1 og 2, samt over
gentagelser. Spredningerne $s\{M_{x1}\}$ og $s\{M_{x2}\}$
angiver de vægtede middelværdier, middel
over α .

K_2 (kN)	$s\{M_{x1}\}$ (kNm)	$s\{M_{x2}\}$ (kNm)	$\alpha = 1.149$		$\alpha = 0.0940$		$\alpha = 0.795$		$\alpha = 0.689$	
			M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)
1.25	0.012	0.016	0.043	0.029	0.060	0.025	0.044	0.041	0.047	0.025
7.39	0.023	0.031	0.304	0.094	0.330	0.072	0.287	0.092		
14.78	0.037	0.032	0.516	0.135	0.573	0.135	0.533	0.109	0.582	0.115
29.53	0.087	0.043	0.919	0.271	0.867	0.225	0.939	0.178		
49.24	0.120	0.062	1.308	0.342	1.140	0.395	1.449	0.281	1.621	0.333

Tabel 4.5.10.

Brudmomenter for materialekombination XX12.
Der er midlet over fuger 1 og 2, samt over
gentagelser. Spredningerne $s\{M_{x1}\}$ og $s\{M_{x2}\}$
angiver de vægtede middelværdier, middel
over α .

K_2 (kN)	$s\{M_{x1}\}$ (kNm)	$s\{M_{x2}\}$ (kNm)	$\alpha = 1.149$		$\alpha = 0.940$		$\alpha = 0.795$		$\alpha = 0.689$	
			M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)
1.24	0.012	0.015	0.054	0.055	0.068	0.042	0.052	0.046	0.057	0.036
2.47	0.010	0.014	0.124	0.062	0.110	0.057	0.117	0.050		
4.93	0.015	0.020	0.204	0.091	0.212	0.070	0.203	0.066	0.210	0.062
9.86	0.026	0.029	0.353	0.135	0.391	0.124	0.352	0.129		
19.72	0.068	0.038	0.651	0.233	0.560	0.205	0.589	0.143	0.653	0.151

Tabel 4.5.11.

Brudmomenter for materialekombination XX21. Der er midlet over fuger 1 og 2, samt over gentagelser. Spredningerne $s\{M_{x1}\}$ og $s\{M_{x2}\}$ angiver de vægtede middelværdier, middel^{x2} over α .

K_2 (kN)	$s\{M_{x1}\}$ (kNm)	$s\{M_{x2}\}$ (kNm)	$\alpha = 1.149$		$\alpha = 0.940$		$\alpha = 0.795$		$\alpha = 0.689$	
			M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)
1.25	0.033	0.067	0.067	0.087	0.070	0.067	0.077	0.110	0.064	0.066
7.39	0.014	0.020	0.284	0.163	0.324	0.125	0.302	0.128		
14.78	0.026	0.045	0.540	0.268	0.615	0.230	0.571	0.180	0.607	0.194
29.54	0.050	0.055	1.085	0.402	1.125	0.379	1.177	0.269		
49.25	0.088	0.084	1.789	0.580	1.390	0.590	1.648	0.455	1.942	0.459

Tabel 4.5.12.

Brudmomenter for materialekombination XX22. Der er midlet over fuger 1 og 2, samt over gentagelser. Spredningerne $s\{M_{x1}\}$ og $s\{M_{x2}\}$ angiver de vægtede middelværdier, middel^{x2} over α .

K_2 (kN)	$s\{M_{x1}\}$ (kNm)	$s\{M_{x2}\}$ (kNm)	$\alpha = 1.149$		$\alpha = 0.940$		$\alpha = 0.795$		$\alpha = 0.689$	
			M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)	M_{x1} (kNm)	M_{x2} (kNm)
1.24	0.025	0.042	0.053	0.118	0.095	0.088	0.077	0.069	0.076	0.053
3.08	0.022	0.028	0.152	0.139	0.177	0.105	0.177	0.091		
6.17	0.025	0.034	0.261	0.176	0.286	0.182	0.251	0.127	0.258	0.129
12.32	0.025	0.037	0.485	0.250	0.405	0.237	0.503	0.205		
24.64	0.082	0.056	0.916	0.377	0.858	0.378	0.866	0.318	0.989	0.299

Tabel 4.5.13.

Brudmomenter.

Der er midlet over fuger 1 og 2, over gentagelser, samt over α . Spredningerne $s\{M_{X1}\}$ og $s\{M_{X2}\}$ angiver spredningerne på middelværdierne af brudmomenterne.

		Mørtel K 100 XX1X					Mørtel KC 50/50 XX2X				
		K_2 (kN)	M_{X1} (kNm)	$s\{M_{X1}\}$ (%)	M_{X2} (kNm)	$s\{M_{X2}\}$ (%)	K_2 (kN)	M_{X1} (kNm)	$s\{M_{X1}\}$ (%)	M_{X2} (kNm)	$s\{M_{X2}\}$ (%)
Massive sten. XXX1		1.25	0.047	6.0	0.031	12.1	1.25	0.070	4.7	0.082	17.8
		7.39	0.300	2.9	0.089	10.4	7.39	0.303	1.7	0.130	4.4
		14.78	0.551	1.8	0.123	5.5	14.78	0.583	1.4	0.218	5.0
		29.53	0.913	2.6	0.218	7.1	29.54	1.129	1.3	0.348	5.4
		49.24	1.348	3.7	0.344	4.8	49.25	1.683	4.7	0.516	4.2
Hul- sten. XXX2		1.24	0.057	4.7	0.045	7.7	1.24	0.079	6.5	0.082	11.9
		2.47	0.117	2.4	0.057	6.3	3.08	0.170	3.4	0.108	8.0
		4.93	0.208	1.7	0.071	7.5	6.17	0.264	2.2	0.146	7.4
		9.86	0.366	2.1	0.129	5.3	12.32	0.495	2.8	0.231	5.1
		19.72	0.615	2.8	0.187	6.1	24.64	0.911	2.7	0.345	4.2

Tabel 4.5.14.

Koefficienter til eksperimentelt bestemte brudflader (K/kN, M/kNm) ved curvefit med 2.gradspolynomium.

	Tilfælde	a_0	a_1	a_2
Bøjende moment M_{X1}	XX11	$-4.46 \cdot 10^{-3}$	$4.22 \cdot 10^{-2}$	$-3.24 \cdot 10^{-4}$
	XX12	$6.77 \cdot 10^{-3}$	$4.43 \cdot 10^{-2}$	$-7.08 \cdot 10^{-4}$
	XX21	$2.05 \cdot 10^{-2}$	$3.91 \cdot 10^{-2}$	$-0.657 \cdot 10^{-4}$
	XX22	$3.78 \cdot 10^{-2}$	$3.86 \cdot 10^{-2}$	$-1.32 \cdot 10^{-4}$
Vridende moment M_{X2}	XX11	$2.33 \cdot 10^{-2}$	$7.16 \cdot 10^{-3}$	$-0.142 \cdot 10^{-4}$
	XX12	$3.17 \cdot 10^{-2}$	$10.13 \cdot 10^{-3}$	$-1.06 \cdot 10^{-4}$
	XX21	$6.49 \cdot 10^{-2}$	$10.47 \cdot 10^{-3}$	$-0.267 \cdot 10^{-4}$
	XX22	$6.18 \cdot 10^{-2}$	$15.36 \cdot 10^{-3}$	$-1.56 \cdot 10^{-4}$

Kapitel 5. KONKLUSION - ANVENDELSE.

5.1. Hovedresultater.

Af de i kapitel 3 og 4 omtalte forsøg fremgår det, at der i en liggefuge som udgør en del af en vandret brudlinie kan optages et bøjende moment, og at der i en liggefuge som udgør en del af en skrå brudlinie kan optages både et vridende og et bøjende moment. Det fremgår desuden, at disse momenter kan opfattes som liggefugens flydemomenter, idet de kan regnes konstante i et relativt stort tøjningsinterval, og at de for et prøvelegeme i et interval $K_2 \in [0; K_{\max}]$ kan skrives på formen

$$\frac{M}{M_0} = a_0 + a_1 \frac{K_2}{K_0} + a_2 \left(\frac{K_2}{K_0} \right)^2 \quad (5.1.1)$$

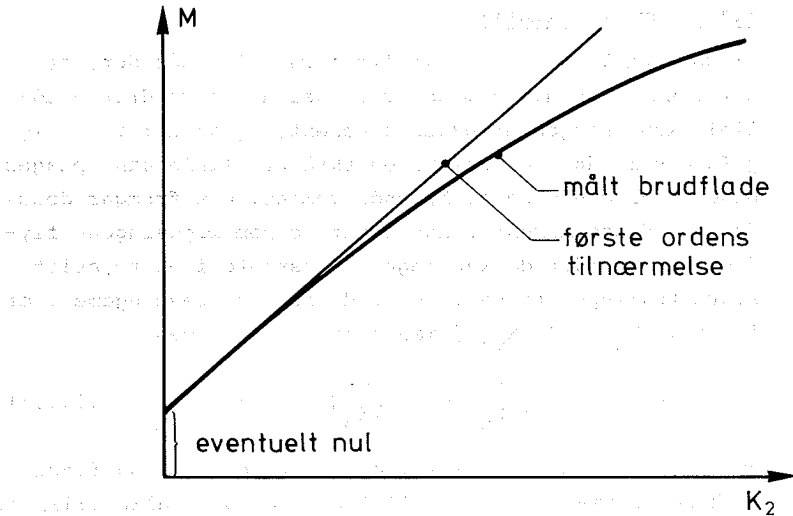
hvor $M_0 = 1 \text{ kNm}$, $K_0 = 1 \text{ kN}$, og K_2 er den på liggefugen virkende normalkraft. Koefficienterne har i alle tilfælde sådanne værdier, at brudfaldene (K_2, M) alle kvalitativt har det i figur (5.1.1) skitserede forløb. Koefficienterne er givet i tabellerne 3.5.6 og 4.5.14. For momentbrudfladernes vedkommende afviger konstanten a_0 ikke systematisk fra nul, vi kan derfor konkludere, at der for alle bøjningsmomentbrudflader gælder at

$$a_0 = 0$$

For vridningsmomentbrudfladerne afviger konstanterne a_0 derimod systematisk fra nul.

Ses der bort fra krumningsleddet, og dermed fra andenordenseffekter fra normaltrykket fås da for de bøjende momenter

$$\frac{M}{M_0} = a_1 \frac{K_2}{K_0} \quad (5.1.2)$$



Figur 5.1.1. De fundne brudfladers principielle forløb.

og for de vridende momenter

$$\frac{M}{M_0} = a_0 + a_1 \frac{K_1}{K_0}$$

Bøjningsflydemomentet m_{F1} pr. længdeenhed i vandret retning for en vandret såvel som skrå brudlinie kan da skrives

$$m_{F1} = \frac{a_1 M_0}{K_0} \cdot p \quad (5.1.3)$$

hvor p er normalkraften pr. længdeenhed i vandret retning i brudlinien.

Vridningsflydemomentet m_{F2} pr. længdeenhed i vandret retning for en skrå brudlinie kan tilsvarende skrives

$$m_{F2} = \frac{a_0 M_0}{t} + \frac{a_1 M_0}{K_0} \cdot p \quad (5.1.4)$$

Forudsat, at brudlinien som tidligere omtalt kan antages at have et regelmæssigt trappeformet forløb, hvor de i liggefugerne løbende delstykker af brudlinien alle tilnærmet kan regnes at have længden t , som her er forudsat lig med vægtykkelsen.

Man kan altså tilnærmet opfatte murværk, som er påvirket af tryknormalkræfter og bøjende og vridende momenter, således som det er forudsat her, som et generaliseret coulombmateriale, idet momenterne kan skrives

$$\left. \begin{aligned} m_{F1} &= \mu_1 \cdot p \\ m_{F2} &= c + \mu_2 \cdot p \end{aligned} \right\} \quad (5.1.5)$$

hvor c opfattes som en generaliseret kohæsion og μ som en generaliseret indre friktion.

De fundne værdier for kohæsion og friktion er for de forskellige undersøgte belastningssituationer og materialekombinationer angivet i tabel 5.1.1.

Af formel (5.1.1) kan bestemmes den største rod $K_{2,c}^*$ til ligningen $\frac{M}{M_0} = 0$. Heraf bestemmes da spændingen

$$\sigma_c^* = \frac{K_2^*}{A} \quad (5.1.6)$$

hvor A er tværsnitsarealet (vinkelret på K_2 's retning) for det pågældende prøvelegeme. Denne spænding, og den hertil svarende ved enakset trykforsøg fundne brudspænding σ_c , samt forholdet σ_c^*/σ_c er også angivet i tabel 5.1.1.

Det ses, at kohæsionen c for vridningsflydemomentet synes at være kraftigt afhængig af mørteltypen (mørtelstyrken), men tilsyneladende ikke synderlig afhængig af stentypen.

Friktionen μ for bøjende momenter i henholdsvis vandrette brudlinier og skrå brudlinier, synes at være nogenlunde uafhængig af materialet, hvorimod værdier for vandrette brudlinier $\mu \cong 0.90 \cdot t/2$ er noget større end for skrå brudlinier $\mu \cong 0.75 \cdot t/2$.

Friktionen μ for vridende momenter i de skrå brudlinier synes både at afhænge af mørteltype og stentype, således at friktionen øges med stigende mørtelstyrke, og er større for hulsten end for massive sten, d.v.s. friktionen øges med stigende ruhed af stenoverfladen, hvilket er i overensstemmelse med at brud som reget skete i skillefladen mellem sten og mørtel.

Idet normalkraften pr. længdeenhed p svarer til normalspændingen σ_0 , kan det let vises, at den her foreslåede førsteordenstilnærmelse til de fundne momentbrudflader med god tilnærmelse afviger fra disse med den relative fejl

$$\epsilon^* = \frac{1}{2} \frac{\sigma_0}{\sigma_c^*} \quad (5.1.7)$$

Til vurdering af denne fejl synes det rimeligt at benytte

$$\sigma_c^* \cong \sigma_c$$

$$\text{og altså } \epsilon^* \cong \frac{1}{2} \frac{\sigma_0}{\sigma_c} \quad (5.1.8)$$

Tabel 5.1.1.

Kohæsion og friktionsparametre for de undersøgte belastningstilfælde og materialekombinationer, samt brudspændingerne σ_c^* og σ_c .

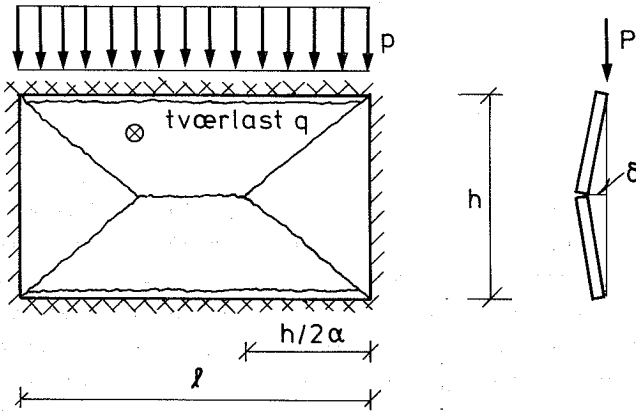
	Materialekombination.	Kohæsion C (kN)	Friktion μ (mm)	σ_c^* (MNm ²)	σ_c (MNm ²)	σ^*/σ
Vandret brudlinie. Bøjende moment	11	0.	44.8	21.3	21.3	1.00
	12	0.	54.1	6.9	6.8	1.01
	21	0.	49.9	20.1	20.1	1.00
	22	0.	45.7	8.7	8.9	0.98
Skrå brudlinie. Bøjende moment	11	0.	42.2	11.2	19.7	0.57
	12	0.	44.3	5.4	9.9	0.55
	21	0.	39.1	51.0	22.0	2.32
	22	0.	38.6	25.1	12.6	1.99
Skrå brudlinie. Vridende moment	11	0.22	7.16	43.3	19.7	2.20
	12	0.29	10.1	8.3	9.9	0.84
	21	0.60	10.5	33.8	22.0	1.54
	22	0.57	15.4	8.5	12.6	0.67

5.2. Forsøgsresultaternes anvendelse.

Forsøgsresultaterne kan direkte anvendes til beregning af tværbelastede murede vægge, forudsat der kun optræder brudlinier af de i forsøgene undersøgte typer, d.v.s. vandrette brudlinier, og skrå brudlinier med hældninger i intervallet $\alpha \in [0.7; 1.15]$, at muren er muret i almindeligt løberforbandt, og i øvrigt udført af sådanne materialer at murværket kan regnes at have samme mekaniske egenskaber som en af de ved forsøgene undersøgte materialekombinationer.

En brudteoretisk undersøgelse baseret på de ved forsøgene fundne resultater, vil principielt altid, da der ikke er taget hensyn til bidrag til bæreevnen fra studsflugerne i de skrå brudlinier og til et uregelmæssigt forløb af disse, resultere i en underestimering af bæreevnen. Da man imidlertid ikke umiddelbart kan tage hensyn til de endelige bruddeformationers indflydelse (se diskussionen herom sidst i afsnit 4.5) eller til slankhedseffekternes indflydelse, og da forsøgsresultaterne som de er givet i forrige afsnit fremtræder i en tilnærmet form, må man for store normaltryk vurdere risikoen for en overestimering af bæreevnen. De endelige bruddeformationers indflydelse, og fejlen ved anvendelse af den tilnærmede fremstilling af måleresultaterne i en simpel friktionsteori, kan vurderes af formel (4.5.9) henholdsvis (5.1.7). Ved vægge hvor normalbelastningen p ikke kan regnes lille sammenlignet med bueklinglasten, må slankhedseffekterne vurderes bedre end gjort i forbindelse med udledning af formel (4.5.9).

Der skal i det følgende kort vises hvorledes resultaterne ved anvendelse af øvre værdisætningen kan benyttes til en beregning af tværbæreevnen for den i figur 5.2.1 viste væg. Væggen er simpelt understøttet langs de to lodrette rande, og indspændt, d.v.s. at flydemomentet m_{F1} kan opta-



Figur 5.2.1. Tværbelastet muret væg.
Den korrekte brudfigur er angivet.

ges, langs de to vandrette rande.

De ydre kræfters arbejde kan med de på figuren anvendte betegnelser skrives

$$A_y = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h}{3\alpha}\right) h q \delta - \Delta A \quad (5.2.1)$$

hvor ΔA er en positiv størrelse, hidrørende fra arbejdet udført af belastningen p . De indre kræfters arbejde kan skrives

$$A_i = \left(8 \frac{1}{h} m_{F1} + 4 m_{F2}\right) \delta - \Delta A \quad (5.2.2)$$

hvor $-\Delta A$ er lig med normalkræfternes bidrag til de indre kræfters arbejde. Brudbetingelsen er

$$A_i = A_Y$$

⇓

$$q = \frac{16 \frac{1}{h} m_{F1} + 8 M_{F2}}{\left(1 - \frac{h}{3\alpha}\right) h} \quad (5.2.3)$$

Her er regnet med samme værdi for bøjningsflydemomentet pr. længdeenhed i den skrå og i den vandrette brudlinie. Tværbæreevnen q givet ved (5.2.3) ses at være minimum for $\alpha = \alpha_{\max}$ svarende til at de skrå brudlinier søger mod lodret. Dette vil altså ifølge teorien være den korrekte brudfigur. At dette ikke stemmer med de i litteraturen omtalte forsøg, hvor brudliniehældningen er ret konstant lig ca. 0.5 - 1.0; skyldes, at vridningsbidraget må formodes at være større for en skrå brudlinie med et uregelmæssigt forløb på grund af at hældningen afviger fra den for forbandtet naturlige hældning end for en skrå brudlinie med det helt regelmæssige forløb som er forudsat her.

5.3. Supplerende forsøg.

Skal teorien imidlertid have praktisk anvendelighed må der udføres forsøg med hele vægge til sammenligning af de direkte målte og de af teorien beregnede tværbæreevner af forskellige vægkonstruktioner. Man må nemlig formode, at det, især hvad angår kohæsionsbidraget i vridningsmomentet, vil være nødvendigt at bestemme nogle materialekonstanter på hele vægkonstruktioner, for at kunne tage hensyn til studsfugernes bidrag og de uregulære brudlinieforløb man har i praksis.

Kohæsionsbidraget kan bestemmes ved et brudforsøg med en væg som vist i figur 5.2.1 når vi sætter $p = 0$. Vi får da nemlig af formlerne (5.1.5)

$$m_{F1} = 0$$

$$m_{F2} = c$$

og dermed af (5.2.3) at

$$q = \frac{8 c}{\left(1 - \frac{h}{3\alpha}\right) h} \quad (5.3.1)$$

hvoraf c kan bestemmes.

Det må altså ved forsøg med hele vægkonstruktioner bestemmes hvilke værdier for kohæsions- og friktionsparametrene der skal anvendes i praksis, og der bør på grundlag heraf da søges udviklet enten formler eller simple forsøg hvoraf de kan bestemmes for et givet murværksmateriale, således at der her igennem kan tages hensyn til specielle hærtningsbetingelser, fugtforhold, andre materialekombinationer, o.a. Desuden må det undersøges om man også for lodrette brudlinier kan definere et flydemoment, og der må i så tilfælde udvikles metoder til bestemmelse heraf.

5.4. Resume.

Der er i rapporten omtalt et relativt stort antal forsøg, som er udført med det formål, at klarlægge, om murmaterialet har sådanne egenskaber, at man med rimelighed kan anvende en plasticitetsteori til beregning af tværbelastede murede vægge.

Det fremgår af forsøgene, at en muret tværbelastet væg i brudtilstanden vil have udpræget seje egenskaber, idet murmaterialet overfor de snitkræfter (momenter), som optræder i de revnede zoner, i et relativt stort tøjningsinterval kan beskrives ved en elastoplastisk model. Det

viser sig derfor, at der kan tilskrives en muret væg to flydemomenter, som afhænger dels af materialevalget, og dels af den vinkelret på liggefugerne virkende normal-kraft, på grundlag af hvilke man kan bestemme tværbæreevnen for vægge i hvilke der i brudtilstanden opstår vandrette og skrå brudlinier.

Brudfladerne, som beskriver hvilke kombinationer af moment og normalkraft som giver brud, viser sig tilnærmet at være coulombbrudflader. Der er undersøgt 2 mørteltyper (K 100 og KC 50/50 efter [16]) og to stentyper (en massiv sten og en hulsten), og normalkraftens indflydelse er undersøgt i det for de normale brugsspændinger aktuelle interval.

Den på grundlag af materialeforsøgene udledte teori må dog formodes at underestimere tværbæreevnen stærkt for små normalkræfter, idet der ved teoriens udledning er set bort fra visse bidrag, som i praksis må antages at have en ikke ubetydelig indflydelse på tværbæreevnen. Visse konstanter i teorien må derfor afpasses ved forsøg med hele konstruktioner, og det må undersøges hvorvidt teorien kan udvides til beregning af vægge hvor der også optræder lodrette brudlinier.

