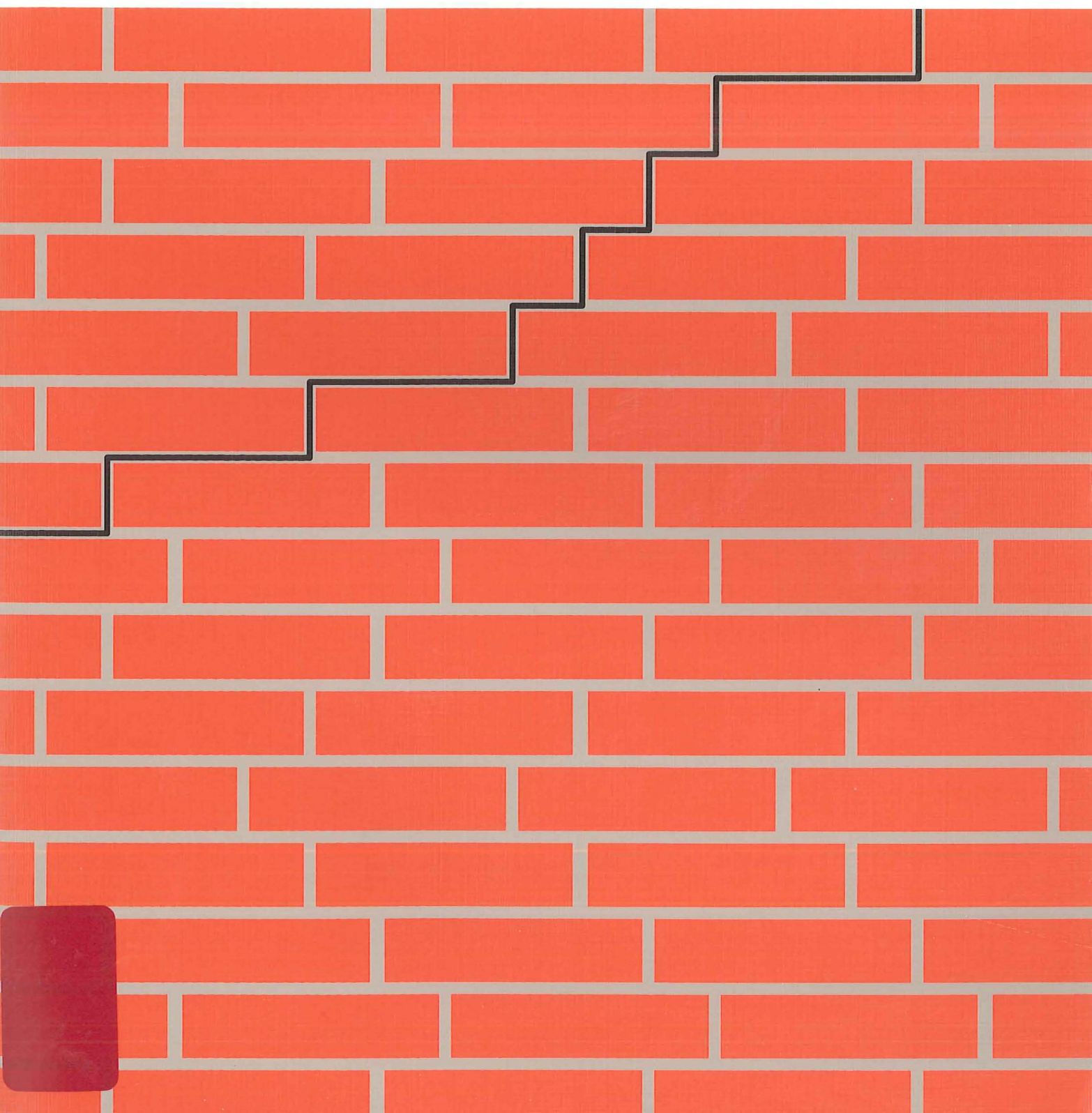


SBI - publikation

Styrkeegenskaber og deformationskapacitet af tværbelastet murværk



SBI-RAPPORT 274 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1997



Styrkeegenskaber og deformationskapacitet af tværbelastet murværk

KLAVS FEILBERG HANSEN

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

ex-1
16 APR. 1997

01406 P



SBI-RAPPORT 274 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1997

SBI-rapporter er beretninger om afsluttede forskningsprojekter.

SBI-publikationer udgives i følgende serier: Anvisninger, Rapporter, Meddelelser, Byplanlægning og Beton. Publikationerne fås gennem boghandelen eller ved at tegne et SBI-abonnement. Institutets årsberetning, publikationskatalog og publiceringsdiskette er gratis og kan rekvireres fra SBI.

SBI-abonnement er en rabatordning med mange fordele for dem, der vil sikre sig løbende orientering om væsentlige udgivelser inden for byggeforskningsområdet. Ring til SBI og hør nærmere.

ISBN 87-563-0955-4.

ISSN 0573-9985.

Pris: Kr. 190,00 inkl. 25 pct. moms.

Oplag: 500.

Tekstbehandling: Inge Thoudahl Lundqvist.

Illustrationer: Annette Juul Muusfeldt.

Omslag: Jørgen Heegaard.

Tryk: Tekst og Tryk A/S.

Statens Byggeforskningsinstitut,

Postboks 119, 2970 Hørsholm.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:

SBI-rapport 274: Styrkeegenskaber og deformationskapacitet af tværbelastet murværk. 1997.

Indhold

1 Forord	4
2 Sammenfatning	5
3 Indledning	8
4 Modeller for tværbelastet murværk	10
4.1. Urevnet murværk	10
4.2. Revnet murværk og murværk i brudstadiet	10
4.2.1. Murværk som homogent materiale	11
4.2.2. Murværk som inhomogent materiale	11
4.3. Brudlinieteorien	15
4.3.1. Eksperimentel bestemmelse af brudmomentet om skrå akser	18
5 4-punkts pladeforsøg	21
5.1. Beskrivelse af forsøgsopstillinger	21
5.2. Forsøgsemnets mulige brudmåder	22
5.3. Præsentation og tolkning af forsøgsresultater	23
5.3.1. Første forsøgsserie	26
5.3.2. Anden forsøgsserie	29
5.3.3. Forsøg med krydsforbandt	33
5.3.4. Forsøg med liggefugearmring	34
5.3.5. Forsøg med ren kalkmørtel	35
5.4. Konklusion	35
Appendiks	39
Summary	81
Litteratur	84

1 Forord

Denne SBI-rapport omhandler en forsøgsrække til bestemmelse af murværks styrke og stivhed. Baggrunden for undersøgelsen er at kendskabet til murværks basale styrke og stivhedsegenskaber er utilstrækkeligt og at dimensionering derfor i dag i høj grad hviler på et empirisk grundlag.