5.5. Summary.

A relatively large number of experiments are mentioned in the report. The aim of these is to clarify whether brick masonry, done in a traditional way, has such properties, that the theory of plasticity can reasonably be used for calculations applicable to lateral loaded masonry walls.

It appears from the experiments that a lateral loaded masonry wall in the state of fracture will show markedly ductile properties since the wall material with respect to the forces (moments) which occur in the crac-

ked zones can, in a relatively large range of values of strain, be described by using an elastic-plastic model. It can thus be shown that a brick masonry wall can be ascribed two yieldmoments, dependent on the chosen material, and on the in-plane force acting perpendicular to the bed joints; on this basis, an estimate of the ultimate lateral strength for walls where horizontal and slanting yieldlines occur can be determined.

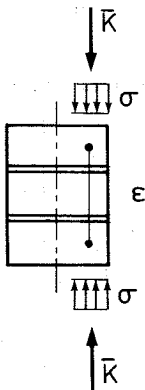
The surfaces of fracture, describing which combination of moment and vertical acting in-plane force that are giving rise to fracture, appear - in an approximated form - to be the surfaces of fracture of Coulomb. Two types of mortar, two types of bricks (with and without holes) and the influence of the vertical acting in plane force have been examined in the actual range of values of the normally occurring normal stresses.

However, the theory derived from the experiments must be expected to considerably underestimate the ultimate lateral strength for small values of the vertical acting edgeloading, as certain contributions which, in practice, must be supposed to have considerable influence on the ultimate strength, are ignored when deriving the theory. Various constants in the theory must therefore be adjusted by experiments with the wall as a whole, and examinations must be carried out as to how the theory can be extended for calculations of walls where vertical yieldlines also occur.

APPENDIX A. ARBEJDSKURVER FOR TRYKFORSØG.A1. Generelt om målte kurver.

I det følgende er bragt alle de målte arbejdskurver for materialekombinationen 21, d.v.s. at den anvendte mørtel er en KC 50/50 og den anvendte sten er en massiv sten skåret med tråd.

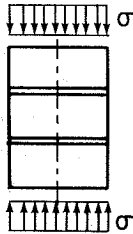
Spændingen σ er afbildet som funktion af længdetøjningen ϵ , hvor σ er bestemt som en jævnt fordelt spænding på den på figur A.1.1 viste måde, og ϵ er længdetøjningen i kraftens angrebslinie. Det skal nævnes, at der ved påskrivning af grænser på akserne er anvendt programmeringsnotation, således at f.eks. påskrivningen $\emptyset.5\emptyset E+\emptyset 2$ skal opfattes som tallet $0.5 \cdot 10^2 = 50$.



Figur A.1.1. Bestemmelse af tøjning og spænding.

A.2. Belastningstilfælde 1.

Belastningstilfældet er beskrevet i figur A.2.1.

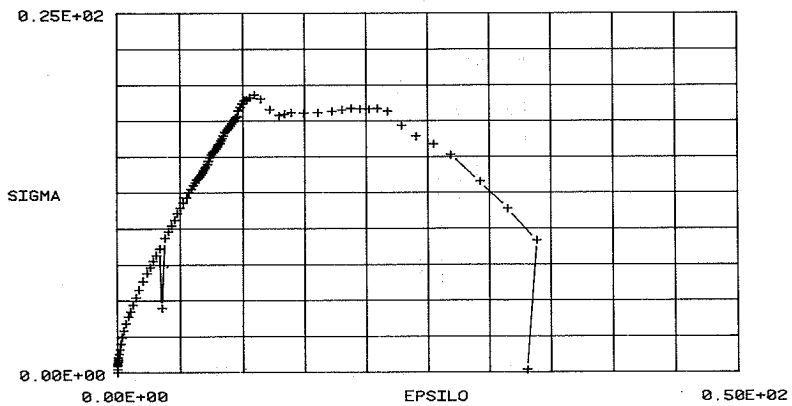


Figur A.2.1.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T121.1.
 FORSOEG UDFOERT D. 3. 4. 78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 0. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I 0/00.



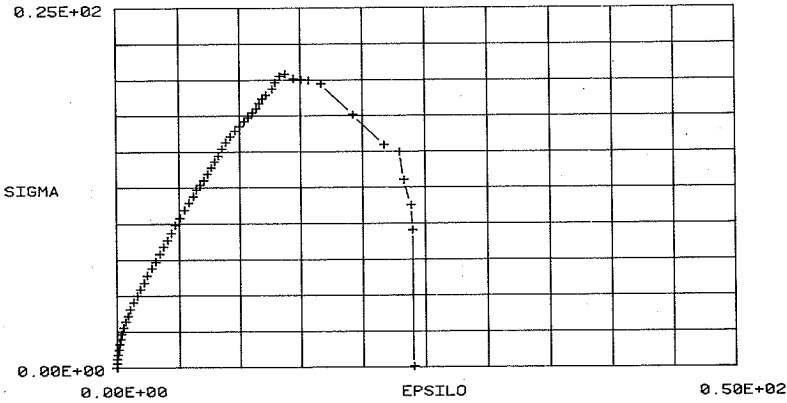
Figur A.2.2.

A.3

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T121.2.
FORSOEG UDFOERT D. 3. 4.78.
NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 0. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I 0/00.

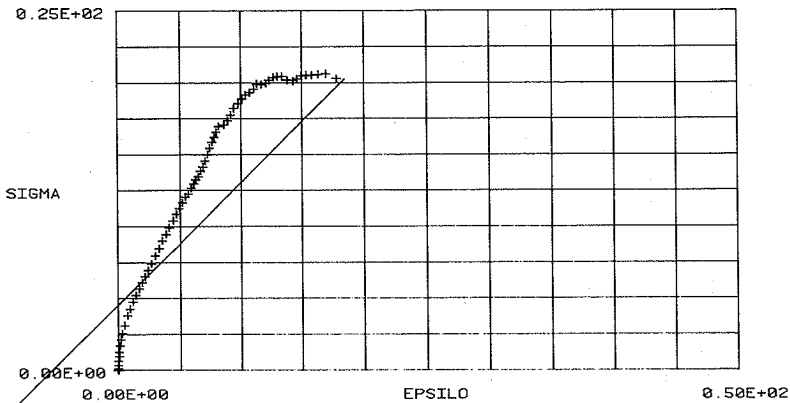


Figur A.2.3.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T121.3.
FORSOEG UDFOERT D. 3. 4.78.
NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 0. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I 0/00.

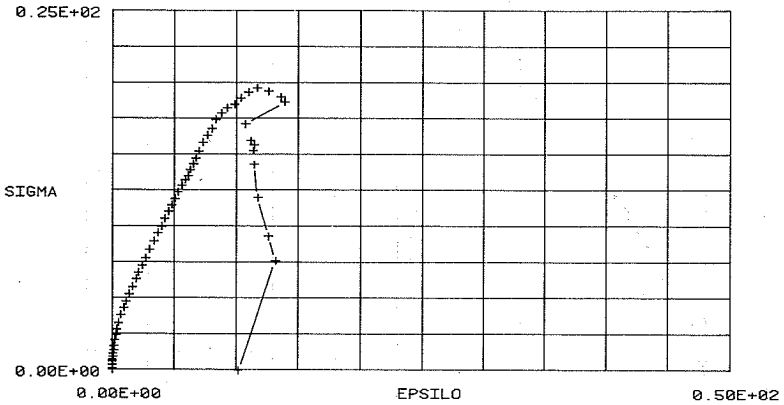


Figur A.2.4.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T121.4.
 FORSOEG UDFOERT D. 3. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 0. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I 0/00.

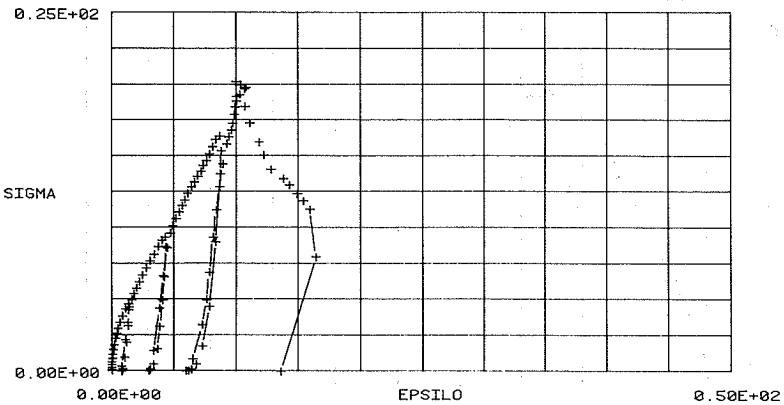


Figur A.2.5.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T121.5.
 FORSOEG UDFOERT D. 3. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 0. MM.

MAALEPUNKTER : +

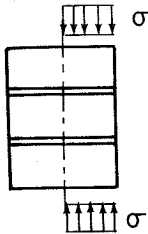
NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I 0/00.



Figur A.2.6.

A.3. Belastningstilfælde 2.

Belastningstilfældet er bestemt i figur A.3.1.

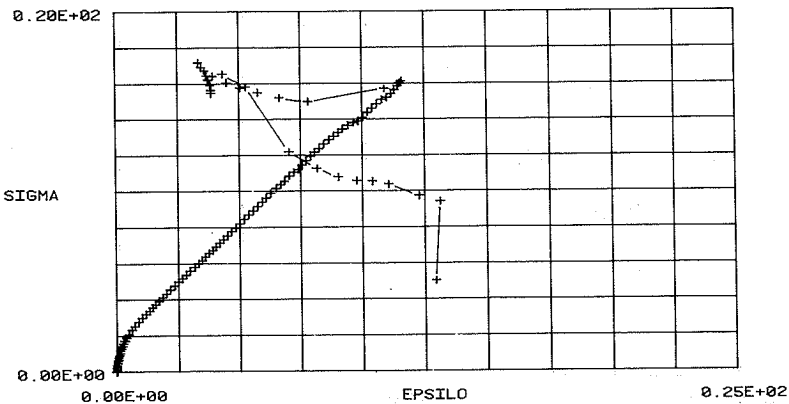


Figur A.3.1.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T221.1.
 FORSOEG UDFOERT D. 4. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 27. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/OO.

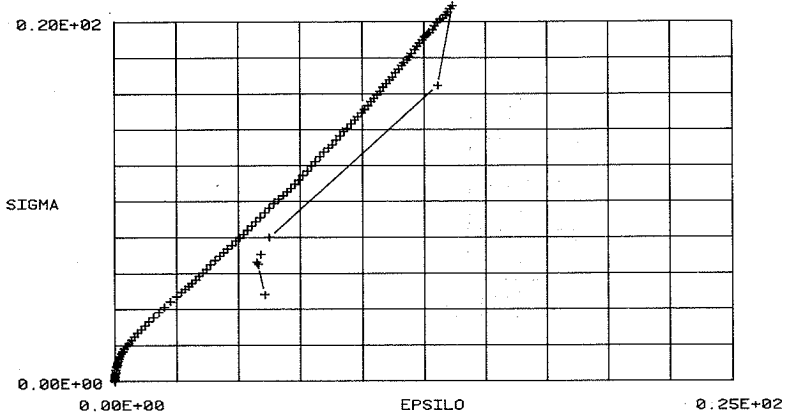


Figur A.3.2.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T221.2.
 FORSOEG UDFOERT D. 4. 4.78.
 NORMALKRAFTKSENTRICITET : 27. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/OO.

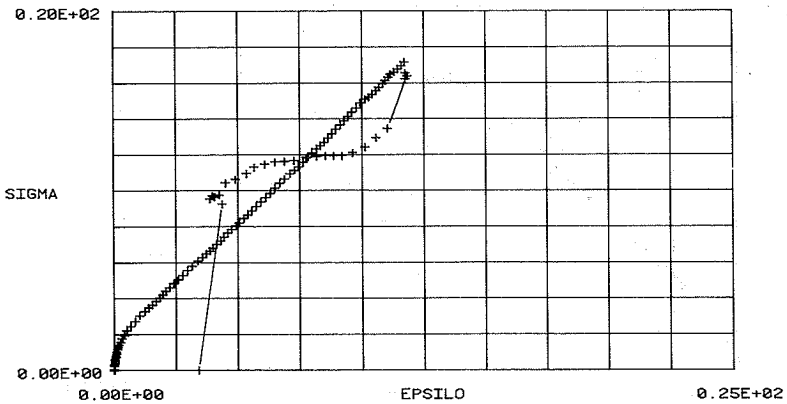


Figur A.3.3.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T221.3.
 FORSOEG UDFOERT D. 4. 4.78.
 NORMALKRAFTKSENTRICITET : 27. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/OO.



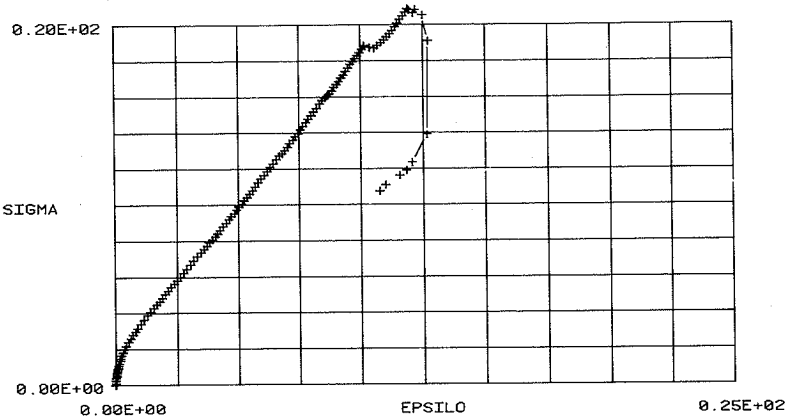
Figur A.3.4.

A.7

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T221.4.
 FORSOEG UDFOERT D. 4. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 27. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/00.

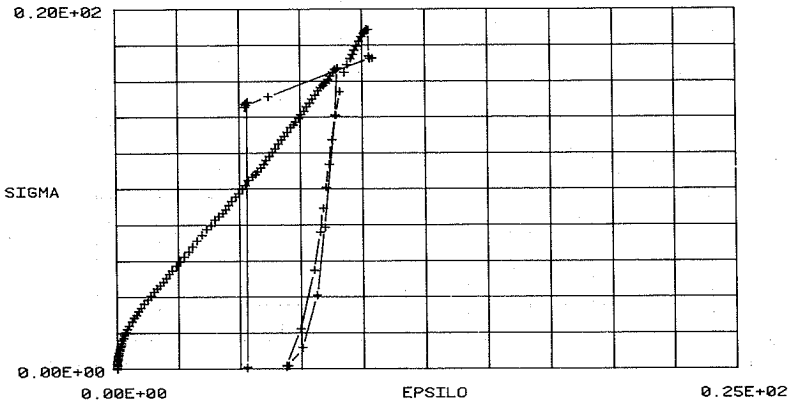


Figur A.3.5.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T221.5.
 FORSOEG UDFOERT D. 4. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 27. MM.

MAALEPUNKTER : +

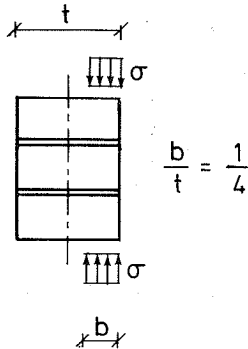
NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/00.



Figur A.3.6.

A.4. Belastningstilfælde 3.

Belastningstilfældet er beskrevet i figur A.4.1.

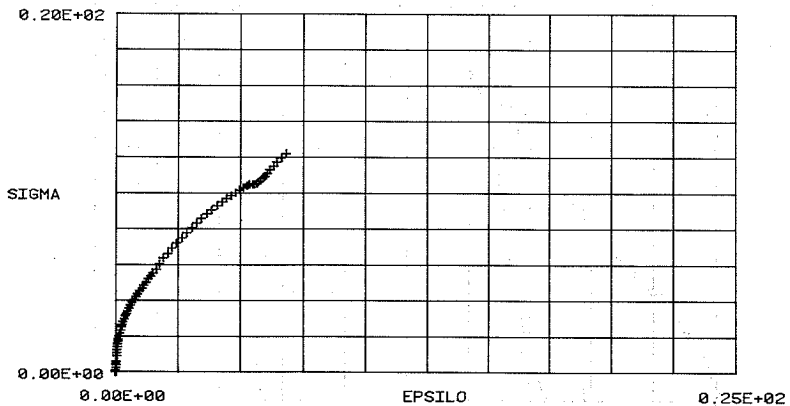


Figur A.4.1.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T321.1.
 FORSOEG UDFOERT D. 5. 4. 78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 40. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/00.

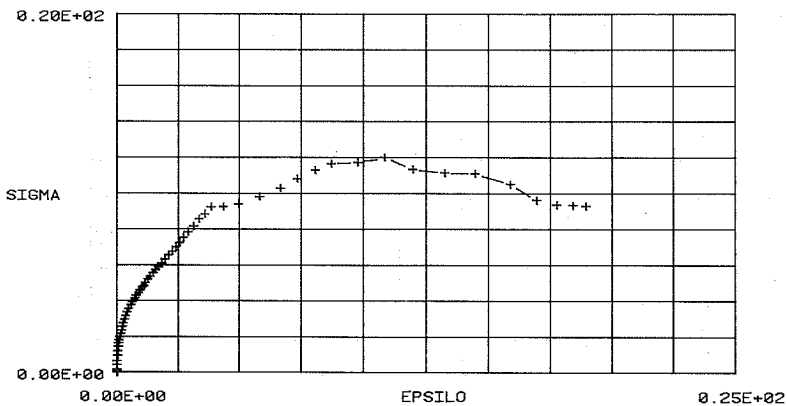


Figur A.4.2.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T321.2.
 FORSOEG UDFOERT D. 5. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 40. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/00.

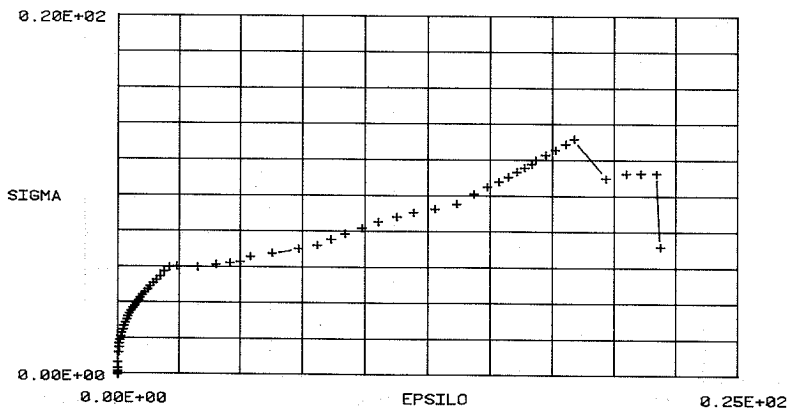


Figur A.4.3.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T321.3.
 FORSOEG UDFOERT D. 5. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 40. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/00.

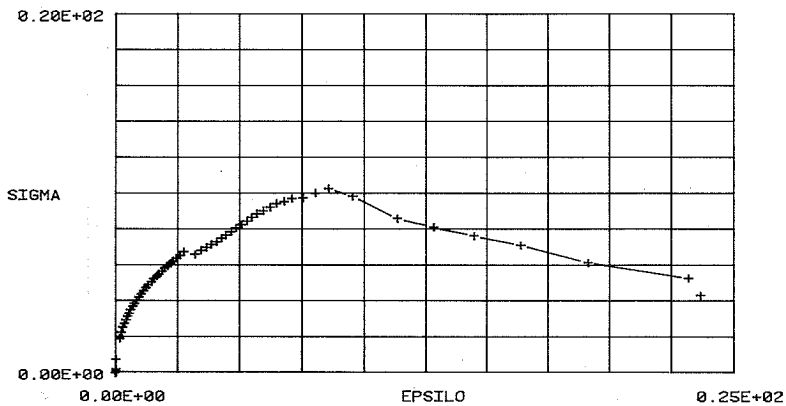


Figur A.4.4.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T321.4.
 FORSOEG UDFOERT D. 5. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 40. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/OO.

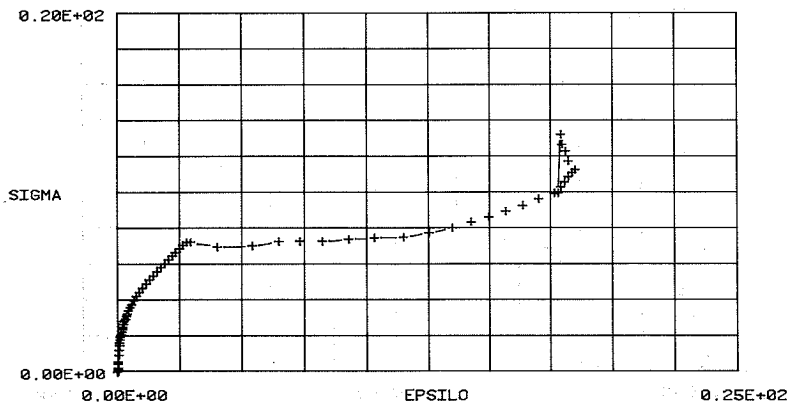


Figur A.4.5.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T321.5.
 FORSOEG UDFOERT D. 5. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 40. MM.

MAALEPUNKTER : +

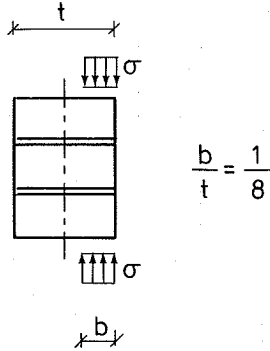
NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/OO.



Figur A.4.6.

A.5. Belastningstilfælde 4.

Belastningstilfældet er beskrevet i figur A.5.1.

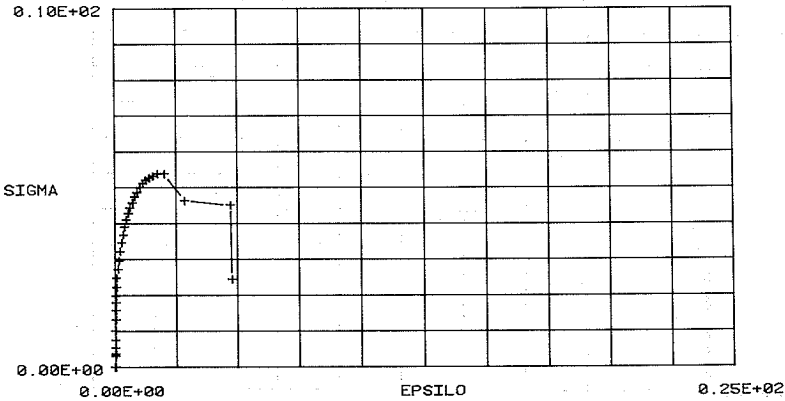


Figur A.5.1.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T421.1.
 FORSOEG UDFOERT D. 6. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 47. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M² SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/OO.