Et bedre kendskab til de basale styrke og stivhedsforhold vil medføre at der ved dimensionering af hule mure og kombinationsmure kan ske en optimering når dimensioneringsgrundlaget hviler på et mere solidt teknisk-videnskabeligt grundlag end tilfældet er i dag.

SBI's eksperimentelle undersøgelser har omhandlet murværks egenskaber ved bøjning om skrå akser i forhold til liggefugerne og er koordineret med et projekt gennemført af Murværksscentret, Dansk Teknologisk Institut hvor der har været gennemført forsøg med bøjning om akser parallelle med liggefugerne.

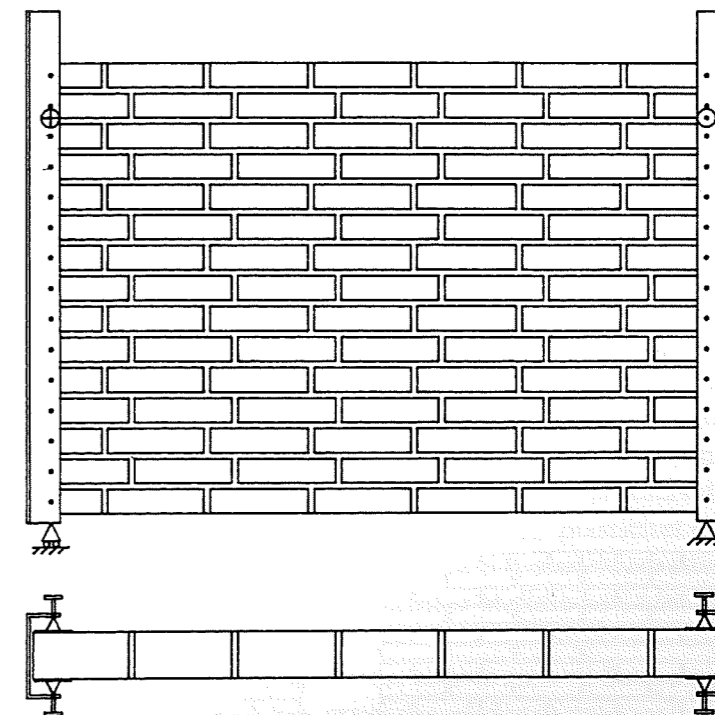
Projektet beskrevet i denne SBI-rapport har været støttet af Statens Teknisk Videnskabelige Forskningsråd (STVF) under projektnummeret (16-5419) og af Murerfagets oplysningsråd (MURO) som har bestøttet materialer og opbygning af forsøgsmurene. Vi takker MURO for den økonomiske støtte til projektet og for et godt samarbejde i forbindelse med planlægningen af forsøgene og opbygning af de mange forsøgsmure.

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
Afdelingen for Materialer og Konstruktioner, januar 1997
Georg Christensen, forskningschef

2 Sammenfatning

Rapporten beskriver en eksperimentel undersøgelse af bøjningsegenskaberne af murværk ved bøjning om akser, som er skrå i forhold til liggefugernes retning.

Der er blevet udført i alt 40 forsøg med ca. $1 \times 2 \text{ m}^2$ store lodret stående murfelter ved såkaldt 4-punkts pladebøjning, hvor forsøgsemnet understøttes i tre hjørner og belastes i det fjerde. Forsøgsemnerne er på de to sider, som er parallelle med studsfugerne, forsynet med en forstærkning således, at et brud i forsøgsemnet er tvunget til at forløbe fra en fri ikke forstærket kant til en fri ikke forstærket kant. Forstærkningerne sikrer dels, at randene under forsøget forbliver rette og dels, at der ikke kan opstå nævneværdige træktøjninger i randens retning.



Figur 1. Forsøgsopstilling.

Forsøgene blev udført deformationsstyret.

- De parametre som blev varieret var:
- Stentype
 - Mørteltype
 - Forbandttype
 - Med og uden liggefugearmring.

De 40 udførte forsøg dækker et forholdsvis bredt spektrum af forskellige typer murværk således, at man kan få et billede af, hvilke faktorer som har væsentlig betydning for murværks bøjningsegenskaber.

Forsøgene omfatter forsøg med tre forskellige mørteltyper, en ren kalkmørtel og to forskellige kalk-cementmørtler KC 60/40/850 og KC 35/65/650.

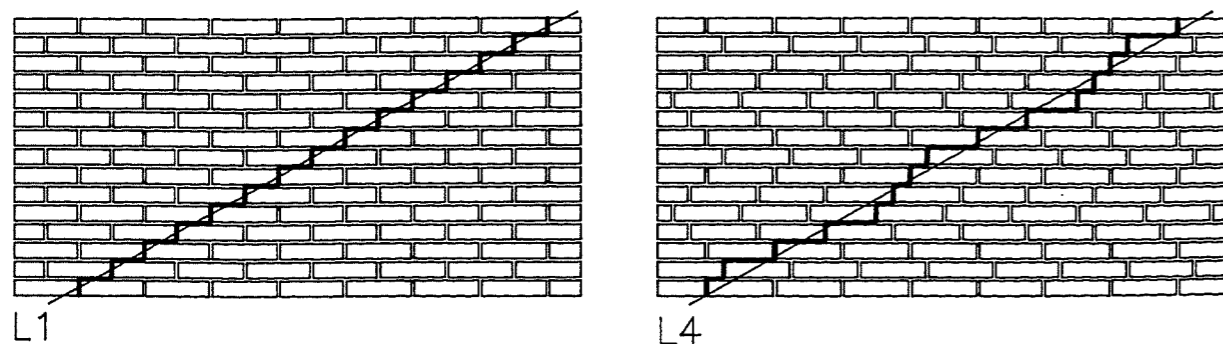
Det er bemærkelsesværdigt, at de to kalk-cementmørtler gav nogenlunde samme bøjningsstyrke for murværket, selv om den rene mørtelstyrke for KC 35/65/650 er 2,5-3 gange højere end for KC 60/40/850. Kalkmørtlen gav væsentlig lavere bøjningsstyrke. Det skyldes, udover at den rene mørtelstyrke er væsentlig lavere, at mørtlen i fugerne kun var hærdet 1-2 cm ind i fugen på prøvningstidspunktet. (Rene kalkmørtelfuger er først gennemhærdet efter adskillige års forløb).

I de forsøgsemner, som var opmuret med KC 60/40/850 skete bruddet fortrinsvis i mørtlen eller i skillefladen mellem sten og mørtel, mens bruddet i forsøgsemnerne opmuret med KC 35/65/650 i langt højere grad medførte revner i murstenene.

Disse forhold lægger op til, at man for mure af gængse danske mursten kan konkludere, at den optimale (balancerede) mørtelstyrke, med hensyn til bøjningsstyrken om skrå akser, er den som svarer til KC 60/40/850, som medfører at et brud primært sker ved revnedannelse i mørtlen. Stærkere mørtler fører ikke til væsentligt større bøjningsstyrker, men bevirker at der dannes flere stenrevner i brudtilstanden.

Forsøgene er udført med fire forskellige stentyper, hvor den stærkeste har en trykstyrke på 46 MPa og den svageste en trykstyrke på 26 MPa. Man kunne derfor forvente, at den ovenfor givne konklusion kunne nuanceres til at afhænge af stentypen. På det foreliggende grundlag er dette imidlertid ikke muligt, hvilket dels skyldes at antallet af forsøg ikke er stort nok, men måske især at stentrykstyrken ikke er nogen god vikarierende parameter for stentrækstyrken, som er den relevante parameter i denne sammenhæng.

Hovedparten af forsøgsemnerne er udført med en af de to viste forbandttyper.



Figur 2. De to mest anvendte forbandttyper kaldet L1 og L4.

Ud fra en simpel geometrisk betragtning over de revnede fugers afstande til de på figuren viste omdrejningsakser, vil man forvente, at forbandttype L4 giver størst bøjningsbæreevne, hvis revnerne kun forekommer i mørtlen.

For forsøgsemnerne opmuret med KC 35/65/650 gav de to forbandttyper L1 og L4 samme bøjningsstyrke, men for den svage kalk-cementmørtel KC 60/40/850 lå alle bøjningsstyrkerne for forsøgsemnerne op-

muret efter L4 forbandtet over alle bøjningsstyrkerne for forsøgsemnerne opmuret efter L1 forbandtet.

Den før formulerede konklusion kan derfor nuanceres på følgende måde.

For mure opmuret af gængse danske mursten er den optimale mørtelstyrke med hensyn til bøjningsstyrken om skrå akser den som svarer til KC 60/40/850. Anvendelsen af KC 60/40/850 medfører, at revnerne i brudtilstanden primært sker ved revnedannelse i mørtlen, og anvendelse af stærkere mørtler fører ikke til større bøjningsstyrker, hvis der er valgt et gunstigt forbandt. Anvendelsen af den stærke mørtel medfører kun, at der dannes flere stenrevner. For ugunstige forbandttyper giver den stærke mørtel 0-20 % større bøjningsstyrke end den svagere.

Forsøg med indlagt liggefugearmring viser, at denne armering ingen indflydelse har på bøjningsstyrken, men den har en gunstig indflydelse på deformationskapaciteten ved maksimallasten.

Arbejdslinierne for de to forsøgsemner hvor der er indlagt armering i liggefugerne, giver så gode plastiske egenskaber, at man kan regne med fuld samvirken mellem skrå og lodrette brudlinier i vægge med liggefugearmring, mens det er usikkert om de vandrette brudlinier også kan samvirke, da deres plasticitet ikke forøges ved indlæggelse af liggefugearmring.

Med hensyn til bøjningsstyrken af murværk ved bøjning om skrå akser var de målte brudmomenter om skrå akser i gennemsnit dobbelt så store som de brudmomenter om skrå akser, som man bestemmer ved anvendelse af murværksnormens (DS 414) vejledende værdier for brudmomenterne ved bøjning om liggefugerne og ved bøjning om studsfugerne.

Forsøgene bekræfter, at de brudmomenter om skrå akser, som en anvendelse af brudlinieteoriens indirekte forudsætter, kan forekomme.

Da forsøgene er udført deformationsstyret, er der fundet arbejdslinier, som også dækker området efter at maksimallasten er opnået. Formen af disse arbejdslinier viser at bruddet ved bøjning om skrå akser besidder en begrænset plasticitet. Det er imidlertid ikke muligt på nuværende tidspunkt, at afgøre om denne plasticitet er tilstrækkelig til, at de skrå brudlinier kan samvirke fuldt med vandrette og lodrette brudlinier, selvom man forudsætter at disse besidder en lignende begrænset plasticitet.

Det kan derfor konstateres, at hvis man vil have større sikkerhed for, at brudlinieteoriens kan anvendes på dansk murværk, er det nødvendigt med forsøg med hele vægfelter med realistiske understøtningsbetingelser hvor alle 3 typer af brudlinier har mulighed for at samvirke. Sådanne forsøg, skal være deformationsstyrede og så godt instrumenterede, at revneudviklingen kan følges, og de bør være ledsaget af en videreudvikling af den teoretiske modellering af murværk, som er beskrevet i [7].

3 Indledning

Murværk anvendes til skalmure, til hule mure og formure i kombinationsvægge hvor bagvæggen enten kan være en elementvæg eller en pladebeklædt skeletvæg. Hule mure og kombinationsvægge skal dels kunne optage lodret virkende excentrisk last på bagmuren (bagvæggen) og dels en vandret vindlast. Skalmure skal kunne overføre vindlasten til den bagved liggende konstruktion.

Murværks styrke og stivhedsegenskaber er ved tværbelastning helt afgørende for, hvilke bæreevner man kan regne med i disse vægtyper.

Der er en grundlæggende mangel på viden på dette område hvilket vanskeliggør en rationel dimensionering af disse vægge. Den eksisterende eksperimentelle viden om tværbelastet murværks egenskaber er især mangelfuld, hvad angår murværks anisotrope egenskaber, da der ikke findes forsøgsserier, hvor murværks bøjningsegenskaber om bøjningsakser med forskellige retninger i forhold til murforbandets hovedretninger er systematisk undersøgt.