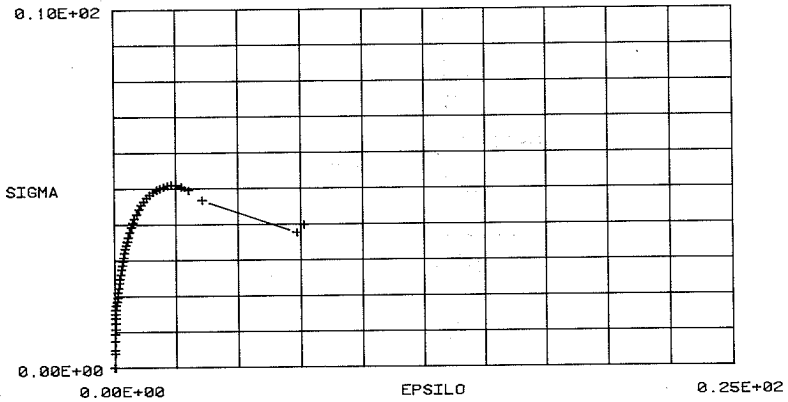


Figur A.5.2.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T421.2.
 FORSOEG UDFOERT D. 6. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 47. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/OO.

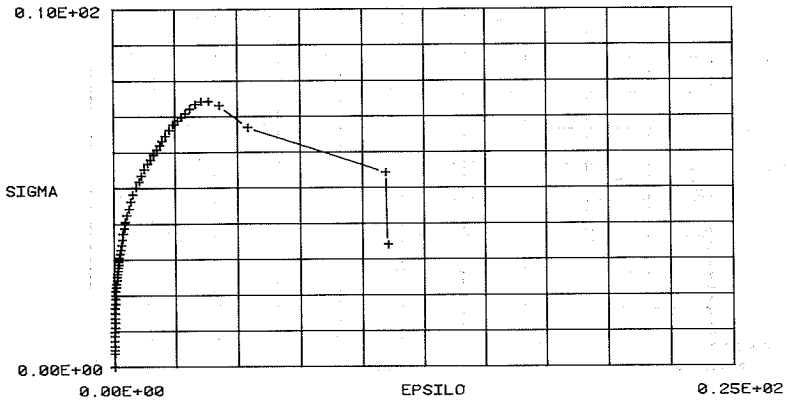


Figur A.5.3.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T421.3.
 FORSOEG UDFOERT D. 6. 4.78.
 NORMALKRAFTEKSENTRICITET : 47. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/OO.

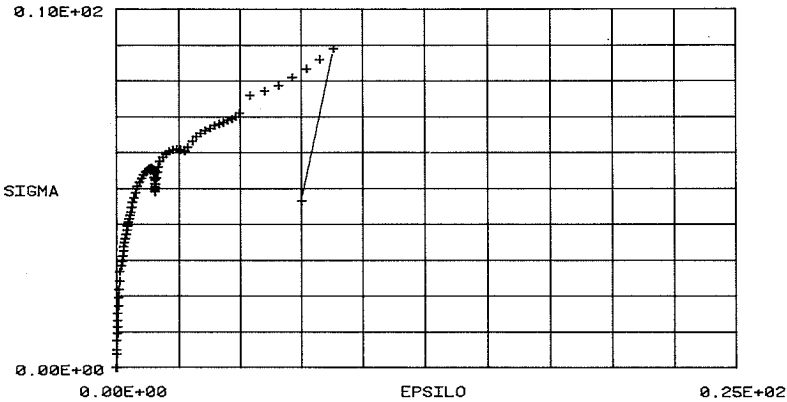


Figur A.5.4.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T421.4.
 FORSOEG UDFOERT D. 6. 4.78.
 NORMALKRAFTKSENTRICITET : 47. MM.

MAALEPUNKTER : +

NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/00.

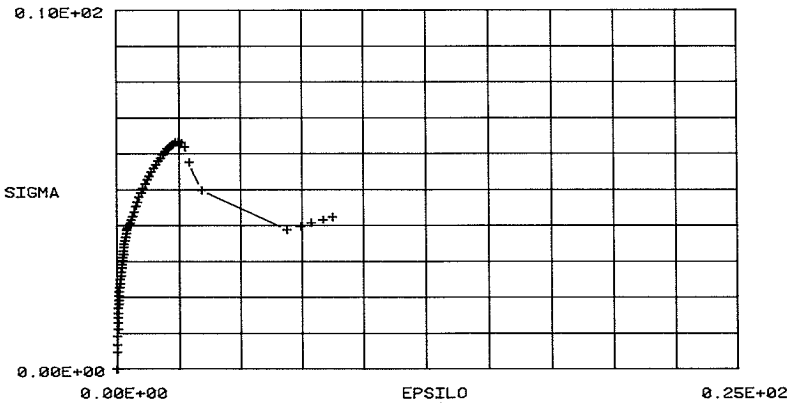


Figur A.5.5.

ARBEJDSKURVE FOR FORSOEGSTILFAELDE T421.5.
 FORSOEG UDFOERT D. 6. 4.78.
 NORMALKRAFTKSENTRICITET : 47. MM.

MAALEPUNKTER : +

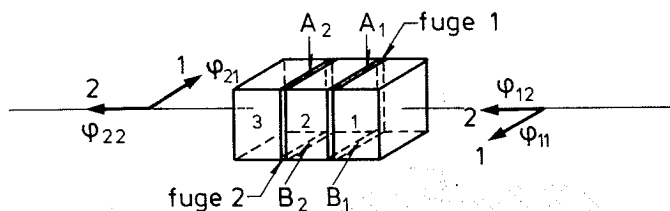
NORMALSPAENDING I MN/M2 SOM FUNKTION AF NORMALTOEJNING I O/00.



Figur A.5.6.

APPENDIX B. EKSTENSOMETRE.B.1. Målebehov.

I dette afsnit beskrives udviklingen af de ekstensometre, som benyttedes til tøjningsmålinger på de prøvelegemer som blev anvendt til forsøgene med kombineret vridning og bøjning.

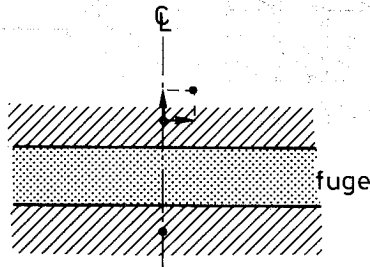


Figur B.1.1

De tøjningsstørrelser, man primært er interesseret i, er de tøjningsstørrelser, der er knyttet direkte til de vridende og bøjende momenter i fugerne og må altså være de på fig. B.1.1 viste vinkeldrejninger φ_{11} , φ_{12} , φ_{21} , φ_{22} . Vinklen φ_{21} er da f.eks. den gensidige vinkeldrejning af sten 3 i forhold til sten 2 omkring den viste akse - positivt orienteret i overensstemmelse med højreskrureglen.

Stenene betragtes altså i denne forbindelse som stive legemer der bevæger sig i forhold til hinanden ved deformationer i fugerne. Selv med denne antagelse ville det kræve

i alt $6 + 6 = 12$ flytningsmålinger for at bestemme f.eks. de relative flytninger af stenene 1 og 3 i forhold til sten 2. Vi vil imidlertid ikke bestemme hele flytningsfeltet, men blot bestemme de ovenfor omtalte vinkeldrejninger samt de dertil hørende omdrejningsaksers beliggenhed i det lodrette plan. Dette gøres på følgende måde: Prøvelegemet har 2 fuger på oversiden og 2 fuger på undersiden. Disse betegnes henholdsvis A_1 , A_2 og B_1 , B_2 , se fig. B.1.1. I midtpunktet af hver af disse måles 2 flytninger af yderstenen i forhold til midterstenen, en



Figur B.1.2.

vinkelret på fugen, og en parallel med denne. Ideen er altså, at der på prøvelegemets overflade måles $4 + 4 = 8$ flytningsstørrelser, som ganske vidst ikke sætter os i stand til at bestemme hele flytningsfeltet, men som vi kan konvertere til de tøjningsstørrelser som interesserer os mest, nemlig i første omgang vinkeldrejningerne

φ_{ij} , og dernæst de dertil hørende nullinieafstande x_{ij} målt fra enten overside eller underside af prøvelegemet; vi vælger at måle disse nullinieafstande fra oversiden af prøvelegemet.

B.2. Funktionsprincip for 2-komposantekstensometer.

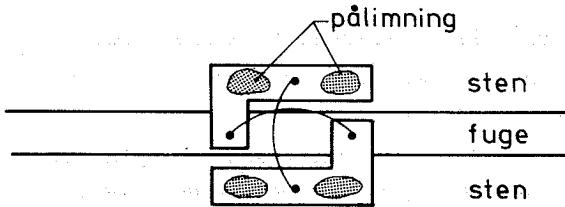
Det der altså er behov for er et ekstensometer, som opfylder følgende funktionskrav:

- 1) Det skal kunne måle 2 flytningskomponenter i planen.
- 2) Disse målinger skal være passende nøjagtige, d.v.s. der er visse krav til opløsningsevne, måleområde, temperaturfølsomhed, linearitet og måleusikkerhed som skal være opfyldte.
- 3) Ekstensometret skal være passende lille, da der ikke er levnet meget plads på prøvelegemets over- og underside fra fastspændingsudstyrets side.
- 4) Monteringens skal være hurtig og enkel, da der er tale om mange forsøg.
- 5) Af samme grund skal ekstensometret være passende mekanisk stabilt.

Da der ikke på markedet er nogen type ekstensometer som opfylder disse krav på rimelig vis måtte vi selv udvikle og producere disse ekstensometre. Der skal i det følgende kort redegøres for den principielle løsning, idet der så vidt det er muligt redegøres for hvordan de forskellige funktionskrav er imødekommet. Visse af funktionskravene, bl.a. spørgsmålet om målenøjagtighed behandles mere indgående i afsnittet om kalibrering af ekstensometrene.

Ideen er, at ekstensometret udføres med to sokler som kan pålimes stenene på hver side af fugen, og disse sokler forbindes til hverandre ved hjælp af 2 flytningsmålere, der hver måler en enkelt flytningskomponent, og

som anbringes vinkelret i forhold til hinanden. Se figur B.2.1.



Figur B.2.1. Ekstensometer - principopbygning.

Funktionskrav 1) ses umiddelbart at være opfyldt. På hver side af fugerne er der fra fastspændingsudstyrets side levnet en frit tilgængelig stribe stenoverflade med en bredde på ca. 12 mm, hvilket er rigeligt til anbringelse og pålimning af et ekstensometer af den skitserede type - funktionskrav 3) ses da også at være tilgodeset. Limning af en stålsokkel på en stenoverflade med f.eks. Eastman 910 er en enkel og hurtig proces, funktionskrav 4) er opfyldt. Det skønnes, at der ikke er noget i princippet som hindrer imødekomme af funktionskravene 2) og 5) - de vil blive kommenteret senere.

B.3. Funktionsprincip for enkeltkomposantflytningsmåler.

Som omtalt ovenfor er 2-komposantekstensometret sammensat af 2 stk. enkeltkomposantflytningsmålere. Disse enkeltkomposantflytningsmålere måleprincip skal kort omtales, måleprincippet er vist på figur B.3.1. Flytningsmåleren

udformes som en i hver ende simpelt understøttet ramme hvor de skrå ben er meget stivere end den øverste vandrette del af rammen. Denne udformning får til følge, at en vandret flytning af understøtningerne i forhold til

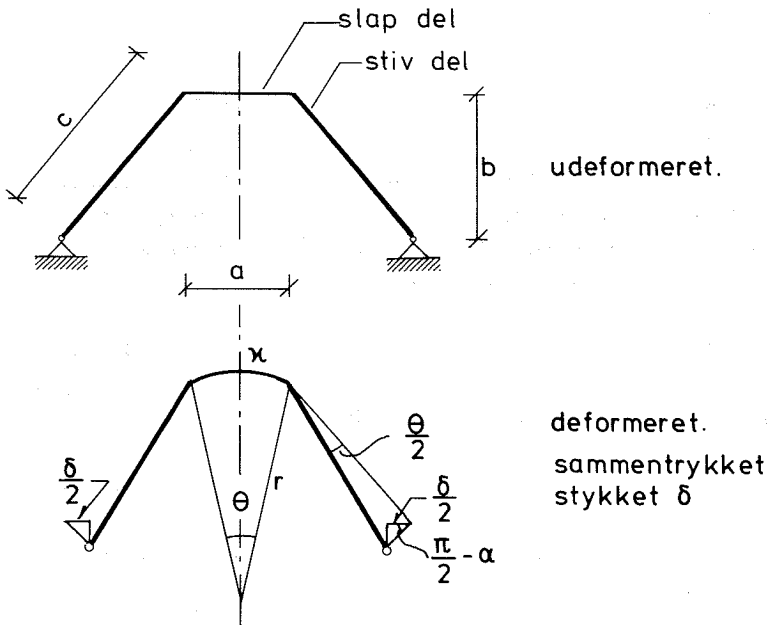


Fig. B.3.1. Måleprincip for enkeltkomponent-flytningsmåler. Deformationen δ er proportional med krumningen κ af den slappe vandrette del.

hinanden udelukkende deformerer den vandrette slappe del

af rammen. I den vandrette del induceres altså den med god tilnærmelse konstante krumning κ . Med de på figur B.3.1 anvendte betegnelser ses det let at

$$\delta = ab \cdot \kappa \quad (\text{B.3.1})$$

når δ er passende lille. Når

$$\delta \leq \frac{1}{5} b$$

er tilnærmelsen givet ved formel (B.3.1) korrekt inden for nogle få promille.

Lad den slappe del af rammen have et kvadratisk tværsnit med højden t , og bredden b^* . Når rammen sammentrykkes krummer den vandrette del, og dermed vil der opstå en kanttøjning ϵ^* som kan udtrykkes ved

$$\epsilon^* = \frac{1}{2} t \kappa \quad (\text{B.3.2})$$

Af formel (B.3.1) og (B.3.2) fås da

$$\epsilon^* = \frac{1}{2} \frac{t\delta}{ab} \quad (\text{B.3.3})$$

Det ses altså, at kanttøjningerne i den slappe del er proportionale med flytningen δ .

Sættes der nu 2 strain gauges på hver side af den bøjende del koblet i overensstemmelse med det på fig. B.3.2 viste diagram så gælder der

$$\epsilon^* = \frac{1}{G} \cdot \frac{u}{v} \quad (\text{B.3.4})$$

hvor G er gangefaktoren for de anvendte strain gauges og u og v er henholdsvis signal og brospænding.

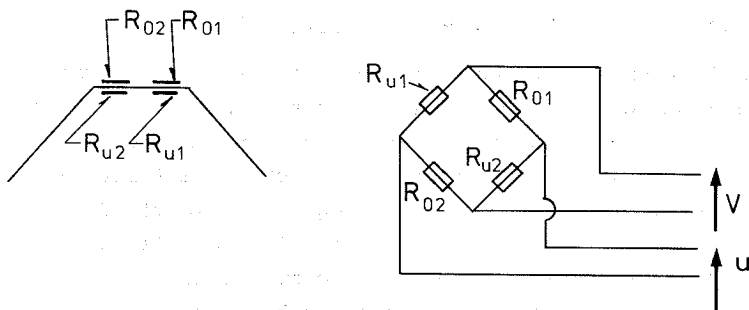


Fig. B.3.2. Kobling af straingaugebro.

Ved indsættelse af (B.3.4) i (B.3.3) ses at δ er proportional med det relative signal u/V på følgende måde

$$\delta = \frac{2}{G} \cdot \frac{ab}{t} \cdot \frac{u}{V} \quad (\text{B.3.5})$$

Vi har nu i princippet en flytningsmåler, idet vi har et signal u/V som er proportional med flytningen δ , og ved de ovenstående overvejelser har vi fået et tilnærmelsesudtryk for kalibreringskonstanten k defineret ved

$$\delta = k \cdot \frac{u}{V} \quad (\text{B.3.6})$$

som er

$$k = \frac{2}{G} \cdot \frac{ab}{t} \quad (\text{B.3.7})$$

B.4. Udformning af enkeltkomposantflytningsmåler.

Der skal i det følgende kort gøres rede for hvordan enkeltkomposantflytningsmåleren er udformet og hvorfor man er kommet til denne løsning. Først skal der gøres rede

for fastlæggelsen af de geometriske hovedmål.

Målestrækningen skal gøres passende kort for at få størst mulig følsomhed, men samtidig skal der være plads til anbringelse af de nødvendige straingauges. Der benyttes nogle straingauges med måleareal $1 \times 1 \text{ mm}^2$. En målestrækningsgeometri givet ved $b^* = 3.0 \text{ mm}$ og $a = 12 \text{ mm}$ vil da være rimelig, idet der så er passende med plads til anbringelse af straingauges inklusive bæremateriale og tilledninger. Der skal fastlægges endnu 2 størrelser som har indflydelse på kalibreringskonstanten, nemlig tykkelsen t og højden b . Som det fremgår af tidligere bemærkninger skal b vælges passende stor for at undgå 2.-ordens fænomener, men på den anden side skal det færdige ekstensometer have nogle rimelige dimensioner. Det skønnes da at en højde $b = 30 \text{ mm}$ vil være passende. Den sidste dimension t fastlægges ud fra et krav til følsomheden. Det skønnes, at den største flytning der vil kunne komme på tale er $\delta = 2 \text{ mm}$. For at hindre overdeformation af de anvendte gauges vil vi kræve at dette svarer til en tøjning i straingauges på maximum $1000 \mu = 1\%$. Ved indsættelse i formel (B.3.3) fås $t = 0.36 \text{ mm}$. Det vælges da at udføre flytningsmåleren med en målestrækning med tykkelsen $t = 0.30 \text{ mm}$:

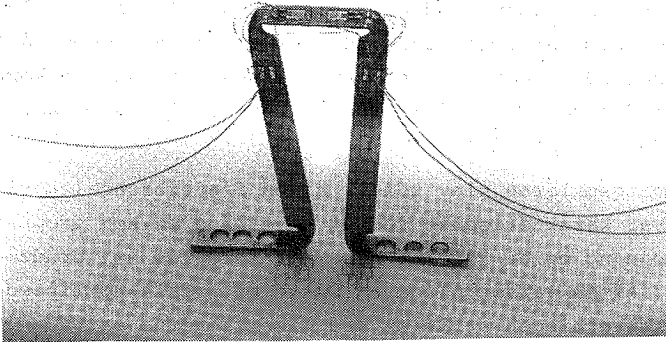
$$\left. \begin{aligned} a &= 12 \text{ mm} \\ b &= 30 \text{ mm} \\ t &= 0.30 \text{ mm} \\ b^* &= 3.0 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \text{(B.4.1)}$$

Med hensyn til de øvrige spørgsmål vedrørende udformningen er der især 2 som træder i forgrunden. For det første, hvordan udformes flytningsmåleren enkelt og nøjagtigt således, at man opnår de spring i bøjningsstivheden som

er forudsat i det foregående, og for det andet, hvordan skal understøtningen af målerammen realiseres, således at der kan siges at være tale om en veldefineret simpel understøtning. Vedrørende besvarelsen af disse spørgsmål skal vi ikke komme ind på omtale af de alternative løsninger som har været undersøgt og som kunne komme på tale, men nøjes med at vise den færdige løsning, og kommenteret den med hensyn til i hvor høj grad vi har fået vores ønsker opfyldt.

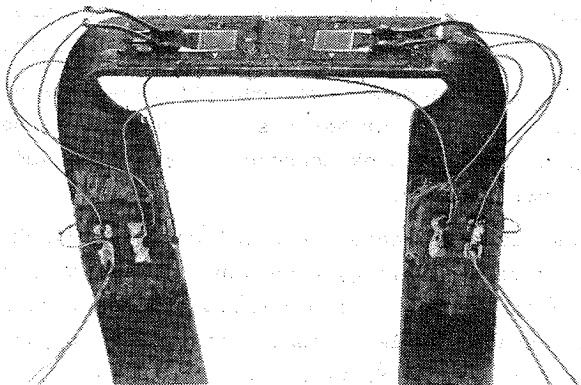
Flytningsmålerne blev udført af en fjederbronzelegering som var karakteriseret ved at have både en høj proportionaltøjning og en i forhold hertil særdeles høj brudtøjning. Af en valset plade af dette materiale udklippedes i valseretningen strimler med dimensionerne ca. $4 \times 100 \text{ mm}^2$. Disse blev sammenspændt flade mod flade, og på slibebord nedslebet til en bredde på 3.00 mm. Efter opmærkning blev disse ved en kombination af bukninger og vridninger i en lære udformet til målerammer for enkeltkomposantflytningsmålerne. Den færdige måleramme monteret med straingauges og tilledninger er vist på figur B.4.1. Der blev anvendt $1 \times 1 \text{ mm}^2$ foliegages temperaturkompenseret for blødt stål. Pålimningen blev foretaget med Eastman 910, nærbillede af straingagemonteringen er vist på figur B.4.2 og B.4.3.

Målerammen monteres på de tidligere omtalte pålimnings-sokler ved fastlodning af den yderste del af de på figuren viste vandrette "fødde" på en ca. $3 \times 3 \text{ mm}^2$ stor vandret flade på pålimningssoklerne. D.v.s., at den simple understøtning er realiseret ved en elastisk indspænding med lille fjederkonstant. Fjederkonstanten er søgt gjort så lille som muligt ved at gøre fødderne lange, og svække stivheden ved boring af de på figur B.4.1 viste huller. Det ses at denne løsning er en god løsning, idet tilvirkningen er enkel, og de tilstræbte egenskaber

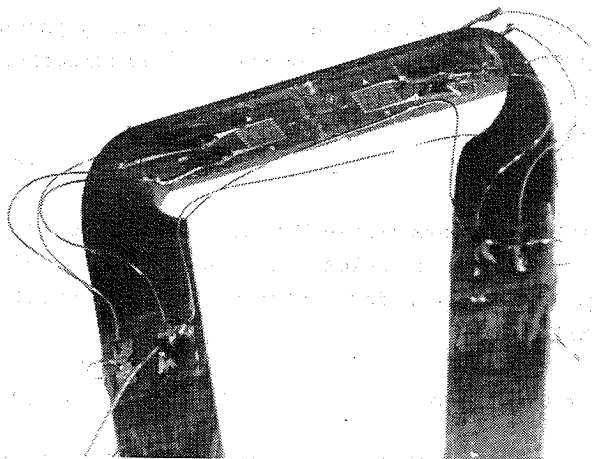


Figur B.4.1. Billedet viser den færdige måleramme monteret med strångauges og tilledninger. Forstørrelse ca. 2 gange.

såsom, de ønskede stivhedsspring, og små geometriske tolerancer på målestrækningen, er opnået. En understøtningsform som den ovenfor skitserede ses at have sin styrke i at være særdeles veldefineret (ingen friktion) samtidig med, at den kun i forsvindende lille udstrækning påvirker målesystemets følsomhed.