Den eksisterende eksperimentelle viden er også mangelfuld, hvad angår tværbelastet murværks deformationsegenskaber i revne- og brudstadiet, idet kun meget få af de i litteraturen beskrevne forsøg har været udført på en sådan måde, at det har været muligt at registrere opførslen ved deformationer større end svarende til den maksimale last.

Denne rapport beskriver en forsøgsrække til undersøgelse af murværks bøjningsegenskaber om skrå akser som funktion af sten-, mørtel- og forbandttype.

Forsøgene blev udført deformationsstyret, således at det var muligt at registrere forsøgsemnernes opførsel i revne- og brudstadiet ved deformationer større end svarende til maksimallasten.

For murværk opbygget af stærke sten og svage mørtler må det forventes, at revnedannelsen kun sker i mørtlen og i skillefladerne mellem sten og mørtel. For murværk opmuret med stærke mørtler må det forventes, at revnerne kan dannes overalt i muren.

Den første type murværk kaldes i denne rapport for inhomogent murværk, mens den sidste kaldes for homogent murværk. Ældre tiders murværk opmuret med ren kalkmørtel kan betragtes som inhomogent murværk, mens en del moderne murværk opmuret med cementrige, stærke mørtler kan betragtes som homogent murværk.

Med hensyn til de to typer murværks mekaniske egenskaber må det forventes, at homogent murværk i kraft af den stærkere mørtel er stærkere og stivere end inhomogent murværk, som så til gengæld må forventes at være et mindre skørt materiale med en revnedannelse som primært sker i fugerne i tilfælde af overbelastning.

Rapportens første del omhandler modeller for tværbelastet murværk. De forskellige modeller som kan opstilles for tværbelastet murværks egenskaber gennemgås i relation til, om murværk kan betragtes som et homogent materiale eller som et inhomogent materiale.

I rapportens anden del beskrives de forsøg, som er udført til bestemmelse af murværks bøjningsegenskaber om skrå akser.

Forsøgene er tilrettelagt med henblik på at få afklaret, om de antagelser der i nugældende praksis gøres vedrørende bøjningsegenskaberne af murværk ved bøjning om skrå akser, er på den sikre eller usikre side, samt om den her introducerede skelnen mellem homogent og inhomogent murværk er relevant.

4 Modeller for tværbelastet murværk

Murede vægge som indgår i hule mure, skalmure og kombinationsvægge er normalt halvstensmure. En muret væg er materialemæssigt karakteriseret ved den stentype og den mørteltype som er anvendt, samt den forbandttype efter hvilken stenene er placeret i forhold til hinanden.

En murs evne til at optage tværlast skyldes primært pladevirkning i muren, dvs. murens evne til at optage bøjningsmomenter om forskellige akser liggende i dens egen plan, og sekundært membranvirkning som afhænger af murens understøtningsforhold. Her betragtes kun pladevirkningen.

Beregningsmodeller for pladevirkning i mure baseres ofte på en antagelse om, at murværk kan betragtes som et homogent materiale, hvor materialegenskaberne for det homogene materiale bestemmes som et passende gennemsnit af sten og mørtelegenskaberne.

4.1. Urevnet murværk

For tværlaster, som ikke giver anledning til nævneværdig revnedannelse i muren, ligger de fejl homogenitetsantagelsen medfører inden for den fejlmargen, som usikkerheden på sten og mørtelegenskaberne medfører. Homogenitetsantagelsen beskrives nærmere i afsnit 4.2.1.

4.2. Revnet murværk og murværk i brudstadiet

For større tværlaster, som medfører revnedannelse i muren, er homogenitetsantagelsen mindre indlysende, da revnerne har tendens til, at dannes i mørtlen og langs skillefladerne mellem mørtel og sten, hvilket er i modstrid med homogenitetsantagelserne. For mure opbygget af relativt svage mørtler og stærke sten vil revnedannelsen primært ske i mørtlen og i skillefladerne mellem sten og mørtel. Brudlast og brudmekanisme for en sådan mur vil, udover at være afhængig af mørtelstyrken og af vedhæftningen mellem sten og mørtel også afhænge af forbandttypen, som kan siges at angive regler for revneudbredelsen.

I mure opbygget med stærke mørtler kan revnerne forventes at forløbe både gennem stenene og i mørtlen. I disse mure er revneudbredelsen ikke afhængig af stenenes indbyrdes placering dvs. ikke afhængig af forbandttypen, og homogenitetsantagelsen kan derfor i dette tilfælde også anvendes i revne- og brudstadiet.

Ud fra deres opførsel i revne- og brudstadiet kan tværbelastede mure derfor inddeles i to grupper,

- mure hvor revnerne forløber uafhængigt af forbandtet (homogent murværk)
- mure hvor revnerne kun forekommer i mørtlen og i skillefladerne mellem sten og mørtel (inhomogent murværk).

I praksis er opdelingen i de to grupper ikke skarp, og i mange mure vil begge revnetyper forekomme.

I det følgende vil de to grupper blive betragtet fra et beregningsteknisk synspunkt.

4.2.1. Murværk som homogent materiale

Fra et beregningsteknisk synspunkt er "Murværk som homogent materiale" den gruppe, som umiddelbart er lettest at håndtere.

I dette tilfælde suppleres homogenitetsantagelsen med en antagelse om ortotropi for væggenes bøjningsegenskaber. Ortotropiantagelsen bevirker, at bøjningsegenskaberne om en vilkårlig akse i murens plan kan bestemmes ud fra bøjningsegenskaberne om to på hinanden vinkelrette hovedakser, alene ud fra den vinkelaksen danner med en af hovedakserne. De to hovedakser antages at være parallelle med liggefugerne og med studsfugerne.

Disse simple antagelser om homogenitet tager sigte på en anvendelse af brudlinieteorien. Homogeniseringen kan imidlertid også foretages med andre antagelser som beskrevet i [1], som indeholder en lang række artikler over emnet homogenisering af "Composite media".

For tværbelastet murværk er der i [2] beskrevet en metode, hvor murværk modelleres som et elastisk-skørt materiale.

Homogeniseringen udføres i tre trin.