Figur B.4.2. Målestrækning monteret med strainingauges set fra oven. Ca. 6 gange forstørrelse.



Figur B.4.3. Målestrækning monteret med strainingauges set fra nedden. Ca. 6 gange forstørrelse.

B.5. Udformning af det færdige ekstensometer.

Enkeltkomposantflytningsmålerne sammensættes da efter det i afsnit B.2 omtalte princip til ekstensometre som er i stand til at måle en flytningsvektor i planen.

Det færdige ekstensometer uden beskyttelseskappe er vist i figur B.5.1. Det er her vist, hvordan soklerne er udformet, og hvorledes ekstensometret monteres ved limning hen over en fuge.

For at beskytte målerammer og strainingauges mod mekanisk overlast og varmestråling, blev der udformet og påsat en beskyttelseskappe af aluminium. Ekstensometret med beskyttelseskappe og ledningsmontering er vist påmonteret et prøvelegeme på figur B.5.2.

Vi har nu fået lavet et ekstensometer som så vidt vi har undersøgt det indtil nu, opfylder de krav som er opstillet i afsnit B.2. Vi mangler endnu at undersøge, hvorvidt kravene i punkt 2) kan siges at være tilfredsstillende.

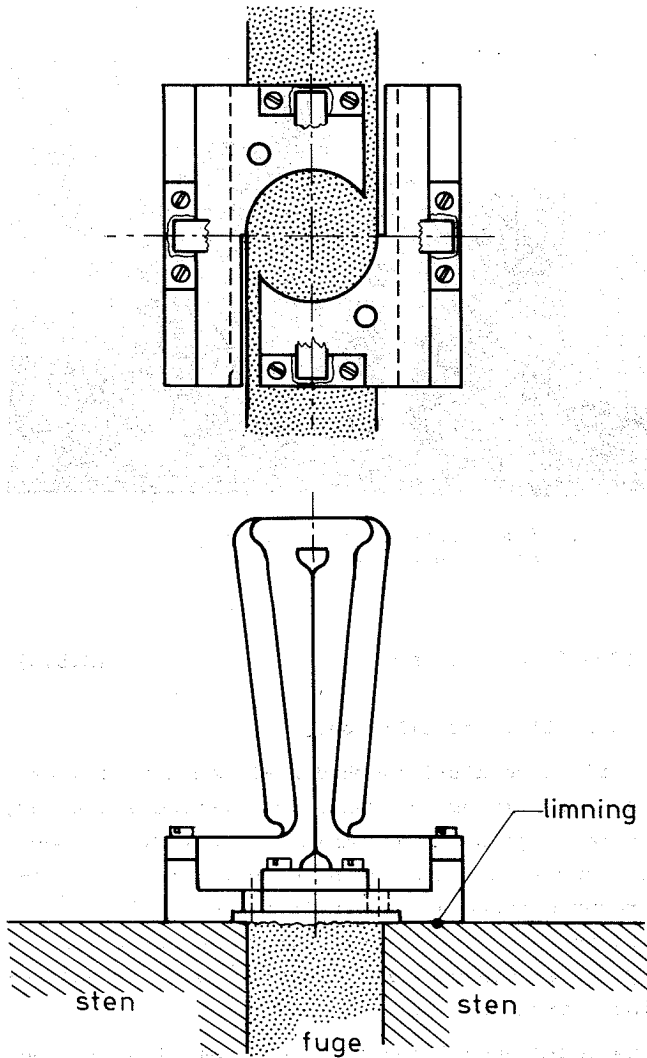
Indsættes (B.4.1) i formel (B.3.7) og sættes gagekonstanten $G = 2.00$, så får vi et skøn over kalibreringskonstanten k . Vi får

$$k = 1200 \text{ mm} \quad (\text{B.5.1})$$

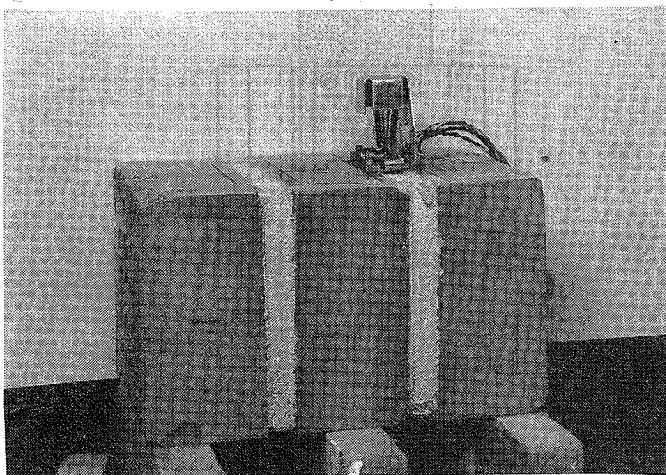
Hvis vi sætter brospændingen $V = 2.0$ volt, og opløsningssevnen for måling af signalet u til $\Delta u = 1 \mu\text{Volt}$, så finder vi opløsningssevnen for ekstensometret af formel (B.3.6) til

$$\Delta \delta = 0.0006 \text{ mm} \quad (\text{B.5.2})$$

måleområdet er altså ca.



Figur B.5.1. Det færdige ekstensometer uden beskyttelseskappe. Tilledninger til strain-gauge er ikke vist. Mål 2:1.



Figur B.5.2. Ekstensometeret monteret på et prøvelegeme.

$$\delta \in [0.001 \text{ mm} ; 2.0 \text{ mm}]$$

(B.5.3)

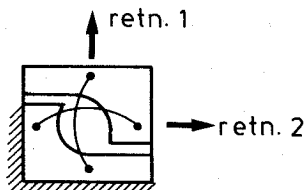
Hvilket er helt tilfredsstillende.

Med hensyn til temperaturfølsomheden må man formode, at da gaugebroen er selvkompenserende for 1.-ordenseffekter, og da målestrækningerne er afskærmet fra direkte varme-stråling er temperaturfølsomheden reduceret til et minimum. Temperaturfølsomheden blev målt til ca. $2.5 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ for både retning 1 og 2 (se figur B.6.1) ved 2.00 Volt brospænding med ekstensometeret monteret på et prøvelegeme, som vist i figur B.5.2.

Spørgsmålene vedrørende linearitet, herunder indvirkning af forskellige 2.-ordenseffekter, og måleusikkerhed behandles i afsnit B.6.

B.6. Kalibrering af ekstensometre.

Der blev lavet i alt 6 stk. 2-komponentekstensometre, som skal kalibreres. Ekstensometrene har betegnelserne A, B, C, D, E og F. Hvert ekstensometer skal altså kalibreres i 2 retninger, retning 1 og retning 2, vinkelret på hinanden. Retningerne 1 og 2 er defineret i forhold til ekstensometrenes geometri på figur B.6.1.



Figur B.6.1. Definition af måleretningerne 1 og 2.

Ekstensometeret skal kalibreres for de i anvendelsessituationen akutte deformationer. Ekstensometeret skal benyttes til måling af flytninger mellem 2 sten adskilt med en mørtelfuge.

De pålimes de to stenoverflader og måler på den måde flytningerne af de to stenrande i forhold til hinanden. Ekstensometerets pålmede sokler, og dermed målerammerne må derfor følge med i stenoverfladernes bevægelser, og da der ikke kun er tale om relative translationer af disse, men også om relative vinkeldrejninger, må det undersøges,

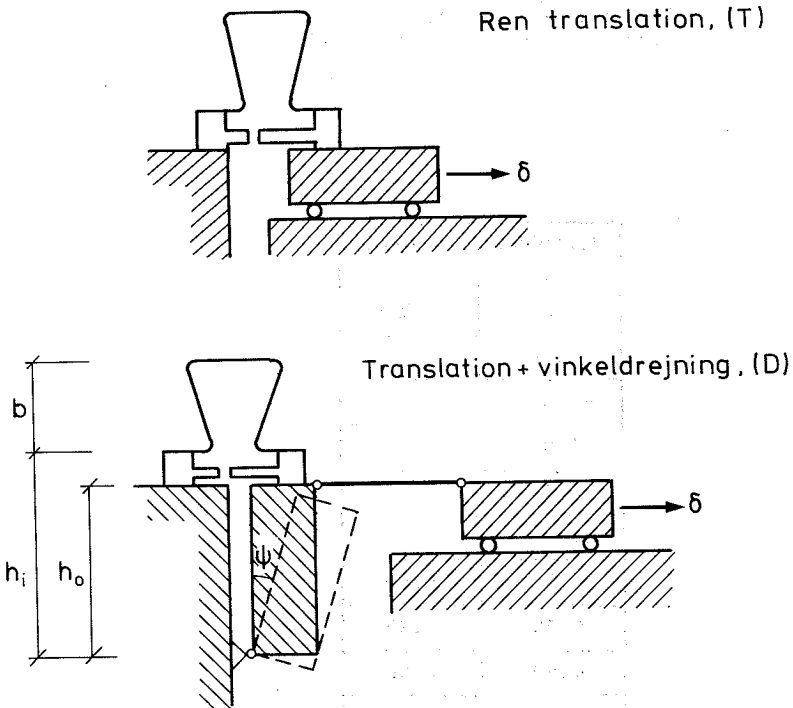
om ekstensometrene er følsomme overfor vinkeldrejninger af understøtningerne. Det bedste er naturligvis hvis de kun var følsomme overfor de translationer som de er udformet til at måle, men det må undersøges hvordan disse sekundære påvirkninger indvirker på målingerne, og såfremt der er en kendelig indvirkning af disse, må der tages hensyn hertil ved kalibreringen gennem bestemmelse af kalibreringsfaktorer herfor.

Der er derfor med hver flytningsmåler foretaget 4 kalibreringer, idet der for hver måleretning er foretaget både en kalibrering med ren translation og en kalibrering med kombineret translation og vinkeldrejning.

Figur B.6.2 viser hvordan de to typer kalibrering er foretaget.

Kalibreringerne blev foretaget i ABK's kalibreringsbank, som i princippet består af to faste dele, som kan forskydes i forhold til hinanden langs en ret linie, og hvis indbyrdes position er fastlagt ved hjælp af anvendelse af et moiréprincip. Man kan i denne kalibreringsopstilling styre deformationen δ med en nøjagtighed på 0.001 mm. Tilfældet med ren translation betegnes "T", og tilfældet med kombineret translation og vinkeldrejning betegnes "D".

Kalibreringen foregår ved, at der påtrykkes en række deformationer δ som fremgår af tabel B.6.1, og ved hver deformation aflæses signalerne u_1 og u_2 i hver måleretning, samt brospændingen V automatisk ved hjælp af afdelingens Solartron scanneranlæg. Målingerne punches ud på hulstrimmel, og kan da edb-behandles med udtegningskurver, d.v.s. signaler u_1/V og u_2/V som funktion af flytningen δ . Figur B.6.3 viser en enkelt T og D kalibreringsmåling. På figur B.6.3 er vist både det signal der primært kalibreres for - i dette tilfælde retning 1- samt signalet fra den anden retning - kaldet bisignalet - gange med



Figur B.6.2. Principvirkemåde for kalibrering med ren translation og kalibrering med både translation og drejning. De på figuren viste dimensioner er givet ved

b	$= 30.0$ mm
h_i	$= 55.0$ mm
h_o	$= 47.0$ mm

faktor 10. Da der er tale om en systematisk variation af bisignalet med flytningen δ har vi altså ikke kunnet undgå "crosstalk", d.v.s. at målingen af deformationer af

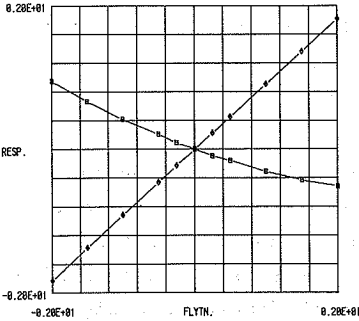
Tabel B.6.1.

Kalibreringsdeformationer δ .
 δ regnes med fortegn i over-
ensstemmelse med figur B.6.2.

Tilfælde T δ/mm	Tilfælde D δ/mm
-2.00	/
-1.50	/
-1.00	/
-0.50	/
-0.25	/
0.00	0.00
0.25	0.25
0.50	0.50
1.00	0.75
1.50	1.00
2.00	1.50

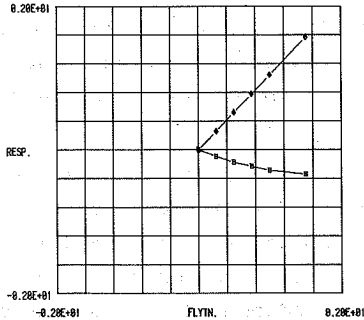
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTNINGSMAALER A RETNING 2.
 - SAMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000M/U ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/MH.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.8952 M
 ULINEARITET U = 2.27 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = -4.02 0/0



KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTNINGSMAALER A RETNING 2.
 - SAMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000M/U ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/MH.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 8.9549 M
 ULINEARITET U = 1.86 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = -2.18 0/0



Figur B.6.3. Eksempel på kalibreringskurve.

i de to retninger ikke er uafhængige. Det ses, hvad der i øvrigt gælder for alle 6 flytningsmålere, at der er tale om både 1.- og 2.-ordens crosstalk. Begge dele kan forklares og vurderes ud fra ekstensometrenes konstruktion, dette skal vi dog ikke komme ind på her, men blot nævne, at det ville have kostet betydelige anstrengelser at svække disse crosstalleffekter til et niveau, som ligger mærkbart under hvad der må konstateres at være blevet tilfældet med den her valgte konstruktion.

Hvis man skal kunne korrigere for crosstalleffekterne må man kræve at de er reproducerbare, d.v.s. tilnærmelsesvis ens hver gang man foretager en måling. For at undersøge dette kalibreres den samme flytningsmåler i alt 6 gange efter hinanden i det samme kalibreringstilfælde. Det foregik på følgende måde, først foretages 3 kalibre-

ringer efter hinanden idet flytningsmåleren afmonterede og påmonteredes på ny med almindelig monteringsnøjagtighed før hver kalibrering. Resultaterne heraf er vist på figur B.6.4, idet kalibreringstilfældet betegnes "P".

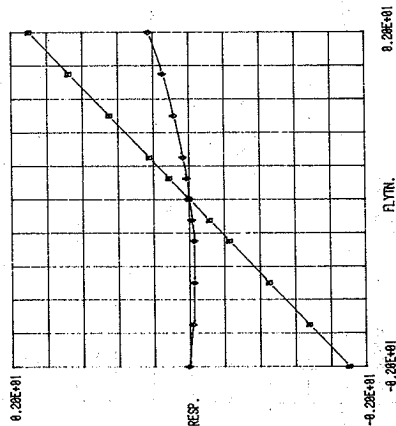
Derefter foretages 3 kalibreringer idet man søgte at montere flytningsmåleren drejet ca. 4° , 0° , og -4° i monteringskøenes plan. Resultaterne heraf er vist på figur B.6.5.

Det ses af disse undersøgelser, at kalibreringskonstanten for primærsignalet er meget stabil og inden for ca. 1 o/oo kan regnes uafhængig af monteringsunøjagtigheder selv når disse er så store som for de sidste 3 kalibreringers vedkommende. 2.-ordens crosstalkeffekten ses ligeledes at være ret uafhængig af monteringsunøjagtigheder, hvorimod det for 1.-ordens crosstalkeffektens vedkommende ses at spille en stor rolle om monteringen foretages nøjagtig. Ved unøjagtig montering må man altså betragte crosstalkeffekterne som en usikkerhed på målingen, idet man ikke kan korrigere herfor, og det ses da, at man må regne med et bisignal på op til 10% af primærsignalet i det tilfælde, at monteringsunøjagtigheden er så stor som ved de sidste 3 kalibreringer. Ved anvendelse af ekstensometrene til måling på de i kapitel 4 omtalte forsøg, skønnes det, at monteringsnøjagtigheden svarer til den ved de 3 første kalibreringstilfælde anvendte gode monteringsnøjagtighed. Da deformationerne ved disse forsøg i de to måleretninger, se figur B.6.1, vil være nogenlunde lige store, skønnes det ud fra kurverne i figur B.6.4 i dette tilfælde at være rimeligt at korrigere for crosstalk.

Lad os vende tilbage til kalibreringskurverne i figur B.6.3, idet vi nu vil interessere os for spørgsmålet om hvorvidt kalibreringskonstanten er følsom overfor om der er tale om ren translation eller om der er tale om en

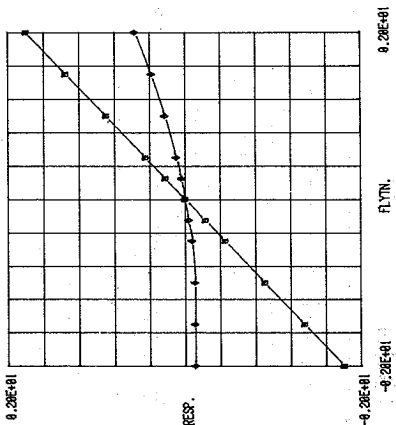
KALIBRERINGSKURVE P FOR FLYTNINGSKVALER B BETJNING I.
 - SAMT EKSSONAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000M/V ER AFBLISET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/M.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1073 M
 ULINJEARITET U = 1.17 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 1.23 0/0



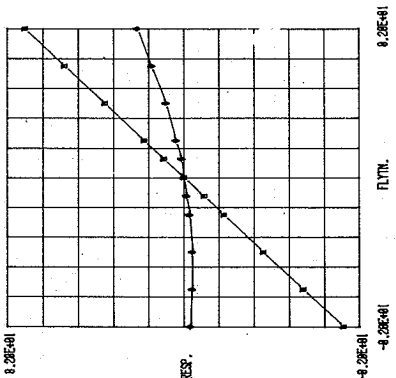
KALIBRERINGSKURVE P FOR FLYTNINGSKVALER B BETJNING I.
 - SAMT EKSSONAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000M/V ER AFBLISET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/M.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1072 M
 ULINJEARITET U = 0.50 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 1.06 0/0



KALIBRERINGSKURVE P FOR FLYTNINGSKVALER B BETJNING I.
 - SAMT EKSSONAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000M/V ER AFBLISET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/M.

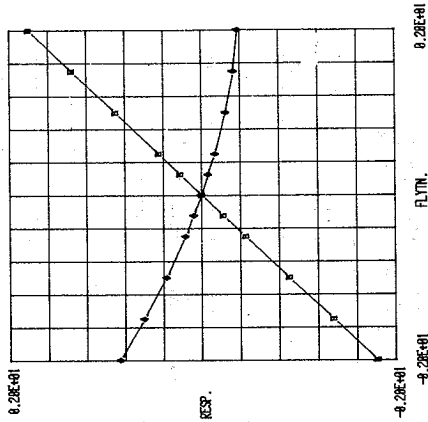
KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1066 M
 ULINJEARITET U = 1.15 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 1.64 0/0



Figur B.6.4. Gentagne kalibreringer med almindelig monteringsnøjagtighed.

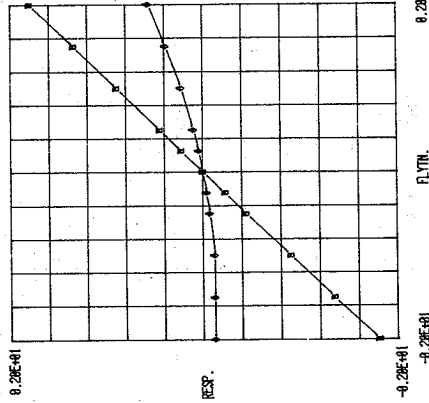
KALIBRERINGSKURVE P FOR FLYTNINGSMÅLER B BETJNING 1.
 - SAMT RESTISIAL * FAKTOR 18.
 RESPONSE 1800MM/VR ER AFBRUDT
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/VR.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1882 N
 ULINEARITET U = 1.17 0/00
 INFLUENSAKTOR F = -3.42 0/0



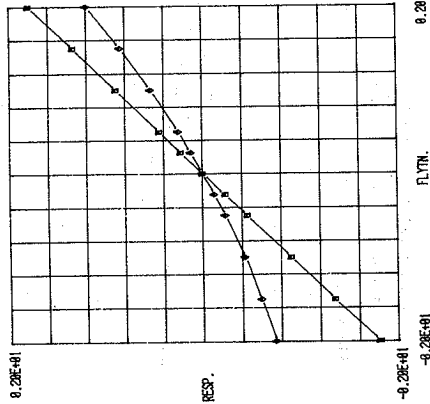
KALIBRERINGSKURVE P FOR FLYTNINGSMÅLER B BETJNING 1.
 - SAMT RESTISIAL * FAKTOR 18
 RESPONSE 1800MM/VR ER AFBRUDT
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/VR.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1185 H
 ULINEARITET U = 1.23 0/00
 INFLUENSAKTOR F = 1.93 0/0



KALIBRERINGSKURVE P FOR FLYTNINGSMÅLER B BETJNING 1.
 - SAMT RESTISIAL * FAKTOR 18.
 RESPONSE 1800MM/VR ER AFBRUDT
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/VR.

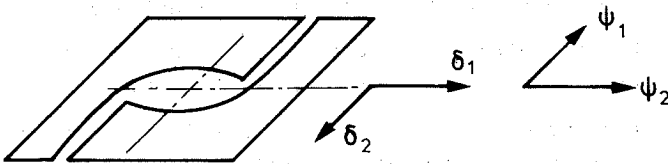
KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1883 H
 ULINEARITET U = 0.88 0/00
 INFLUENSAKTOR F = 5.38 0/0



Figur B.6.5. Gentagne kalibreringer med uøjagtig montering af ekstensometer. Drejning 4, 0 og -4.

kombination af translation og vinkeldrejning. Det ses, at kalibreringskonstanten er ca. 20% mindre ved kalibrering med kombineret translation og vinkeldrejning end ved ren translation. Det må da konkluderes, at når forholdet mellem drejning og translation er af en størrelsesorden som tilfældet er her, så bør der tages hensyn hertil ved anvendelsen af ekstensometeret. Det ses altså, at man ved anvendelse af ekstensometrene til måling på de i kapitel 4 omtalte forsøg, helt klart bør tage hensyn til vinkeldrejningernes indflydelse.

Vi vil nu se nærmere på bestemmelsen af de enkelte kalibreringsfaktorer. Fortegnsregningen for flytningerne δ_1 og δ_2 , og for vinkeldrejningerne ψ_1 og ψ_2 er defineret i forhold til pålimningssocklernes geometri på figur B.6.6.



Figur B.6.6. Definition af flytningsstørrelser.

Vi har nu set, at vi ikke kan nøjes med den simple sammenhæng mellem deformation og signal som der er angivet i formel (B.3.6). Vi må tilføje nogle led sådan at vi både kan tage hensyn til vinkeldrejningens indflydelse, og så-

dan at vi kan korrigere fra crosstalkeffekter. For en givet flytningsmåler har vi da ligningerne

$$\frac{u_1}{V} - \Delta(\delta_2, \psi_2) = \frac{\delta_1}{k_{t1}} + \frac{\psi_1}{k_{d1}} \quad (\text{B.6.1})$$

$$\frac{u_2}{V} - \Delta(\delta_1, \psi_1) = \frac{\delta_2}{k_{t2}} + \frac{\psi_2}{k_{d2}} \quad (\text{B.6.2})$$

hvor k_t og k_d betegner kalibreringsfaktorerne for henholdsvis ren translation og ren vinkeldrejning af målerammernes understøtningspunkter. Leddet $\Delta(\dots)$ betegner korektionen for crosstalk, og kan skrives

$$\Delta(\delta_2, \psi_2) = \frac{\delta_2}{k_{t2}} F_2 + k_{o2} \left(k_{12} \frac{\delta_2}{b} + \psi_2 \right)^2 \quad (\text{B.6.3})$$

$$\Delta(\delta_1, \psi_1) = \frac{\delta_1}{k_{t1}} F_1 + k_{o1} \left(k_{11} \frac{\delta_1}{b} + \psi_1 \right)^2 \quad (\text{B.6.4})$$

hvor F_1 og F_2 , k_{o1} og k_{o2} , samt k_{12} og k_{11} er kalibreringsfaktorer for crosstalk'ens indflydelse.

Det ses altså, at der for hvert ekstensometer skal bestemmes i alt 10 kalibreringsfaktorer.

Figurerne B.6.7 - B.6.12 viser kalibreringskurverne for de 6 fremstillede ekstensometre. For hver kalibrering er der foretaget en lineær regression på både primærsignal og bisignal. Kalibreringskonstanten er da bestemt som den reciproke hældning af primærsignalet som funktion af flytningerne. Influenskoefficienten er bestemt som det reciproke forhold mellem hældningerne af henholdsvis bisignal og primærsignal som funktion af flytningerne, og ulineariteten er bestemt for primærsignalet som den største afvigelse af de enkelte målepunkter fra regressionslinien divideret med fuldt udslag.

Kalibreringskonstanterne k_t er da direkte de ved kalibreringstilfældene T bestemte, medens k_d må findes ud fra kalibreringsmålingerne både i tilfælde T og tilfælde D sammen med de i figur B.6.2 givne oplysninger.

Der skal i øvrigt ikke kommes nærmere ind på hvordan de forskellige kalibreringskonstanter er bestemt, men blot nævnes, at crosstalkkalibreringskonstanterne k_1 er sat lig med

$$k_1 = 4.5$$

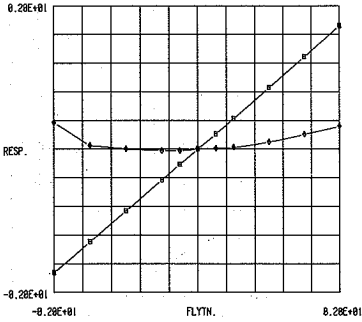
for alle flytningsmålinger, medens resultaterne for de øvrige kalibreringskonstanter er givet i tabel B.6.2.

Tabel B. 6. 2.
Kalibreringsfaktorer
for ekstensometre.

Flytningsmåler	Retning	Kalibreringskonstanter.		Kvalitetstal for enkeltkalibreringer.			
		k_L/mm	k_O	ulinearitet $1000 \cdot U$		Korrektionsfaktorer	
				T	D	Influensfaktorer. $100 \cdot F$	Krumningsfaktorer. $10^4 k_O$
A	1	1160	590	1.2	1.0	0.2	3.01
	2	1995	565	2.3	1.1	-4.0	2.42
B	1	1109	528	1.3	1.1	1.9	2.49
	2	1075	484	1.2	2.1	-1.6	2.39
C	1	1118	554	0.7	1.6	0.1	3.13
	2	1037	502	1.2	1.9	-0.5	2.23
D	1	1104	503	1.9	0.5	3.5	2.42
	2	1115	493	1.2	0.9	1.9	2.24
E	1	1153	539	1.9	0.8	0.5	2.82
	2	1084	529	1.1	0.9	-0.1	2.19
F	1	1169	584	1.4	1.0	3.8	2.64
	2	1079	538	0.9	1.5	0.8	2.18

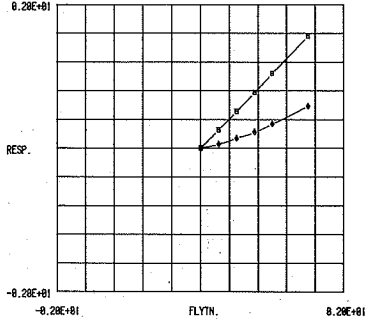
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTNINGSMAALER A RETNING 1.
 - SAMT BİSIGNAL * FAKTOR 18.
 RESPONSE 1000u/V ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/mm.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1683 H
 ULINEARITET U = 1.19 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 9.21 0/0



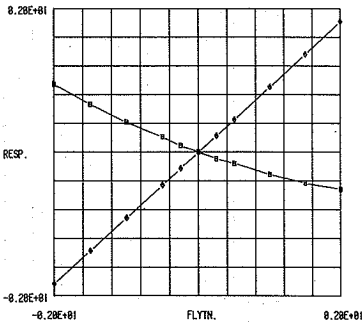
KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTNINGSMAALER A RETNING 1.
 - SAMT BİSIGNAL * FAKTOR 18.
 RESPONSE 1000u/V ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/mm.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9573 H
 ULINEARITET U = 1.82 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 3.74 0/0



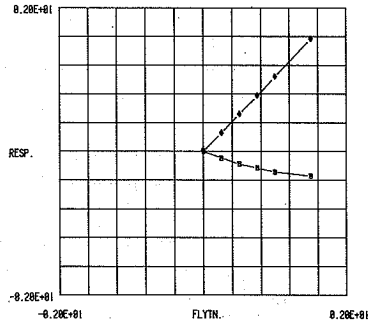
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTNINGSMAALER A RETNING 2.
 - SAMT BİSIGNAL * FAKTOR 18.
 RESPONSE 1000u/V ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/mm.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.6852 H
 ULINEARITET U = 2.27 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = -4.82 0/0



KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTNINGSMAALER A RETNING 2.
 - SAMT BİSIGNAL * FAKTOR 18.
 RESPONSE 1000u/V ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/mm.

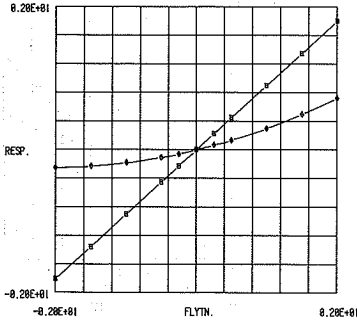
KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9549 H
 ULINEARITET U = 1.86 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = -2.18 0/0



Figur B.6.7. Kalibreringskurver for ekstensometer A.

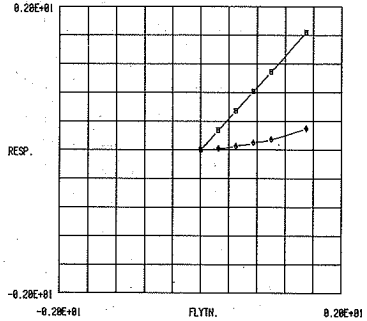
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTINDSMAALER B RETNING 1.
 - SAMT BISIGNAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000µV/° ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTINDS/°M.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1887 M
 ULINEARITET U = 1.32 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 2.78 0/0



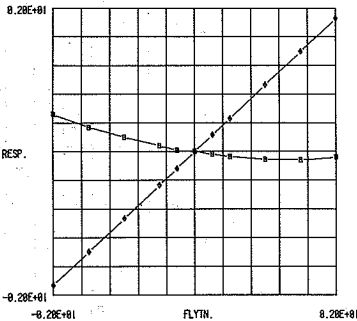
KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTINDSMAALER B RETNING 1.
 - SAMT BISIGNAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000µV/° ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTINDS/°M.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9126 M
 ULINEARITET U = 1.07 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 1.78 0/0



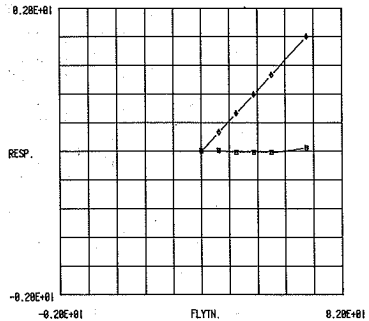
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTINDSMAALER B RETNING 2.
 - SAMT BISIGNAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000µV/° ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTINDS/°M.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.0753 M
 ULINEARITET U = 1.18 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = -1.62 0/0



KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTINDSMAALER B RETNING 2.
 - SAMT BISIGNAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000µV/° ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTINDS/°M.

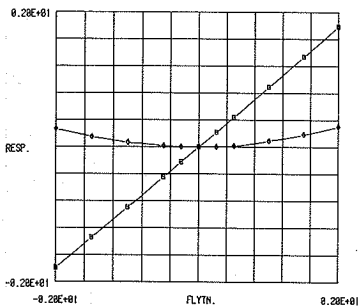
KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9321 M
 ULINEARITET U = 2.89 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 0.25 0/0



Figur B.6.8. Kalibreringskurver for ekstensometer B.

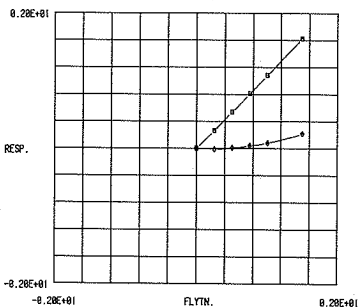
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTNINGSSHAALER C RETNING 1.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000HU/V ER AFBEJLEDT
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/M.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1183 H
 ULINEARITET U = 8.72 O/O
 INFLUENSFAKTOR F = 0.11 O/O



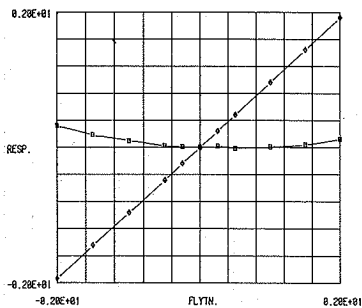
KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTNINGSSHAALER C RETNING 1.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000HU/V ER AFBEJLEDT
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/M.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.8218 H
 ULINEARITET U = 1.69 O/O
 INFLUENSFAKTOR F = 1.37 O/O



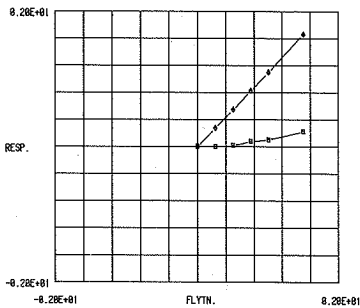
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTNINGSSHAALER C RETNING 2.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000HU/V ER AFBEJLEDT
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/M.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.0378 H
 ULINEARITET U = 1.16 O/O
 INFLUENSFAKTOR F = -0.49 O/O



KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTNINGSSHAALER C RETNING 2.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000HU/V ER AFBEJLEDT
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/M.

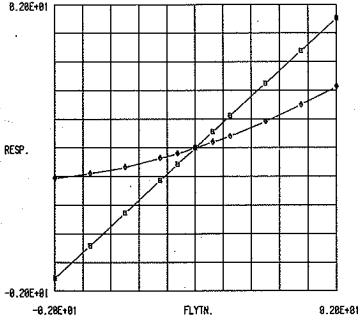
KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9815 H
 ULINEARITET U = 1.87 O/O
 INFLUENSFAKTOR F = 1.46 O/O



Figur B.6.9. Kalibreringskurver for ekstensometer C.

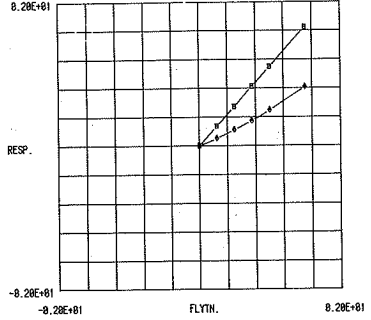
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTNINGSMAALER D RETNING 1.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000μV ER AFBIJDET
 SØN FUNKTION AF FLYTNING/ÅR.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1035 M
 ULINEARITET U = 1.94 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 3.52 0/0



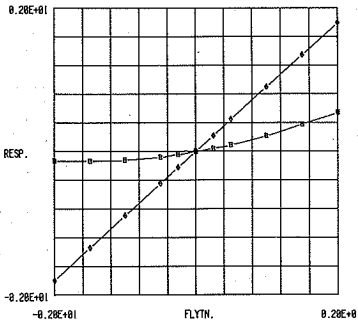
KALIBRERINGSKURVE O FOR FLYTNINGSMAALER D RETNING 1.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000μV ER AFBIJDET
 SØN FUNKTION AF FLYTNING/ÅR.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9868 H
 ULINEARITET U = 0.54 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 4.95 0/0



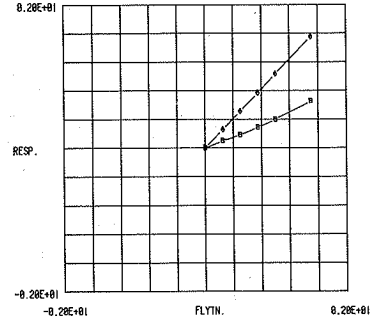
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTNINGSMAALER D RETNING 2.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000μV ER AFBIJDET
 SØN FUNKTION AF FLYTNING/ÅR.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1145 H
 ULINEARITET U = 1.18 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 1.89 0/0



KALIBRERINGSKURVE O FOR FLYTNINGSMAALER D RETNING 2.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000μV ER AFBIJDET
 SØN FUNKTION AF FLYTNING/ÅR.

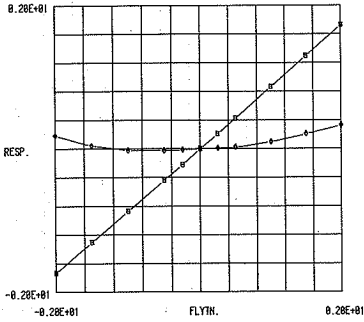
KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9654 H
 ULINEARITET U = 0.86 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 4.19 0/0



Figur B.6.10. Kalibreringskurver for ekstensometer D.

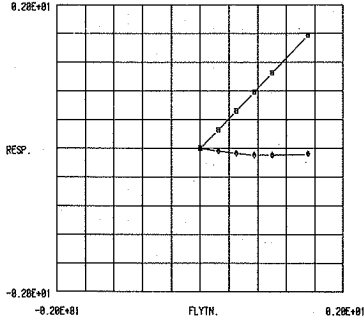
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTNINGSMAALER E RETNING 1.
 - SANT BISSIGNAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1800u/V ER AFBIJDET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/MM.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1529 M
 ULINEARITET U = 1.94 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 0.51 0/0



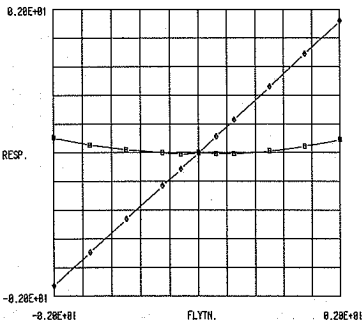
KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTNINGSMAALER E RETNING 1.
 - SANT BISSIGNAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1800u/V ER AFBIJDET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/MM.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9483 M
 ULINEARITET U = 0.82 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = -0.49 0/0



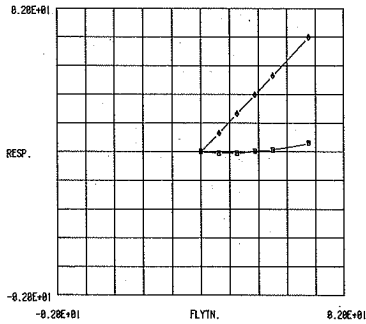
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTNINGSMAALER E RETNING 2.
 - SANT BISSIGNAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1800u/V ER AFBIJDET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/MM.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.0835 M
 ULINEARITET U = 1.09 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = -0.67 0/0



KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTNINGSMAALER E RETNING 2.
 - SANT BISSIGNAL * FAKTOR 10.
 RESPONSE 1800u/V ER AFBIJDET
 SOM FUNKTION AF FLYTNING/MM.

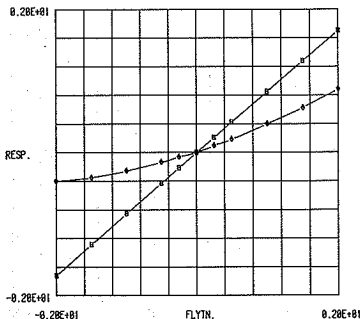
KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9422 M
 ULINEARITET U = 0.94 0/00
 INFLUENSFAKTOR F = 0.81 0/0



Figur B.6.11. Kalibreringskurver for ekstensometer E.

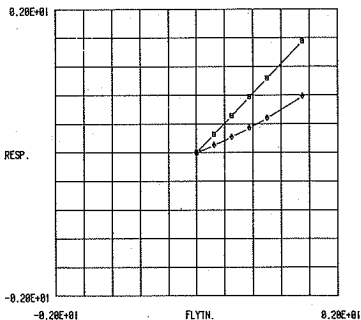
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTINDSMÅLER F RETNING 1.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000µV/Ø ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTINDS/ØM.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.1693 H
 ULINÆARITET U = 1.35 Ø/ØØ
 INFLUENSFAKTOR F = 3.79 Ø/Ø



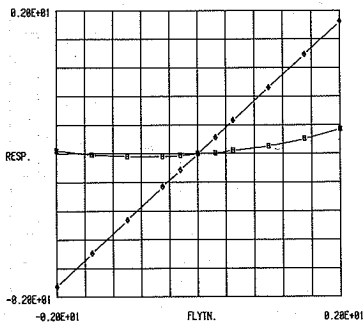
KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTINDSMÅLER F RETNING 1.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000µV/Ø ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTINDS/ØM.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9641 H
 ULINÆARITET U = 1.82 Ø/ØØ
 INFLUENSFAKTOR F = 5.06 Ø/Ø



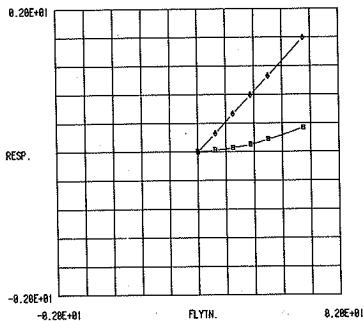
KALIBRERINGSKURVE T FOR FLYTINDSMÅLER F RETNING 2.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000µV/Ø ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTINDS/ØM.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 1.0787 H
 ULINÆARITET U = 0.86 Ø/ØØ
 INFLUENSFAKTOR F = 0.81 Ø/Ø



KALIBRERINGSKURVE D FOR FLYTINDSMÅLER F RETNING 2.
 - SMT BISSIGNAL = FAKTOR 10.
 RESPONSE 1000µV/Ø ER AFBILDET
 SOM FUNKTION AF FLYTINDS/ØM.

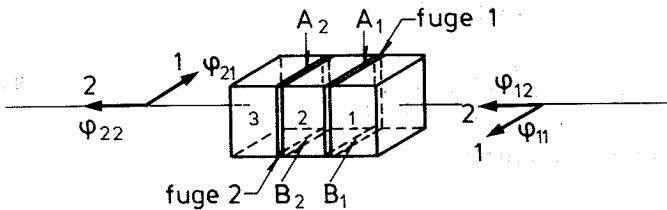
KALIBRERINGSKONSTANT C = 0.9388 H
 ULINÆARITET U = 1.54 Ø/ØØ
 INFLUENSFAKTOR F = 2.11 Ø/Ø



Figur B.6.12. Kalibreringskurver for ekstensometer F.

B.7. Beregning af tøjningsstørrelser ud fra flytningsmålinger.

Da beregningerne skal foregå pr. edb er det en fordel at benytte en fremstilling hvor tingene sammenfattes i få ligninger i indicerede størrelser; det vil vi derfor gøre. Lad os igen betragte det på figur B.1.1 viste prøvelegeme.



Figur B.7.1

Vinkeldrejningerne φ er indført som en dobbeltindiceret størrelse φ_{ij} hvor det første index angiver stedet (fuge 1 eller fuge 2), og det sidste index angiver retningen. Defineret på helt analog måde, er indført de til vinkeldrejningerne svarende nullinieafstande x_{ij} målt fra prøvelegemets overkant. Af hensyn til målingerne med ekstensor-metre indføres to faste stedindicis, a og b, idet a angiver, at der er tale om en måling på prøvelegemets over-

side, og b angiver, at der er tale om en måling på prøvelegemets underside. Herudover hæftes på en ekstensometermåling to indicis i, j der henholdsvis angiver sted (fuge nr.) og måleretning (defineret i figurerne B.2.1 og B.6.6). Ligning (B.6.1) skrevet op for en måling på prøvelegemets overside ved fuge 1 er, idet crosstalkleddet undertrykkes, da f.eks.

$$S_{a11} = \frac{\delta_{a11}}{k_{ta11}} + \frac{\psi_{a11}}{k_{da11}}$$

idet $\left(\frac{u}{v}\right)_{a11} = S_{a11}$. D.v.s., at vi har de 8 ligninger

$$S_{aij} = \frac{\delta_{aij}}{k_{taij}} + \frac{\psi_{aij}}{k_{daij}} \quad (\text{B.7.1})$$

$$S_{bij} = \frac{\delta_{bij}}{k_{tbij}} + \frac{\psi_{bij}}{k_{dbij}} \quad (\text{B.7.2})$$

Indføres matricerne

$$\bar{C}_a = \begin{Bmatrix} -1 & -1 \\ -1 & 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{B.7.3})$$

$$\bar{C}_b = \begin{Bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{B.7.4})$$

og antages stenene at være stive legemer, så ses det relativt let at der gælder

$$\psi_{aij} = C_{aij} \cdot \varphi_{ij} \quad (\text{B.7.5})$$

$$\psi_{bij} = C_{bij} \cdot \varphi_{ij} \quad (\text{B.7.6})$$

$$\delta_{aij} = C_{aij} \cdot \varphi_{ij} \cdot X_{ij} \quad (\text{B.7.7})$$

$$\delta_{bij} = C_{bij} \cdot \varphi_{ij} \cdot (h_{ij} - X_{ij}) \quad (\text{B.7.8})$$

hvor h_{ij} betegner afstanden fra understøtningspunktet af målerammen der måler i fuge i retning j , og til prøvelegemets midte multipliceret med 2.