Først homogeniseres i vandret retning, idet hver vandret strimmel bestående af mursten og studsfuger homogeniseres. Væggen kan nu betragtes som et laminat bestående af på hinanden følgende lag af liggefuger og homogene strimler repræsenterende stenene og studsfugerne. Herefter homogeniseres dette "laminat" til et ækvivalent ortotrop materiale. I revnetilstanden homogeniseres en revne ved at tillægge omegnen en krumning.

Baseret på disse homogeniseringsteknikker er der udviklet et finite element program, som kan behandle rektangulære vægfelter med og uden huller. Metoden ser ud til at stemme godt med forsøgsresultater. [2].

4.2.2. Murværk som inhomogent materiale

For de mure, hvor revnedannelsen kun forekommer i mørtlen og i skillefladerne mellem sten og mørtel, er homogenitetsantagelsen for grov, og der er behov for modeller, som mere nuanceret tager hensyn til, at muren består af to materialer med forskellige egenskaber.

De mest nuancerede modeller, hvor både sten og mørtel diskretiseres og modelleres med kontinuums-elementer (finite elements), fører til så store regnetekniske problemer, at de indtil videre i praksis er uanvendelige.

4.2.2.1. Interface modeller

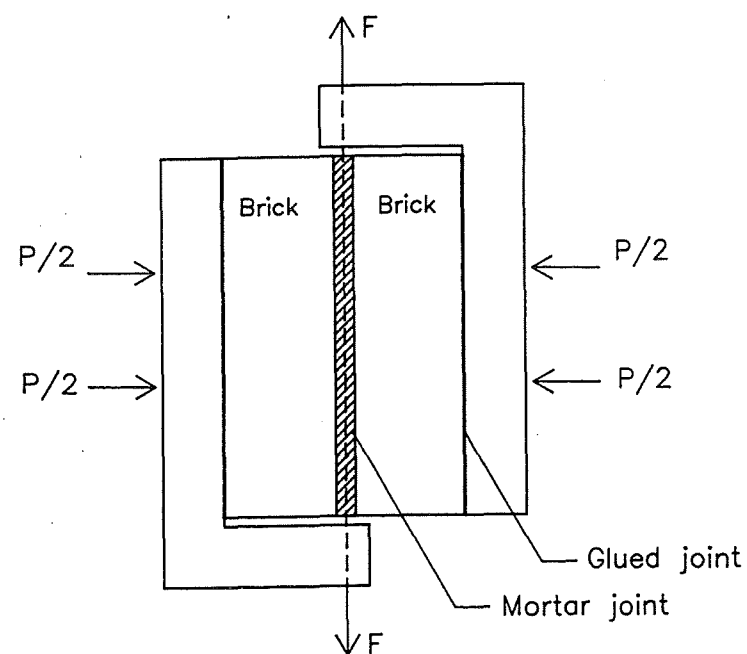
Flere forfattere [3], [4], har udviklet grovere modeller for skivebelastet murværk, hvor stenene modelleres med kontinuums-elementer, mens mørtelfugerne modelleres med såkaldte interfacelementer, der er endimensionale elementer, som binder to sten sammen, og som fungerer som lokalitet for ikke elastiske deformationer. Disse modeller muliggør, at der tages hensyn til, at forskydningsarbejdslinien for en mørtelfuge udviser "softening", samtidig med at forskydningsdeformationen er ledsaget af en dilatation vinkelret på forskydningsretningen. Med disse

modeller er der opnået god overensstemmelse mellem beregnede og eksperimentelt bestemte arbejdslinier for skivebelastet murværk.

For tværbelastet murværk er der på SBI i et ph.d.-projekt [7] udviklet en model analog til den ovenfor beskrevne.

Da tværbelastet murværk udgør et rumligt problem, i modsætning til det plane skivebelastede, er der foretaget den yderligere forenkling, at stenene modelleres som uendelig stive legemer. Dette medfører, at interface elementerne også skal modellere stenenes elastiske egenskaber.

Interface elementernes egenskaber bestemmes direkte ved et forskydningsforsøg med en enkelt liggefuge mellem to sten, som vist på figur 3.



Figur 3. Forsøgsopstilling til bestemmelse af en enkelt liggefuges egenskaber.

P er normalkraften i fugen som søges holdt konstant under forsøget, og F er forskydningskraften. Forsøget udføres deformationsstyret, hvor der styres efter stenenes forskydningsflytning. Under forsøget registreres udover forskydningskraften F også stenenes flytning vinkelret på fugens retning, kaldet dilatationen.

På nuværende tidspunkt er denne metode kun afprøvet på nogle forsøg med vridningspåvirkning af en enkelt liggefuge [5] og med kombineret vridnings- og bøjningspåvirkning på en enkelt liggefuge [6]. Disse forsøg er simuleret med godt resultat i [7]. Metoden forventes også at kunne bruges til, at simulere simple bøjningsforsøg samt de i denne rapport beskrevne forsøg. Metoden vil dog næppe kunne anvendes til beregning af hele vægfeltet indenfor en overskuelig tid.

4.2.2.2. Kvalitative modeller

Det er også muligt at opstille kvalitative modeller for tværbelastede mure, som tager hensyn til murens diskrete opbygning ud fra enkle kinematiske og geometriske overvejelser.

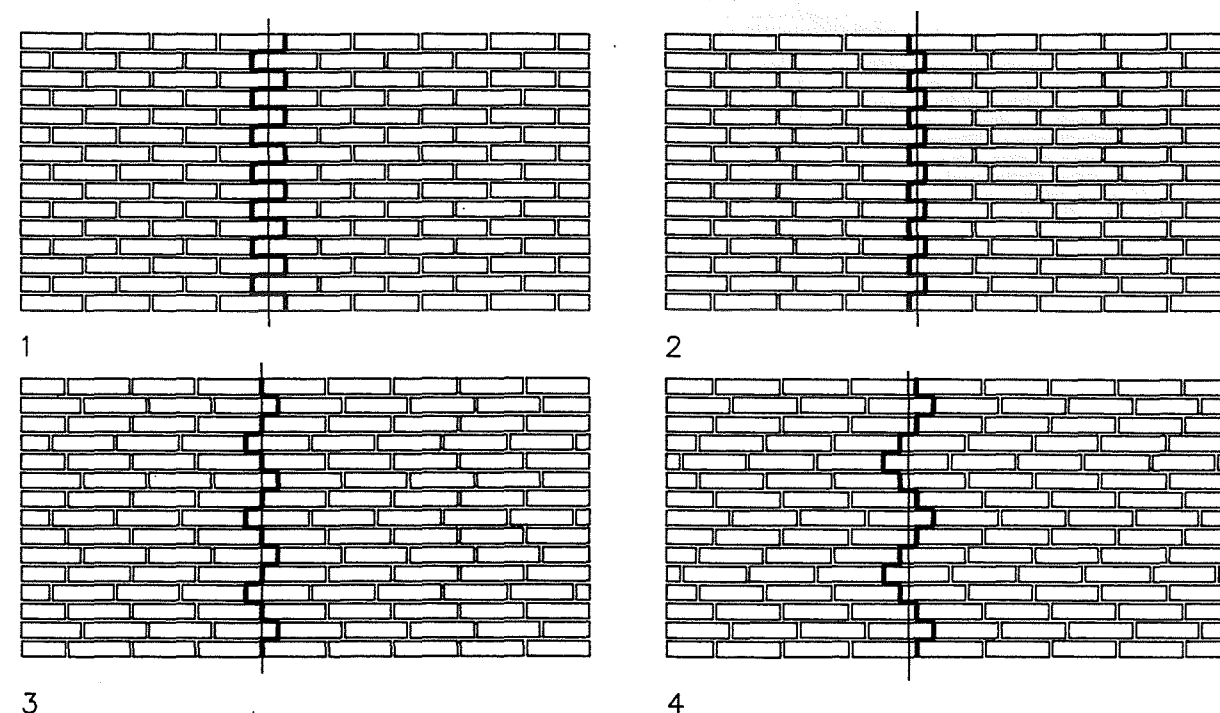
De følgende udledninger er baseret på sådanne overvejelser.

Når revnerne er forudsat kun at forløbe i fugerne, vil forløbet af en bøjningsrevne være styret af forbandtet.

I det følgende betragtes de tre tilfælde, bøjning om akser parallelle med liggefugerne, bøjning om akser parallelle med studsfugerne og bøjning om skrå akser.

Ved bøjning om vandrette akser vil bøjningsrevnerne enten forløbe i de vandrette gennemgående liggefuger i muren eller i skillefladerne til stenene, umiddelbart over eller under den gennemgående liggefuge. Revneforløbet er i dette tilfælde uafhængigt af forbandttypen.

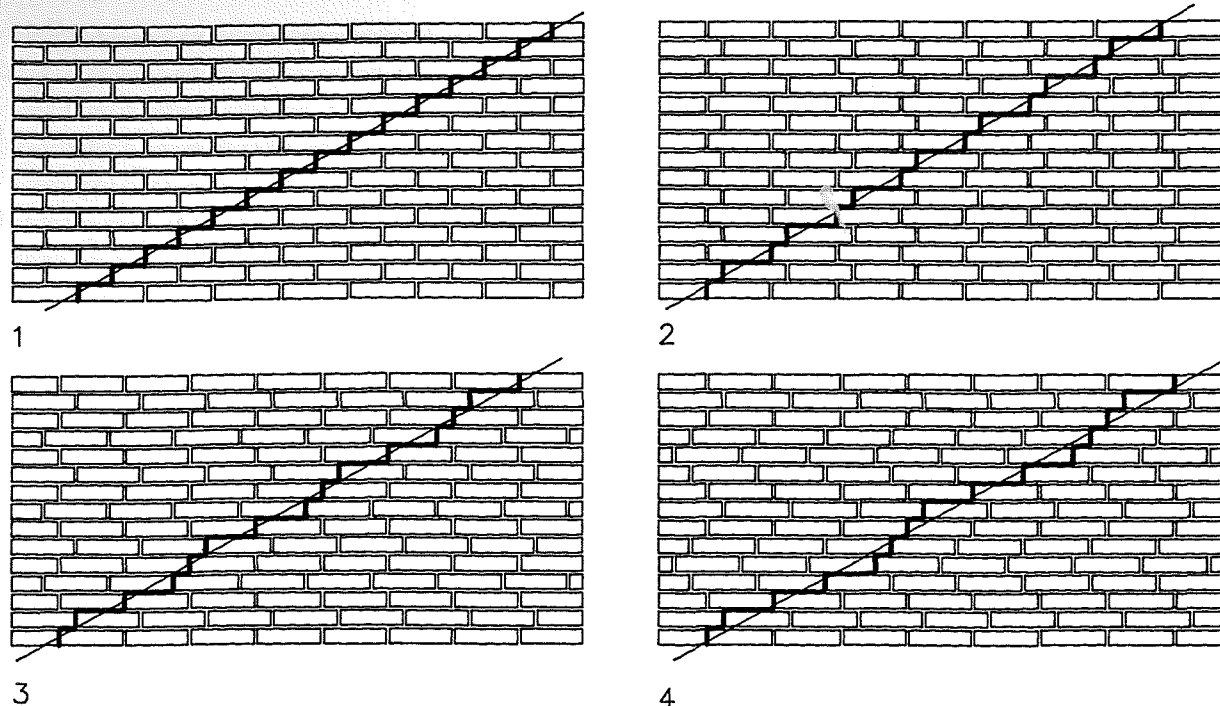
Ved bøjning om lodrette akser vil bøjningsrevnernes forløb være styret af forbandtet som vist på figur 4.



Figur 4. Bøjningsrevner om lodret bøjningsakse.

Ud fra en simpel geometrisk betragtning over de revnede fugers afstande til de på figuren viste omdregningsakser vil det forventes, at forbandttype 1 og 4 giver størst bøjningsbæreevne efterfulgt af forbandtterne 3 og 2.

Ved bøjning om skrå akser vil bøjningsrevnernes forløb også være styret af forbandtet som vist på figur 5.



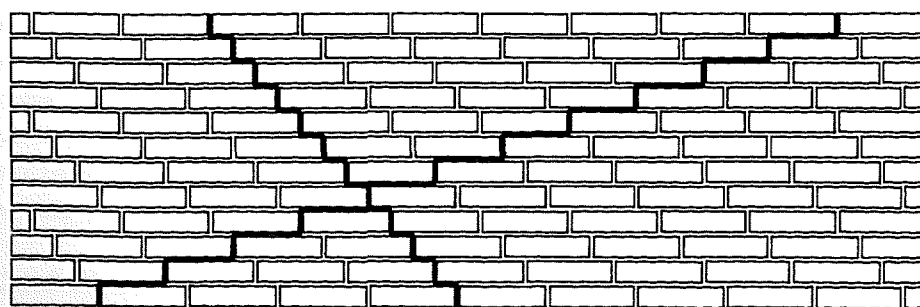
Figur 5. Bøjningsrevner om skrå akser.