Indsættes ligningerne (B.7.5) og (B.7.6) samt ligningerne (B.7.7) og (B.7.8) i ligningerne (B.7.1) og (B.7.2), så får vi nogle ligningsystemer til bestemmelse af de størrelser vi er interesseret i, nemlig φ_{ij} og X_{ij} . Løsningerne er

$$\varphi_{ij} = \frac{C_{aij} k_{taij} S_{aij} + C_{bij} k_{tbij} S_{bij}}{h_{ij} + \frac{k_{taij}}{k_{daij}} + \frac{k_{tbij}}{k_{dbij}}} \quad (\text{B.7.9})$$

$$X_{ij} = \frac{C_{aij} k_{taij} S_{aij}}{\varphi_{ij}} - \frac{k_{taij}}{k_{daij}} \quad (\text{B.7.10})$$

I denne løsning er der ikke taget hensyn til crosstalk-effekterne. Det kan gøres ved først at benytte løsningerne (B.7.9) og (B.7.10) uden at korrigere for crosstalk. På grundlag af de da bestemte tøjningsstørrelser φ_{ij} og X_{ij} regner man sig tilbage til størrelserne δ_{aij} , δ_{bij} , ψ_{aij} og ψ_{bij} og bestemmer så ved hjælp af udtrykkene (B.6.3) og (B.6.4) korrektionerne Δ_{aij} og Δ_{bij} . Man kan da korrigere sine signaler

$$S'_{aij} = S_{aij} - \Delta a_{ij}$$

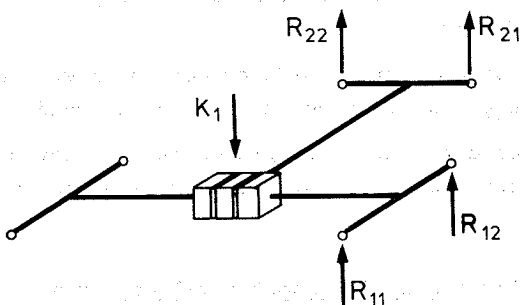
$$S'_{bij} = S_{bij} - \Delta b_{ij}$$

På grundlag af de korrigerede signaler beregnes så et nyt sæt tøjningsstørrelser, nye korrektioner kan beregnes, o.s.v. - der fortsættes til man har fået bestemt sine korrektioner med den ønskede nøjagtighed. I praksis må et enkelt gennemløb være tilstrækkeligt, da man må være tilfreds hvis korrektionerne er bestemt inden for 10-20%.

APPENDIX C. DYNAMOMETRE.

C.1. Målebehov.

I dette afsnit omtales opbygning og kalibrering af de dynamometre, som er benyttet til måling af kræfter i forbindelse med styrkeforsøg med murstensprøvelegemer med kombineret vridning og bøjning. Figur C.1.1 viser en principskitse af opstillingen i hvilken dynamometre skal indgå til måling af kræfterne R_{11} , R_{12} , R_{21} og R_{22} samt kraften K_1 .



Figur C.1.1. De kræfter der måles med dynamometre er angivet på figuren.

For at kunne dimensionere dynamometrene må vi definere nogle funktionskrav som vi så kan søge opfyldt. Først og frem-

C.2

mest skal dynamometrene have et passende måleområde, og en passende opløsningsevne. For de 4 reaktioner R_{11}, \dots, R_{22} skønnes

$$R_{\min} = -5 \text{ kN}$$

$$R_{\max} = 10 \text{ kN}$$

og for belastningen K_1 skønnes

$$K_{1,\min} = 0 \text{ kN}$$

$$K_{1,\max} = 25 \text{ kN}$$

idet vi ikke her vil komme nærmere ind på hvordan disse skøn er foretaget.

For alle dynamometrene skønnes det endvidere, at en opløsningsevne på 1N eller bedre vil være passende.

Man må desuden kræve, at følsomheden overfor utilsigtede påvirkninger såsom f.eks. momenter reduceres til et minimum.

C.2. Udførelse af dynamometre til måling af reaktionerne R_{11}, \dots, R_{22} :

Den i figur C.1.1 viste prøveopstilling er i de punkter hvor reaktionerne måles, ophængt i pendulstænger hvis oprindelige geometri (uden forarbejdning til dynamometre) fremgår af de i figur C.2.1 viste tegninger. Det ses, at pendulstangen er forsynet med et sfærisk glideleje i hver ende på en sådan måde, at afstanden mellem fastgøringspunkterne til den øvrige konstruktion målt i pendulstangens længderetning, er justerbar. Pendulstangen er udført af blødt stål.

Dynamometerets virkemåde bygger på den kendsgerning, at det for passende små spændinger med særdeles god tilnærmelse gælder, at længdetøjningerne er proportionale med normalspændingerne. Ved at sætte straingauges på som måler disse længdetøjninger kan man altså skabe et elektrisk signal som er proportionalt med normalkraften.

Lad måletværsnittet have arealet A , elasticitetsmodulen E og længdetøjningen ϵ , og lad normalkraften være N . Der gælder da

$$\epsilon = \frac{N}{EA} \quad (\text{C.2.1})$$

Anbringes der da 2 langsgående straingauges R_{11} og R_{12} og 2 tværgående straingauges R_{t1} og R_{t2} på målestrækningen, og forbindes disse i en hel bro som vist på figur C.2.2, så gælder der

$$\epsilon = \frac{2}{(1+\nu)K} \cdot \frac{u}{V} \quad (\text{C.2.2})$$

hvor ν er poissons forhold for stangmaterialet, K er gaugefaktoren, og u og V er henholdsvis målesignal og brospænding.

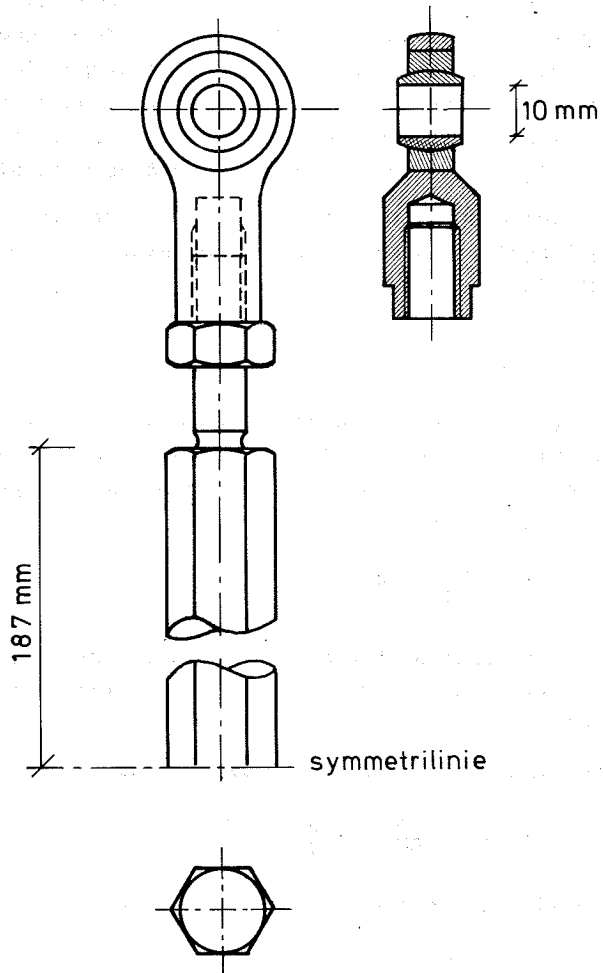
Af udtrykkene (C.2.1) og (C.2.2) fås da

$$N = EA \cdot \frac{2}{(1+\nu)K} \cdot \frac{u}{V} \quad (\text{C.2.3})$$

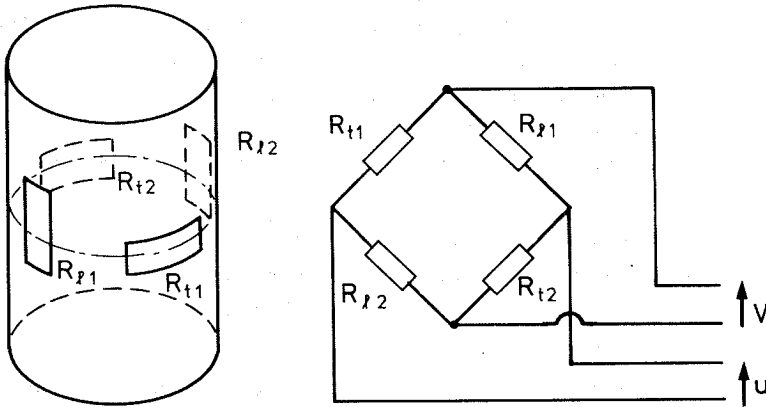
som også kan skrives

$$N = k \cdot \frac{u}{V} \quad (\text{C.2.4})$$

hvor kalibreringskonstanten k er udtrykt ved



Figur C.2.1. Pendulstenger før forarbejdning til dynamometer.



Figur C.2.2. Anbringelse af strainingauges, og deres kobling i weatstonebroen.

$$k = \frac{2EA}{(1+\nu)K} \quad (C.2.5)$$

Der er kun en enkelt parameter at variere, nemlig måleværsnittets areal A . Arealet A fastlægges ud fra kravet om at den maximale påvirkning svarer til en passende lille tøjning, således at overbelastning af stangmateriale og strainingauges undgås. Der kræves at $R_{\max} = N = 10 \text{ kN}$ svarer til tøjningen $1500 \mu = 1.5\%$. Herved bestemmes arealet $A_{\min} \cong 0.32 \text{ cm}^2$. Spørgsmålet er nu hvordan måleværsnittet skal udformes, og hvor på pendulstangen målestrekningen skal anbringes. Afgørende har i denne forbindelse været de påvirkninger, som en sådan pendulstang utilsigtet kan blive udsat for ved stød og slag, eller ved eventuelt at blive tabt. I sådanne tilfælde gælder det, at beskadigelse lettest sker ved at flydemomentet lokalt

overskrides og at der derved påføres stangen plastiske deformationer. På grund af stangens understøtningsform vil momenterne altid være mindst ved enderne, og målestrækningen bør da anbringes så tæt ved en af enderne som muligt, og i øvrigt udformes således, at der ved reduktion af tværsnitsarealet tabes så lidt modstandsmoment som muligt.

Figur C.2.3 viser hvorledes målestrækningen og detaljerne omkring målestrækningen blev udformet. Figur C.2.4 viser et billede af det færdige ekstensometer monteret med straingauges.

Selve målestrækningen ses altså at være udformet som et tyndvægget rør med indvendig diameter på 10 mm og udvendig diameter på 12 mm. Vægtykkelsen er altså en mm. Den viste udformning giver altså arealet

$$A = 0.35 \text{ cm}^2$$

hvilket passer fint med vores tidligere stillede krav.

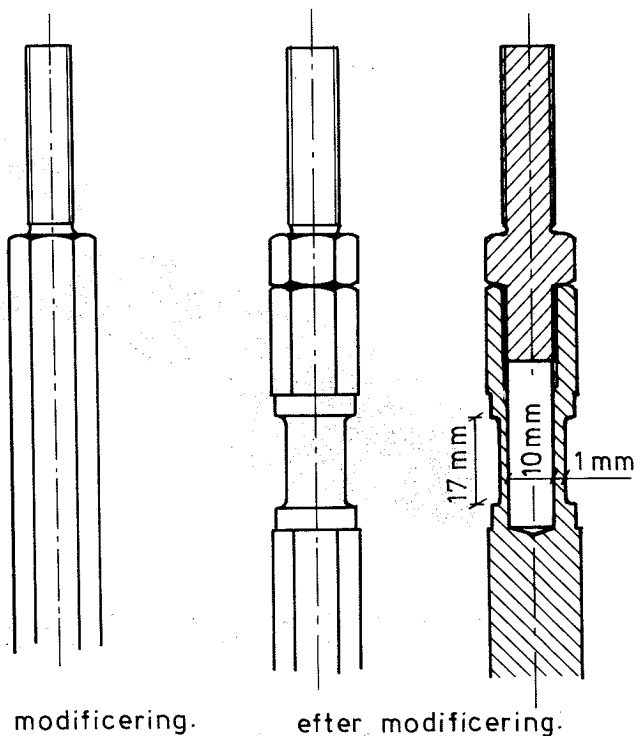
Af formel (C.2.5) bestemmes et estimat til kalibreringskonstanten da til

$$k = 5480 \text{ kN}$$

Da de anvendte straingauge har et målefelt på ca. $3 \times 1.5 \text{ mm}^2$ skønnes det forsvarligt at benytte en brospænding på 6.00 Volt. Antages målingen af målesignalet u at foregå med opløsningsevnen $\Delta u = 1 \mu\text{volt}$ fås af ligning (C.2.4) følgende skøn over opløsningsevnen

$$\Delta N = 5480 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{6 \cdot 10^6} \cdot N$$

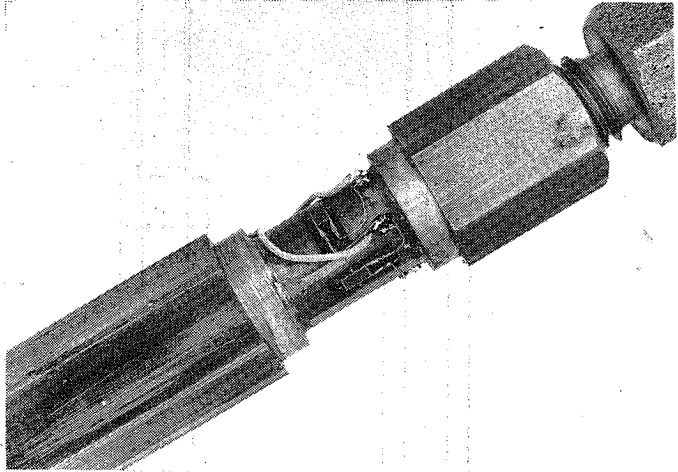
$$\cong 0.9 \text{ N}$$



Figur C.2.3. Udformning af dynamometerets målestrækning.

hvilket er helt tilfredsstillende.

Selve forarbejdningen af dynamometerets målestrækning foregik i drejebank i én opspænding, idet den udvendige overflade forarbejdedes ved afdrejning og den indvendige overflade forarbejdedes ved boring. Opmærksomheden til anbringelse af langsgående straingauges blev ikke foretaget i opspændt tilstand, men ved anvendelse af højderidser. Der blev anvendt $3 \times 1.5 \text{ mm}^2$ foliegages temperaturkompenseret for blødt stål og pålimet med Eastman 910.

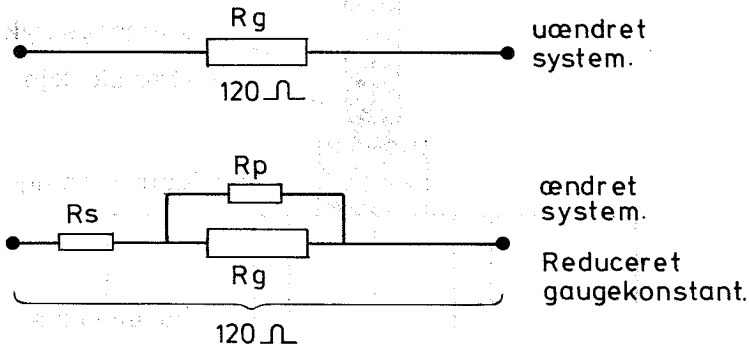


Figur C.2.4. Dynamometer til måling af reaktionerne R_{11}, \dots, R_{22} .

Et nøjagtigt udformet dynamometer af den her omtalte type skulle principielt være helt ufølsomt overfor bøjen-
de momenter, men det er klart, at der på grund af forar-
bejdningens nøjagtighed og monteringsnøjagtighed af strain-
gauges altid vil være en vis momentfølsomhed.

Da dynamometrene var færdige, viste det sig imidlertid, at momentfølsomheden var uacceptabel stor. Der målte en typisk maximal momentfølsomhed på ca. 70 $\mu\text{volt}/\text{Nm}$ ved 6.00 volt brospænding. Dette problem blev klaret ved at afpasse gaugekonstanten for de 4 straingauges i weatstonebroen således i forhold til hinanden at momentfølsomheden blev så lille som muligt. Gaugekonstanten blev ændret ved at parallel- og serieforbindelse med faste modstande som vist i figur C.2.5. På denne måde kan man svæk-

ke gaugekonstanten uden at ændre på den ydre modstand som blev holdt på 120Ω .



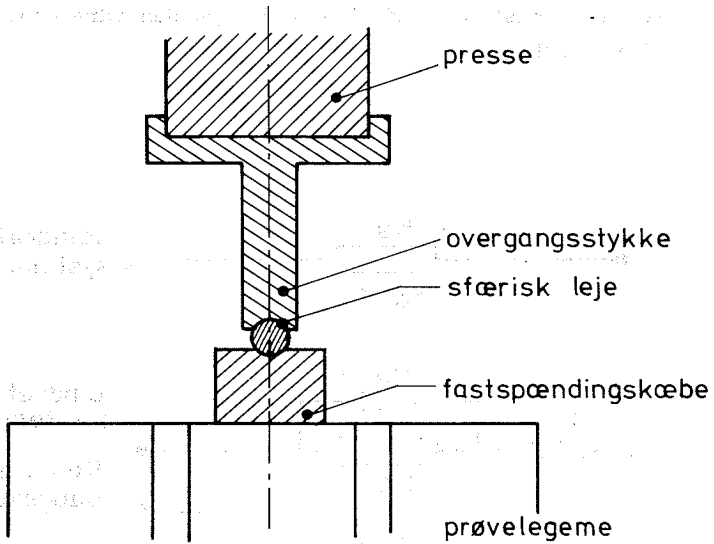
Figur C.2.5. Svækkelse af gaugekonstanten ved hjælp af faste modstande.

På denne måde reduceres momentfølsomheden til maksimalt at være ca. $1 \mu\text{volt/Nm}$ ved 6 volt brospænding.

C.3. Udførelse af dynamometer til måling af K_1 .

Belastningen K_1 påføres konstruktionen ved hjælp af en presse som gennem et overgangsstykke forsynet med et sfærisk leje overfører belastningen til prøvelegemet. Et udsnit af belastningsarrangementet er vist i figur C.3.1.

I overgangsstykket foretoges da forarbejdning til et dynamometer på den på figur C.3.2 viste måde.



Figur C.3.1. Udsnit af arrangement til påførsel af belastningen K_1 .

Målestrækningen ses da at have et areal

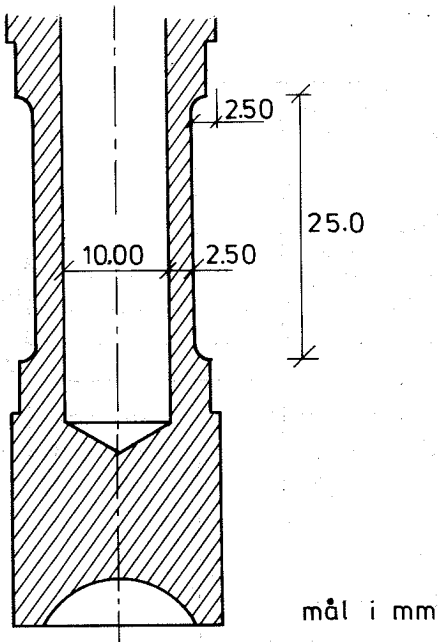
$$A = 0,98 \text{ cm}^2$$

længdetøjningen $\epsilon = 1500 \mu = 1,5 \text{ o/oo}$ svarer da til normalkraften

$$N = 30 \text{ kN}$$

hvilket passer udmærket til de i afsnit C.1 stillede krav.

For at øge opløsningsevnen og mindske usikkerheden på målesignalet, er der på dette dynamometers målestrækning



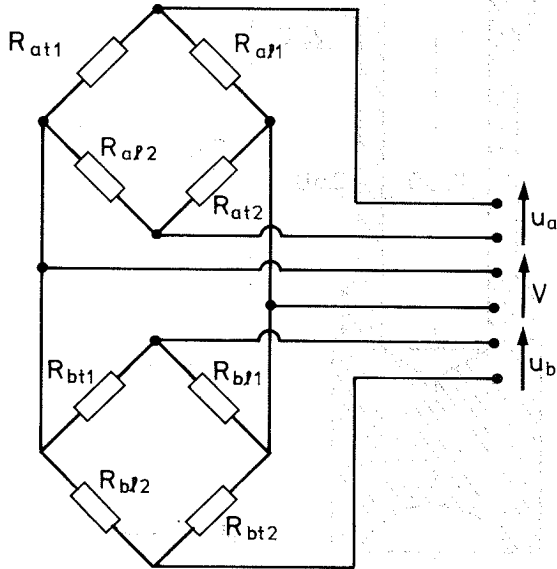
Figur C.3.2. Udførelse af dynamometer til måling af belastningen K_1 .

anbragt i alt 8 strainingauges som er koblet i 2 hele broer på den på figur C.3.3 viste måde. Lægges signalerne fra de to broer sammen $u = u_a + u_b$, så får vi at kalibreringskonstanten k kan beregnes af

$$k = \frac{EA}{(1+\nu)G}$$

Indsættes værdierne fås

$$k \cong 7760 \text{ kN}$$



Figur C.3.3. Kobling af strainingauge på dynamometer til måling af belastningen K_1 .

hvilket giver opløsningsevnen

$$\Delta N = 7760 \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{6} \right) 10^{-6} \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ kN}$$

$$= 1.8 \text{ N}$$

hvilket er i orden sammenlignet med de i afsnit C.1 opstillede krav.

Forarbejdning og opmærkning blev på dette dynamometer

foretaget i drejebænk i samme opspænding. Både målerørets inderside og yderside blev forarbejdet ved drejning. Da ydermere selve målingen foregår med et større antal strain-gauge blev momentfølsomheden for dette dynamometer så lille, at det ikke var nødvendigt at foretage yderligere for at reducere den. Momentfølsomheden blev målt til ca. 5 μ volt/Nm ved 6 volt brospænding. Der blev anvendt 3 x 6 mm² foliegages temperaturkompenseret for blødt stål og pålimet med Eastman 910.

C.4. Kalibrering af dynamometre.

Dynamometrene til måling af reaktionerne R_{11} , R_{12} , R_{21} , R_{22} blev kalibreret på følgende måde, først forbelastedes med træknormalkraften $N = 11$ kN, hvorefter der aflastedes og kalibreredes ved sammenhørende målinger af træknormalkraft og signal. Resultatet af disse kalibreringer fremgår af kalibreringskurverne i figur C.4.1, idet D1 betegner dynamometeret til måling af R_{11} , D2 betegner dynamometeret til måling af R_{12} , D3 betegner dynamometeret til måling af R_{21} , og D4 betegner dynamometeret til måling af R_{22} . Kalibreringspunkterne var $N = 0, 1, 2, 3, \dots, 9, 10$ kN.