Ud fra samme geometriske betragtninger som ved bøjning om lodrette akser vil det forventes, at forbandttype 4 giver størst bøjningsbæreevne, efterfulgt af forbandtterne 3, 2 og 1 i aftagende rækkefølge.

På figur 5 er alle 4 bøjningsakser bestemt som tyngdepunktslinie for det stejleste trappeformede revneforløb, som forbandtet tillader.

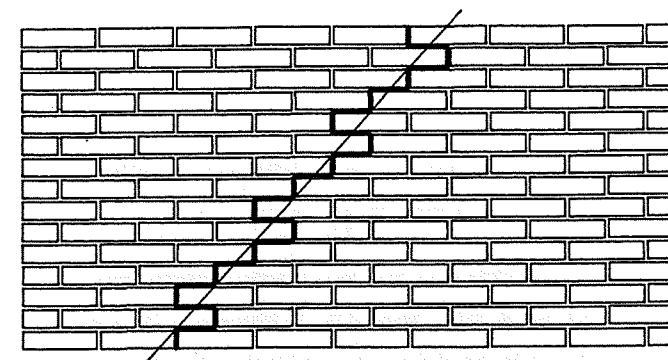
Det ses at disse 4 akser, alle danner samme vinkel med liggefugerne. Denne hældning af stejleste trappelinie er ens for alle periodiske løberforbandter med lodrette symmetriakser.

For løberforbandter, som ikke har lodrette symmetriakser, afhænger stejleste trappelinie af, om den forløber opad til højre eller nedad til højre som vist på figur 6.



Figur 6. Stejleste trappelinier i usymmetrisk helstensforbandt.

For stejlere bøjningsakser kan bøjningsrevnerne ikke danne en trappelinie, og revnen må nogle steder løbe "baglæns" som vist på figur 7.



Figur 7. Bøjning om akse stejlere end stejleste trappelinie.

Ved bøjning om den viste akse vil de sten som på 3 sider grænser op til en bøjningsrevne inducere skivekræfter i muren, fordi disse sten ved drejning om den skrå akse vil skubbe den ovenfor liggende og nedenfor liggende del af muren fra hinanden, og bøjningsrevnen er derfor ikke kinematisk mulig.

Det kan således konkluderes, at når revnerne kun forløber i mørtlen og i skillefladerne mellem sten og mørtel, kan der ikke forekomme brudlinier, som er stejlere end svarende til den stejleste trappelinie, som forbandtet tillader.

Bøjningsakser, som er mindre stejle end svarende til den stejleste trappelinie, kan alle tilnærmes med en trappelinie.

4.3. Brudlinieteorien

Brudlinieteorien er basis for beregningen af tværbelastet murværk i flere landes normer, bl.a. den danske og den engelske, svarende til at homogenitetsantagelsen og ortotropiantagelsen er suppleret med en antagelse om, at murværk ved tværbelastning kan antages at opføre sig plastisk. Det vil fremgå af det følgende, at murværk kun delvis opfylder de forudsætninger, som stilles for at brudlinieteorien kan anvendes. Anvendelsen af brudlinieteorien på murværk kræver derfor eksperimentel verifikation.

Når brudlinieteorien på trods af dette alligevel anvendes så meget til praktiske beregninger, og formentlig også en tid fremover vedblivende vil være den dominerende metode, skyldes det at alternative metoder fx finite element metoden baseret på mere realistiske forudsætninger, på nuværende tidspunkt, kun kan betragtes som forskningsværktøjer, der er knyttet til bestemte forskningsmiljøer, idet der ikke hersker enighed om, hvad der er realistiske forudsætninger og dermed heller ikke hvilke grundlæggende materialemodeller, der skal anvendes. I modsætning hertil er brudlinieteorien en veldefineret og simpel metode at anvende, og den kan nemt suppleres med korrektionsfaktorer, hvis der findes væsentlige afvigelser fra forsøgsresultater.

Der er udført et relativt stort antal forsøg med 2-, 3- og 4-sidet understøttede halvstensmure, som dokumenterer at brudlinieteorien kan anvendes. Bortset fra de 2-sidet understøttede er alle udført i udlandet. I [8] findes en beskrivelse af forsøg med 2-sidet understøttet murværk samt en sammenfatning af udenlandske forsøg med 3- og 4-sidet understøttet murværk udført før 1984.

Forfatterne til disse forsøg konkluderer næsten alle, at virkemåde (brudmekanisme) og bæreevne kan forudsiges af brudlinieteori for ortotrope plader med hovedakser parallelle med liggefuger og studs-fuger. Brudmomenterne om hovedakserne, som er anvendt i brudlinie-beregninger, er fundet ved en-akset bøjning af små mure, kaldet minivægge. Se figur 8.

Den rent talmæssige overensstemmelse mellem brudlinieteoriens bæreevner og forsøgsresultaterne er god, idet dog forsøgene i gennemsnit viser lidt højere bæreevner end forudsagt af teorien. De fejlkilder og usikkerhedsmomenter der skal regnes med ved anvendelse af brudlinieteori på de omtalte forsøg, er dels faktorer, som isoleret set skulle medføre at brudlinieteori giver større bæreevner end forsøgene, og dels faktorer som isoleret set skulle medføre, at brudlinieteori giver mindre bæreevner end forsøgene. Endelig er der faktorer, hvor det kan gå til begge sider.