Dynamometeret til måling af belastningen K_2 kalibreredes på helt samme måde, bortset fra at der blev kalibreret for tryknormalkræfter. Der blev foretaget 3 kalibreringer umiddelbart efter hinanden, og resultaterne heraf fremgår af tabel C.4.1.

I alle de ovenfor omtalte kalibreringstilfælde foretoges måling af kræfter og signaler automatisk ved hjælp af afdelingens Solartron scannerudstyr. Databearbejdningen foregik pr. edb, idet kalibreringskonstanten blev bestemt som den reciprokke hældning for regressionlinien der angiver signalet u/V som funktion af kraften, og ulineariteten blev bestemt som den maximale afvigelse fra regressions-

linien divideret med fuldt udslag.

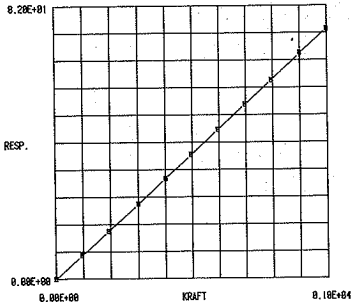
Resultaterne af alle de foretagne målinger er samlet i tabel C.4.2.

Af kalibreringsresultaterne i tabel C.4.1 findes det, at usikkerheden (spredningen) på kalibreringsmålingen er af størrelsesorden 1.5 o/oo.

KALIBRERINGSKURVE FOR DYNAMOMETER 1.

RESPONSE 1000μV ER AFBILDET
SOM FUNKTION AF NORMALKRAFT/KP.

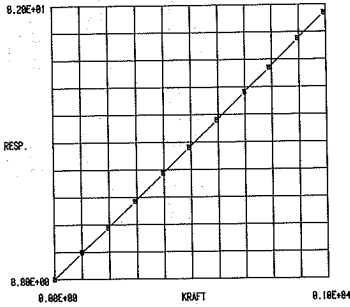
KALIBRERINGSKONSTANT C = 545.3314 MP
ULINEARITET U = 0.88 0/00



KALIBRERINGSKURVE FOR DYNAMOMETER 2.

RESPONSE 1000μV ER AFBILDET
SOM FUNKTION AF NORMALKRAFT/KP.

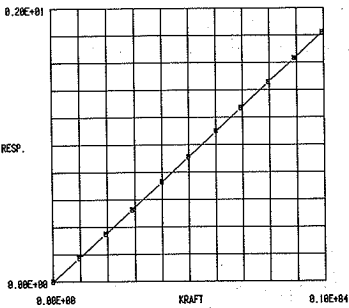
KALIBRERINGSKONSTANT C = 510.8192 MP
ULINEARITET U = 1.86 0/00



KALIBRERINGSKURVE FOR DYNAMOMETER 3.

RESPONSE 1000μV ER AFBILDET
SOM FUNKTION AF NORMALKRAFT/KP.

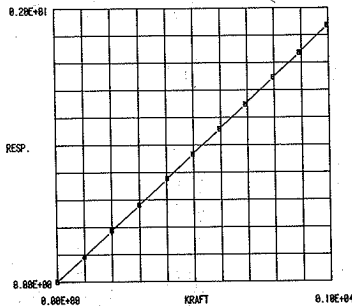
KALIBRERINGSKONSTANT C = 545.4653 MP
ULINEARITET U = 1.00 0/00



KALIBRERINGSKURVE FOR DYNAMOMETER 4.

RESPONSE 1000μV ER AFBILDET
SOM FUNKTION AF NORMALKRAFT/KP.

KALIBRERINGSKONSTANT C = 532.3780 MP
ULINEARITET U = 0.80 0/00



Figur C.4.1. Kalibreringskurver for dynamometrene til måling af reaktionerne R_{11} , R_{12} , R_{21} og R_{22} .

Tabel C.4.1.

Der er angivet 3 kalibreringer af dynamometeret til måling af belastningen K_1 . C angiver kalibreringskonstanten, og U ulineariteten.

KALIBRERINGSTABEL KADK11 KALIBRERING AF DYNAMOMETER		KALIBRERINGSTABEL KADK12 KALIBRERING AF DYNAMOMETER		KALIBRERINGSTABEL KADK13 KALIBRERING AF DYNAMOMETER	
KRAFT KP	SIGNAL 1000U1/V	KRAFT KP	SIGNAL 1000U1/V	KRAFT KP	SIGNAL 1000U1/V
0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000
88.4	0.1136	93.4	0.1165	110.3	0.1424
215.0	0.2718	216.3	0.2733	203.9	0.2603
309.3	0.3940	300.4	0.3831	290.3	0.3732
396.9	0.5082	392.5	0.5026	399.2	0.5147
487.9	0.6266	499.1	0.6396	500.1	0.6457
600.5	0.7731	611.8	0.7878	604.4	0.7817
702.0	0.9045	713.9	0.9208	689.7	0.8925
781.3	1.0071	804.8	1.0385	797.3	1.0322
892.8	1.1525	903.7	1.1653	911.3	1.1788
997.4	1.2859	993.3	1.2813	999.0	1.2937

C = 773.8257 MP
U = 2.35 0/00

C = 772.8315 MP
U = 3.20 0/00

C = 771.5512 MP
U = 1.60 0/00

Tabel C.4.2.

Tabellen angiver kalibreringskonstanten k , ulineariteten U og momentfølsomheden M for dynamometrene til måling af reaktionerne R_{11} , R_{12} , R_{21} og R_{22} samt for dynamometeret til måling af belastningen K_1 .

Dynamometer.	Kalibreringskonstant k/kN	Ulinearitet U·1000	Momentfølsomhed. M·10 ³ kNm
D1 måling af R_{11}	5353	~1.0	~0.2
D2 måling af R_{12}	5013	~1.0	~0.2
D3 måling af R_{21}	5352	~1.0	~0.2
D4 måling af R_{22}	5229	~1.0	~0.2
til måling af K_1	7578	~3.0	~1.0

APPENDIX D. ARBEJDSKURVER FOR VRIDEBØJEFORSØG.D.1. Generelt om målte kurver.

For hvert forsøg er der vist 2 typer kurver. En type som er betegnet med "plot type 2", som viser de målte vridningstøjninger φ_{i2} som funktion af de målte bøjningstøjninger φ_{i1} for hver af fugerne, $i = 1, 2$, samt den tilstræbte sammenhæng antydnet med en fuldt optrukket ret linie, og én type som er betegnet med "plot type 4" som viser henholdsvis den fiktive spændingsparameter s^* og bøjningsbidraget til den fiktive spændingsparameter som funktion af de målte bøjningsdeformationer φ_{i1} for hver af fugerne $i = 1, 2$.

I D.2 og D.3 er vist kurvernes variation med normalkraften K_2 for materialetilfældene henholdsvis 11 som er K100 med massiv sten og 22 som er KC 50/50 med hulsten.

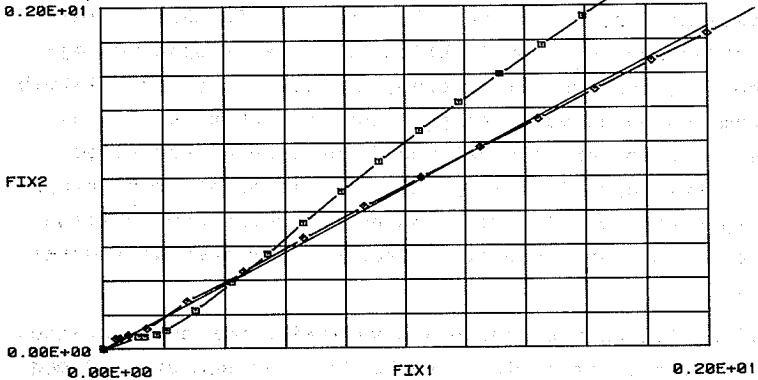
D.4 viser variationen over gentagelser idet resultaterne for tre gentagelser med materialekombinationen 21, d.v.s. KC 50/50 med massiv sten, er vist.

D.2. Tilfælde 2X11.

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2111.3.
 FORSOEG STARTET D. 3. 1.79. KL. 16.17.

FUGE 1 : □
 FUGE 2 : ◆

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

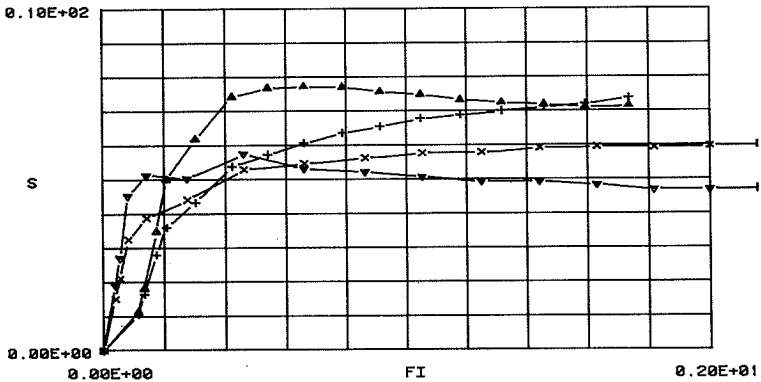


Figur D.2.1

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2111.3.
 FORSOEG STARTET D. 3. 1.79. KL. 16.17.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 1.03 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.

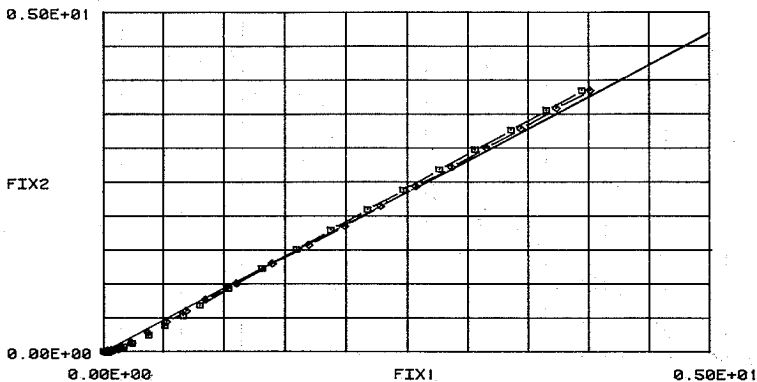


Figur D.2.2

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2211.2.
 FORSOEG STARTET D. 4. 1.79. KL. 14.50.

FUGE 1 : ◻
 FUGE 2 : ◊

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

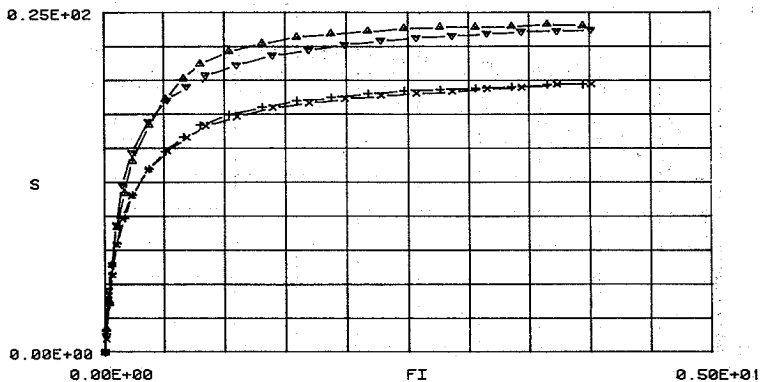


Figur D.2.3

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2211.2.
 FORSOEG STARTET D. 4. 1.79. KL. 14.50.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 1.33 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : Δ, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : ×

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.

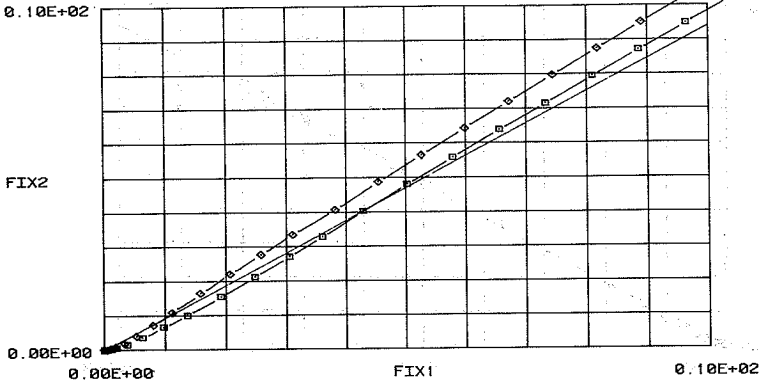


Figur D.2.4

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2311.2.
 FORSOEG STARTET D. 8. 1.79. KL. 12.38.

FUGE 1 : ◻
 FUGE 2 : ◊

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

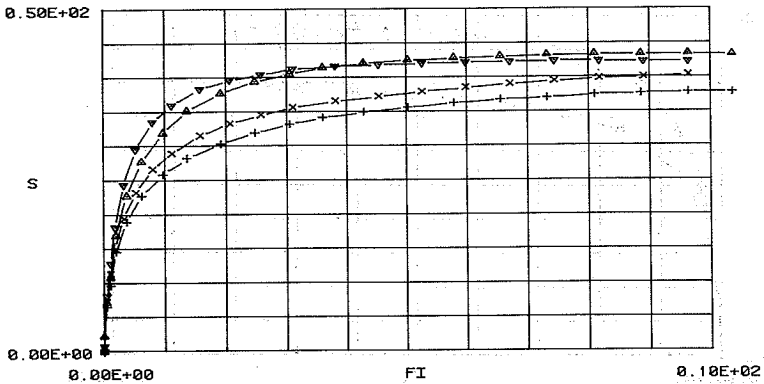


Figur D.2.5

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2311.2.
 FORSOEG STARTET D. 8. 1.79. KL. 12.38.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 1.30 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.

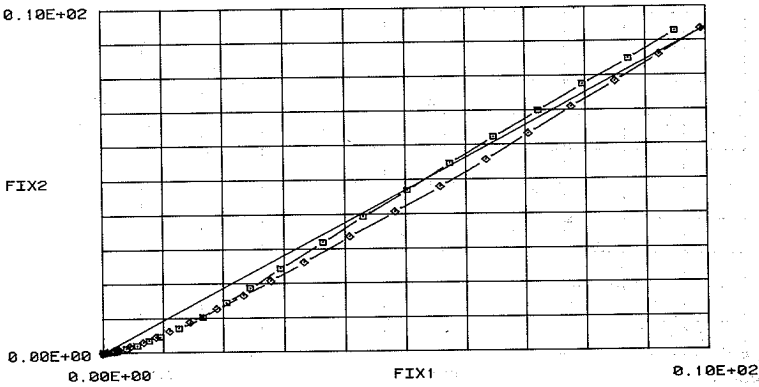


Figur D.2.6

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2411.2.
 FORSOEG STARTET D. 11. 1.79. KL. 12.52.

FUGE 1 : ◻
 FUGE 2 : ◊

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

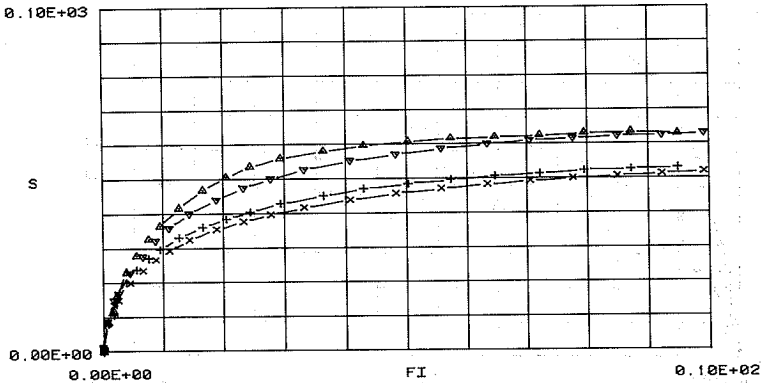


Figur D.2.7

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2411.2.
 FORSOEG STARTET D. 11. 1.79. KL. 12.52.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 1.51 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.

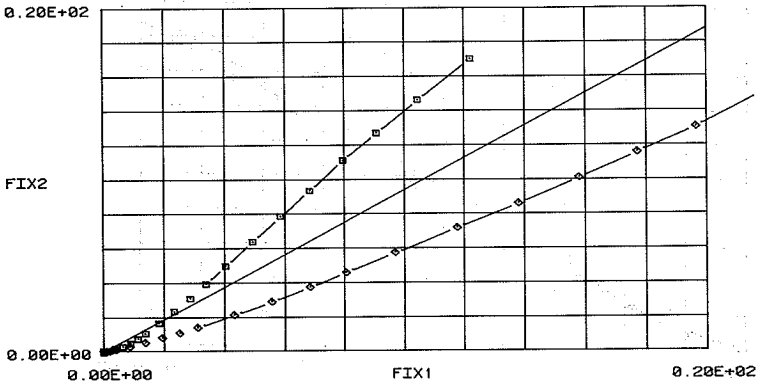


Figur D.2.8

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2511.2.
 FORSOEG STARTET D. 12. 1.79. KL. 14. 6.

FUGE 1 : □
 FUGE 2 : ◇

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

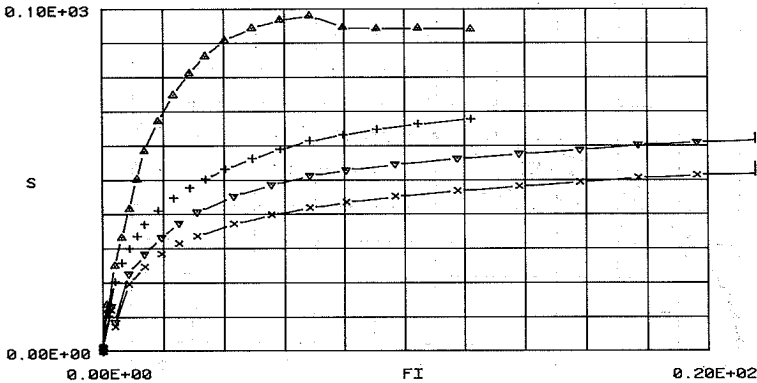


Figur D.2.9

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2511.2.
 FORSOEG STARTET D. 12. 1.79. KL. 14. 6.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 1.51 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.



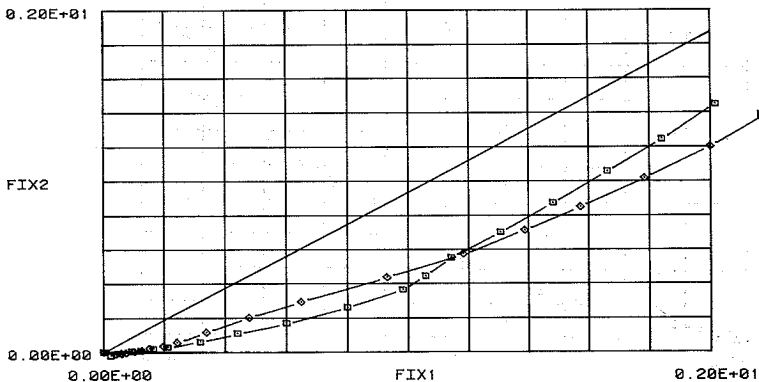
Figur D.2.10

D.3. Tilfælde 2X22.

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2122.3.
 FORSOEG STARTET D. 3. 1.79. KL. 15. 3.

FUGE 1 : ◻
 FUGE 2 : ◊

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

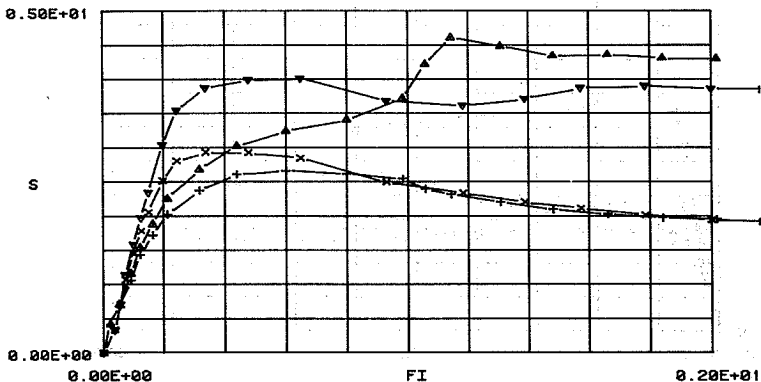


Figur D.3.1

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2122.3.
 FORSOEG STARTET D. 3. 1.79. KL. 15. 3.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 3.23 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.

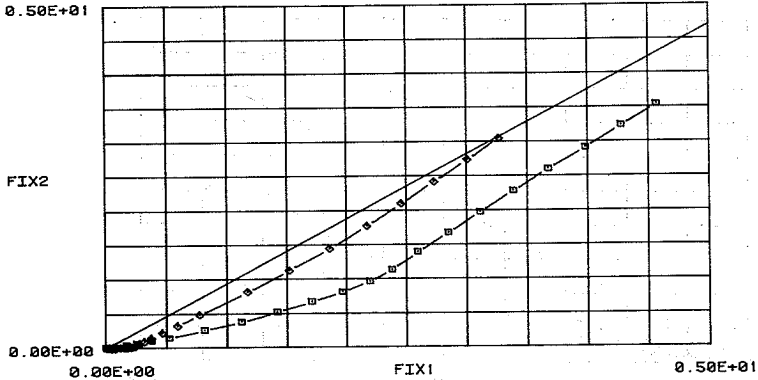


Figur D.3.2

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2222.2.
 FORSOEG STARTET D. 4. 1.79. KL. 13. 8.

FUGE 1 : □
 FUGE 2 : ◇

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

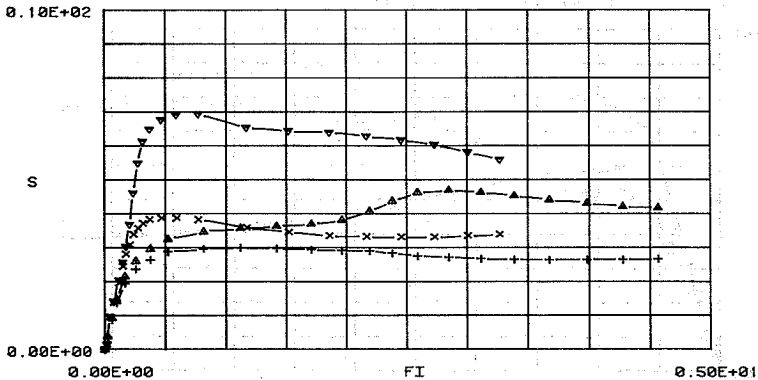


Figur D.3.3

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2222.2.
 FORSOEG STARTET D. 4. 1.79. KL. 13. 8.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 3.66 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.

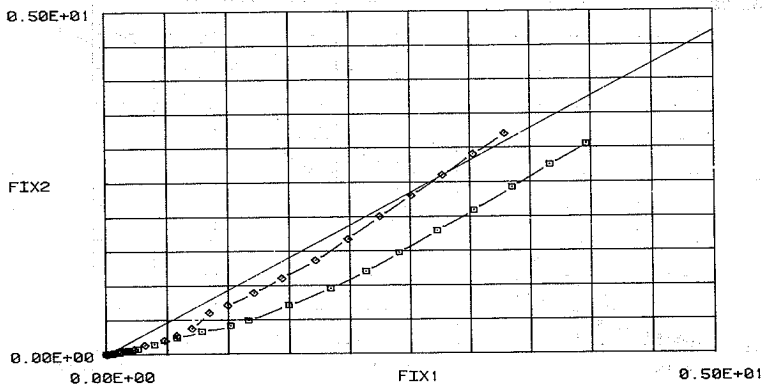


Figur D.3.4

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2322.2.
 FORSOEG STARTET D. 8. 1.79. KL. 10.45.

FUGE 1 : ◻
 FUGE 2 : ◊

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

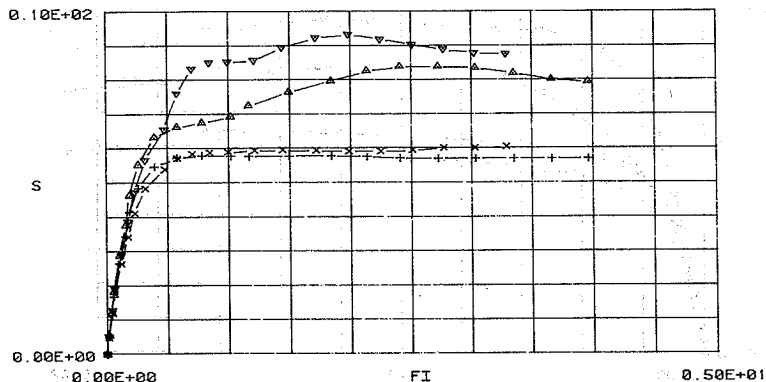


Figur D.3.5

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2322.2.
 FORSOEG STARTET D. 8. 1.79. KL. 10.45.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 4.08 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : ×

S I 0/00 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.

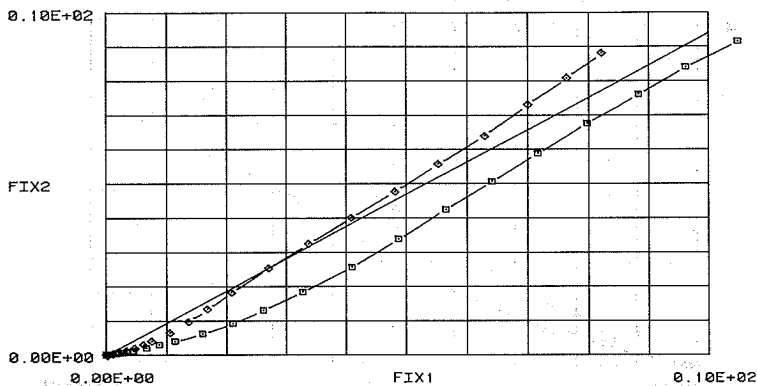


Figur D.3.6

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2422.2.
 FORSOEG STARTET D. 11. 1.79. KL. 10.31.

FUGE 1 : ◻
 FUGE 2 : ◆

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

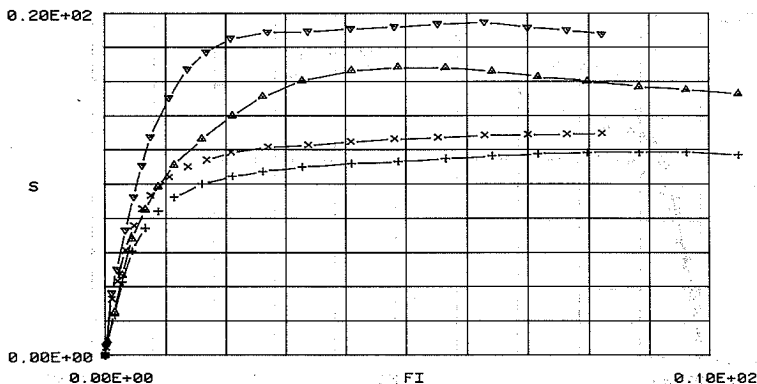


Figur D.3.7

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2422.2.
 FORSOEG STARTET D. 11. 1.79. KL. 10.31.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 3.43 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.

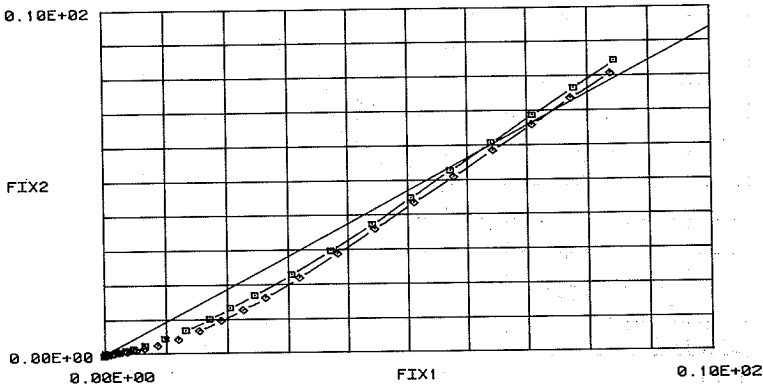


Figur D.3.8

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2522.2.
 FORSOEG STARTET D. 12. 1.79. KL. 13. 3.

FUGE 1 : ◻
 FUGE 2 : ◊

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

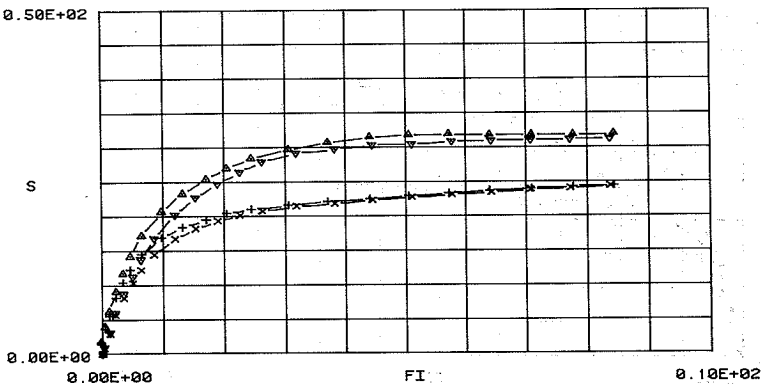


Figur D.3.9

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 2522.2.
 FORSOEG STARTET D. 12. 1.79. KL. 13. 3.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 3.54 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.



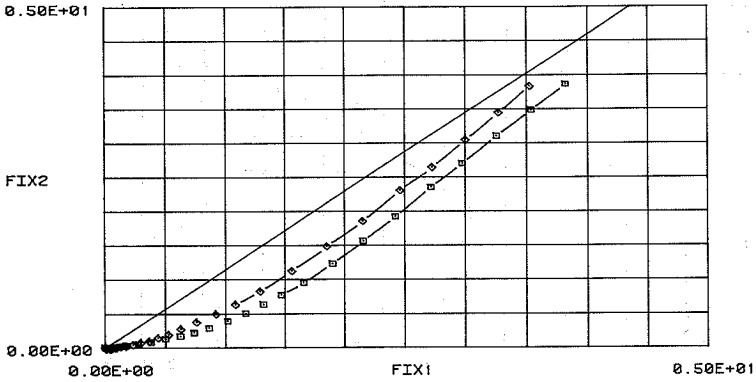
Figur D.3.10

Tilfælde 1321.X

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 1321.1.
 FORSOEG STARTET D. 5.12.78. KL. 10.25.

FUGE 1 : ◻
 FUGE 2 : ◊

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

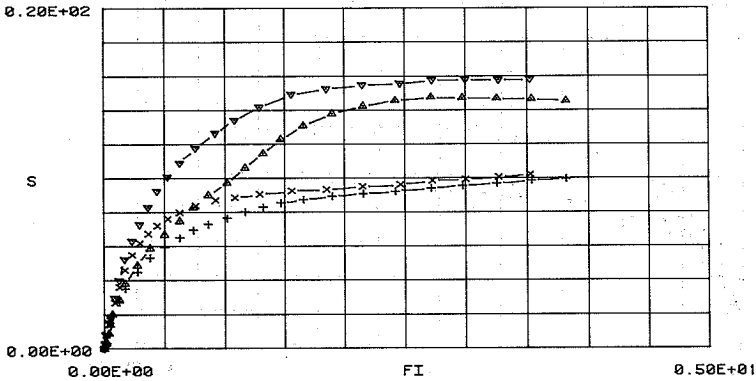


Figur D.4.1

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 1321.1.
 FORSOEG STARTET D. 5.12.78. KL. 10.25.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 4.53 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.

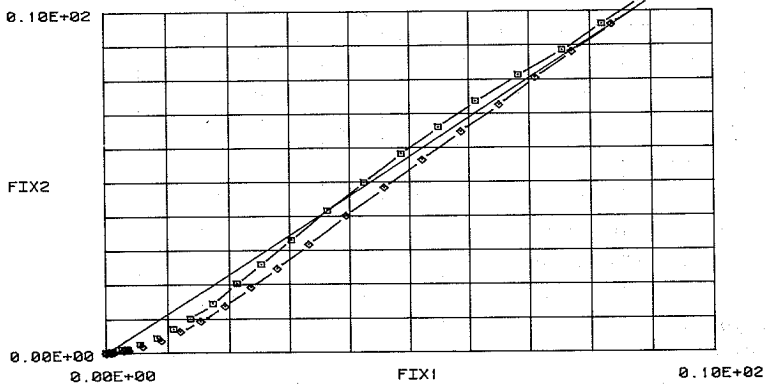


Figur D.4.2

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 1321.2.
 FORSOEG STARTET D. 5.12.78. KL. 11.57.

FUGE 1 : □
 FUGE 2 : ◇

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

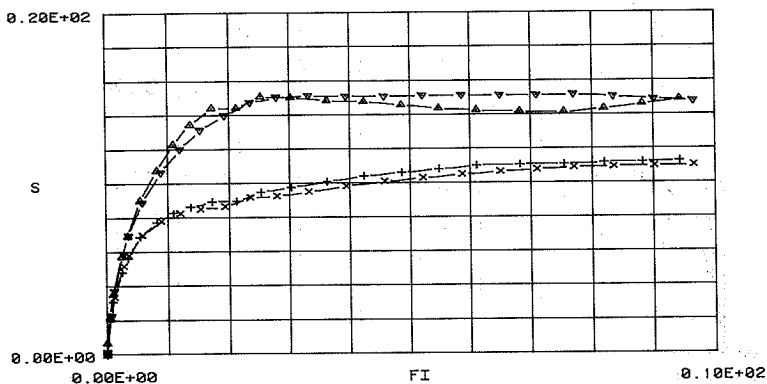


Figur D.4.3

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 1321.2.
 FORSOEG STARTET D. 5.12.78. KL. 11.57.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 4.53 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.

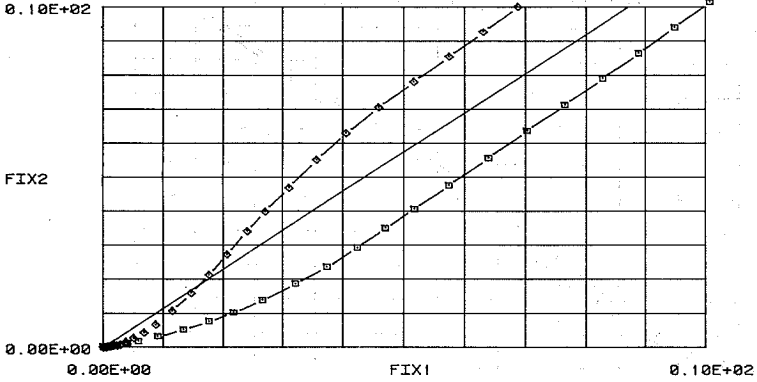


Figur D.4.4

PLOT TYPE 2 FOR FORSOEGSTILFAELDE 1321.3.
 FORSOEG STARTET D. 5.12.78. KL. 14. 1.

FUGE 1 : □
 FUGE 2 : ◆

FI I 0/00 FOR RETN. 2 SOM FUNKTION AF FI I 0/00 FOR RETN. 1.

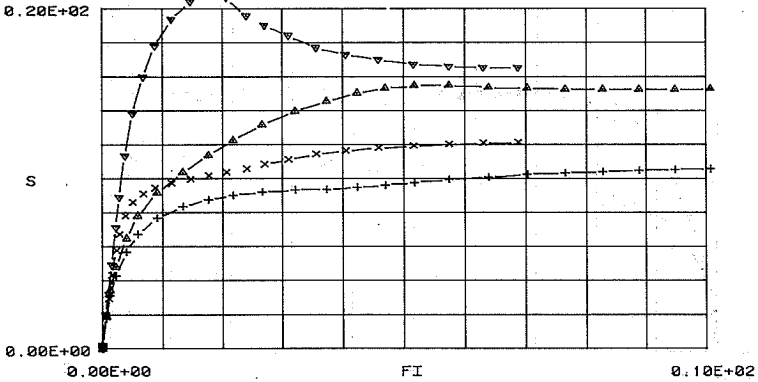


Figur D.4.5

PLOT TYPE 4 FOR FORSOEGSTILFAELDE 1321.3.
 FORSOEG STARTET D. 5.12.78. KL. 14. 1.
 MOERTELTRYKSTYRKE : 4.53 MN/M2.

SPAENDINGSPARAMETER S FUGE 1 : ▲, FUGE 2 : ▼
 BOEJNINGSBIDRAG ALENE FUGE 1 : +, FUGE 2 : x

S I 0/0 SOM FUNKTION AF FI I 0/00.



Figur D.4.6

Referencer.

- [1] Adrian W. Page: Finite Element model for Masonry. Journal of the Structural Division, Vol. 104, No. ST8. Aug. 1978, page 1267-1285.
- [2] Rune Brincker: Beregning af tværbelastede murede vægge. Danmarks tekniske Højskole. Afdelingen for Bærende Konstruktioner, 1977. 213 sider.
-
- [3] H.W.H. West, H.R. Hodgkinson and B.A. Haseltine: Experimental methods and results of tests on small specimens and full-sized walls. The Structural Engineer, October 1977, vol. 55, No. 10, p. 411-421.
- [4] B.A. Haseltine, H.W.H. West and J.N. Tutt: Design of walls to resist lateral loads. The Structural Engineer, October 1977, vol. 55, No. 10, p. 422-430.
- [5] Avne Cajdert: Några beräkningsmodeller för sidebelastat murverk. Jämförelse mellan teori och försök. Chalmers tekniske Högskola. Institutionen för konstruktionsteknik, betonbyggnad. Rapport 75:4 October 1975. 23 sider.
- [6] T. Clayford and M. Grim: Strength and related properties of brick masonry. ASCE, Journ. of the Struc. div., vol. 101, No. ST1. jan. 1975, p. 217-232.

- [7] A.W. Hendry: The lateral strength of unreinforced brickwork.
Structural Engineer. Vol. 51, 1973, p. 43-50.
- [8] J. Morton and A.W. Hendry: A theoretical investigation of the lateral strength of brick walls with precompression.
British Ceramic Society, Proceedings of, No. 21, april 1973.
- [9] A.W. Hendry, B.P. Sinha and A.H.P. Maurenbrecher: Full scale tests on the lateral strength of brick cavity walls with precompression.
British Ceramic Society, Proceedings of, No. 21, april 1973.
- [10] H.W.H. West, H.R. Hodgkinson and W.F. Web: The resistance of brick walls to lateral loading.
British Ceramic Society, Proceedings of, No. 21, april 1973.
- [11] Sven Johansson: Tillämpning av gränslastmetoden vid dimensionering av sidobelastade tegelväggar.
Nordisk Symposium om murværkskonstruktioner 1972, 15 sider.
- [12] P.E. Mondorf: Murværkskonstruktioner.
Polyteknisk Forlag 1972, 273 sider.
- [13] K.M.H. Satti: Model brickwork panels under lateral loading.
PhD thesis, Edinburg, 1972.

- [14] F.Y. Yokel, R.G. Mathey and R.D. Dikkers:
Strength of masonry walls under compressive and
transverse loads.
National Bureau of Standards. (U.S.), Building
science Series 34, March 1971, 74 pages.
- [15] Anders Losberg och Sven Johansson:
Sidotryck på murverksväggar av tegel. Tegel nr.
2, 1969, side 12-17.
- [16] Dansk Ingeniørforenings norm for murværk.
Dansk standard DS 414.
- [17] Åge Hallquist: Fasthetsegenskaber for horisontal-
belastet murværk.
Norges Byggforskningsinstitut. Rapport nr. 56,
1968.
- [18] H. Parland: The effect of cracks and of masonry
Block height on the buckling strength of a column.
Valtion Teknillinen Tutkinuslaitos. 115 publica-
tion. Helsinki 1967.
- [19] C. Falk: Tegl-mørtel-murværk.
Teglindustriens tekniske Tjeneste, 1967. 25 sider.

AFDELINGEN FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

Structural Research Laboratory

Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby

RAPPORTER (Reports)

(1976 -)

- R 69. PEDERSEN, MAX ELGAARD: En 2.ordens tilnærmelse til de konstitutive ligninger for beton. 1976.
- R 70. RIBERHOLT, HILMER and PETER CHR. NIELSEN: Timber under combined compression and bending stress. 1976.
- R 71. KRENCHER, HERBERT og J. BJØRNBÅK-HANSEN: Undersøgelse af let konstruktionsbetons væsentligste materialemparametre. 1976.
- R 72. BRÆSTRUP, M.W., M.P. NIELSEN, FINN BACH and B. CHR. JENSEN: Shear tests on reinforced concrete T-beams. Series T. 1976.
- R 73. NIELSEN, M.P. and M.W. BRÆSTRUP: Plastic shear strength of reinforced concrete beams. 1976.
- R 74. Resume-oversigt 1975. Summaries of papers 1975. 1976.*)
- R 75. BRÆSTRUP, M.W., M.P. NIELSEN, B. CHR. JENSEN and FINN BACH: Axisymmetric punching of plain and reinforced concrete. 1976.
- R 76. BRØNDUM-NIELSEN, TROELS: Partial prestressing. 1976.
- R 77. LAURSEN, M.E.: EQSHELL. An equilibrium shell finite element for arbitrary shell geometry. 1977.
- R 78. DYRBYE, CLAES and FLEMMING BLIGAARD PEDERSEN: Rubber mountings and vibration isolation. 1977.
- R 79. BRÆSTRUP, M.W., M.P. NIELSEN and FINN BACH: Rational analysis and design of stirrups in reinforced concrete beams. 1977.
- R 80. ABK's informationsdag 1977. 1977.
- R 81. Resumeoversigt 1976. Summaries of papers 1976. 1977.
- R 82. MØLLMANN, H.: Static and dynamic analysis of plane cable structures. 1977.
- R 83. RIBERHOLT, H.: Bolte indlimet i limtræ. 1977.
- R 84. AGERSKOV, H. and J. BJØRNBÅK-HANSEN: Fatigue strength of welded connections in round bar steel structures. 1977.
- R 85. LAURSEN, M.E., M.P. NIELSEN and M. ROIKJÆR: Stability analysis of beams and arches by energy methods. 1977.
- R 86. LAURSEN, M.E.: Derivation of symmetric integration formulas for triangles. 1977.
- R 87. LAURSEN, M.E.: Stability and vibration analysis of plane curved beams by an equilibrium finite element method. 1977.
- R 88. PEDERSEN, FLEMMING BLIGAARD: Vibration analysis of viscoelastically damped sandwich structures. 1978.
- R 89. BRØNDUM-NIELSEN, TROELS: Epoxy resin repair of cracked concrete beams. 1978.*)
- R 90. HESS, UWE, B. CHR. JENSEN, M.W. BRÆSTRUP, M.P. NIELSEN og FINN BACH: Gennemlokning af jernbetonplader. 1978.

*) Udsolgt. Out of print.

- R 91. HANSEN, KARL ERIK, KAJ L. BRYDER og M.P. NIELSEN: Armeringsbestemmelse i jernbetonskaller. 1978.
- R 92. ASKEGAARD, V.: Stress and strain measurements in solid materials. 1978.
- R 93. SCHMIDT, HENRIK: Udbredelse af akustisk emission i beton. 1978.
- R 94. BYSKOV, ESBEN og STEEN KRENK: Konstruktionstræs mekaniske styrke. 1978.
- R 95. Resumeoversigt 1977. Summaries of papers 1977. 1978.
- R 96. DYRBYE, CLÆS: Admittance-curves. ZILSTORFF, ANNE and CLÆS DYRBYE: Admittance of bars. 1978.
- R 97. DYRBYE, CLÆS: Dynamic systems with sinusoidal mode shapes. 1978.
- R 98. ANDRESEN, CLAUS: Bjælker og søjler med åbne, tyndvægede tværsnit. 1978.
- R 99. RIBERHOLT, H.: Eingeleimte Gewindestangen. 1978.
- R 100. PEDERSEN, C.: Opbøjet længdearmering som forskydningsarmering. 1978.
- R 101. JENSEN, J.F., M.W. BRÆSTRUP, F. BACH og M.P. NIELSEN: Nogle plasticitetsteoretiske bjækeløsninger. 1978.
- R 102. JENSEN, J.F., C. PEDERSEN, M.W. BRÆSTRUP, F. BACH og M.P. NIELSEN: Rapport over forskydningsforsøg med 6 spændbetonbjælker. 1978.
- R 103. JENSEN, J.F., V. JENSEN, H.H. CHRISTENSEN, F. BACH, M.W. BRÆSTRUP and M.P. NIELSEN: On the behaviour of cracked reinforced concrete beams in the elastic range. 1978.
- R 104. ANDERSEN, ERIK YDING: Konstruktionsovervågning med akustisk emission. Prøvebelastning af landevejsbro. 1979.
- R 105. FREDSGAARD, SØREN SKYTTE: Ligevægtselementer i de finite elementers metode. Formulering og beregningsgang. 1979.
- R 106. AGERSKOV, HENNING: Tests on high-strength bolted T-stub connections. 1979.
- R 107. KIRK, JENS: Direkte beregning af imperfekte skalkonstruktioner. 1979.
- R 108. Resumeoversigt 1978. Summaries of papers 1978. 1979.
- R 109. BRØNDUM-NIELSEN, TROELS: Stress analysis of concrete sections under service load. 1979.
- R 110. BRÆSTRUP, M.W.: Effect of main steel strength on the shear capacity of reinforced concrete beams with stirrups. 1979.
- R 111. BRINCKER, RUNE: Murede vægges tværbæreevne. En undersøgelse af murværks fysiske egenskaber. 1979.

Abonnement 1.7.1979 - 1.7.1980 inden for Danmark kr. 40.-.

Subscription rate 1.7.1979 - 1.7.1980 D.Kr. 60.-.