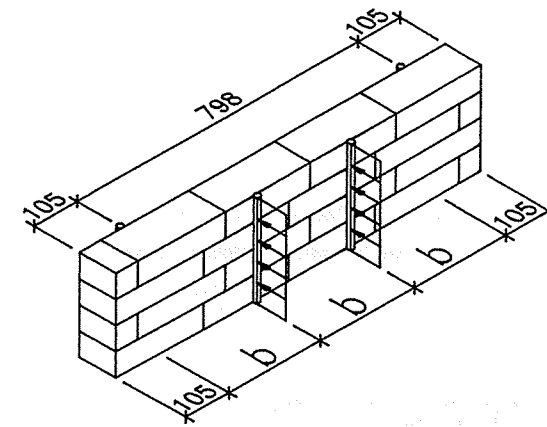
Der er i hvert fald to forhold, som medfører at brudlinieteori overvurderer murværks bæreevne. Det ene forhold er, at murværk kun har begrænsede plastiske egenskaber, således at brudmomentet ikke har sin maksimalværdi langs alle brudlinier i en brudfigur samtidigt. Hvor begrænset murværks plastiske egenskaber er, kan ikke afledes af de udførte forsøg med hele vægfeltet. Forsøgene har været udført med luftpudebelastning, hvilket udelukker en bestemmelse af vægfeltets arbejdslinie, efter at maksimal lasten er nået. De omtalte detailforsøg med minivægge er også udført på en sådan måde, at arbejdslinien kun har kunnet bestemmes indtil maksimallasten.

Det andet forhold er, at teorien giver en øvre værdi for bæreevnen. Den måde teorien anvendes på i praksis fører til bæreevner, som er 10-20% for store i forhold til den korrekte plasticitetsteoretiske bæreevne.

Der er to forhold, som isoleret set skulle medføre at brudlinieteori, eller rettere sagt den måde brudlinieteori anvendes på, undervurderer forsøgsemnernes bæreevne.

Det ene forhold er, at de understøtninger der er anvendt i forsøgene bevirker, at der kan overføres membrankræfter til muren via friktion mellem mur og understøtning. Forudsætter man, at friktionskoefficienten mellem murværk og understøtning (som ofte udgøres af en stiv stålramme) er 1, giver en overslagsberegning på brudmekanismen, at friktionskræfternes arbejde medfører en forøgelse af bæreevnen med 10-20%. Hertil kommer, at membrankræfterne sandsynligvis også vil forøge bøjningsstyrken inde i væggen. I de rapporterede forsøg med hele vægge er det ikke muligt nærmere at bestemme størrelsen af friktionskræfterne.

Det andet forhold er bestemmelsen af brudmomentet ved bøjning om studsfulgerne. Disse brudmomenter findes ved en-akset bøjning af en 4 skifter høj minivæg som vist på figur 8.



Figur 8. Fire skifter høj minivæg til bestemmelse af brudmomentet om studsfulgerne.

Da minivæggen kun er 4 skifter høj må det forventes, at kærsvirkningen hidhørende fra de studsfuger, som afsluttes ved bjælkens over og underside, medfører en mærkbar svækkelse af bjælken især ved relativt svage mørtler. Det er endvidere uheldigt, at forsøgsemnet indeholder et lige antal skifter, da dette medfører, at bjælken ikke er symmetrisk om bjælkeaksen og derfor udsættes for to-akset bøjning, selv om forsøgsopstillingen forudsætter en-akset bøjning.

Sammenholdes virkningen af de faktorer der indikerer, at brudlinieteoriens bæreevne skulle være på den usikre side, og de faktorer som indikerer resultater på den sikre side, med det faktum, at forsøgsresultater i gennemsnit giver større bæreevne end brudlinieteori, er en mulig konklusion, at brudlinieteori i gennemsnit giver rimelige værdier for halvstensmures bæreevne, idet de større eksperimentelle bæreevner kan forklares ved, at der ikke er taget hensyn til friktionskræfternes virkning. På grund af de dårligt definerede understøtningsforhold og den manglende deformationsstyring af lastpåførelsen er det ikke meningsfyldt at analysere de udenlandske forsøg nærmere.

De i [8] behandlede forsøgsresultater stammer alle som omtalt fra forsøg udført før 1984. I den mellemliggende tid (til 1995) er der ikke rapporteret forsøg, som væsentligt kan ændre ved den ovenfor formulerede konklusion på nær en enkelt undtagelse.

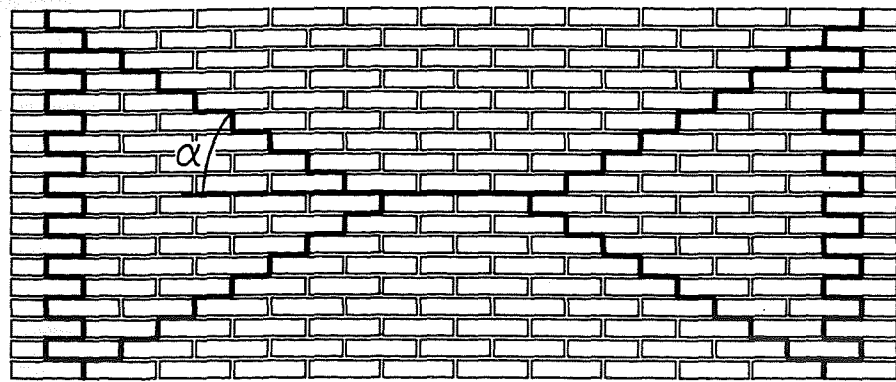
I [9] er der givet forsøgsresultater for 7 simpelt understøttede vægge belastet med en luftpude og tilhørende forsøg med minivægge til bestemmelse af bøjningstrækstyrkerne. Forsøgsopstillingen er udført på en sådan måde, at friktion mellem forsøgsemne og understøtningsramme skulle være elimineret. Samtlige forsøgsresultater er på den usikre side i forhold til brudlinieteori, og i gennemsnit giver brudlinieteori 27% for høje bæreevner. Selv med de store usikkerheder murværksforsøg er behæftet med, må 27% absolut anses for at være en signifikant afvigelse.

Vedrørende forsøgenes relevans for dansk murværk skal dels bemærkes, at forsøgene er udført i 1:2 skala med et stenformat ret forskelligt fra dansk normalformat og dels, at der som mørtel er anvendt ren cementmørtel (1 del rapid cement, 2 dele sand). Disse materialer giver bøjningstrækstyrker, som er 3-4 gange større end dem man kan forvente af almindeligt dansk murværk. Selv om det kan konkluderes, at brudlinieteori for meget stærke mørtler giver bæreevner, som er

ca. 25 % for høje, kan antagelsen om brudlinieteorien anvendelighed i et styrkeområde, der er 3-4 gange lavere, godt opretholdes.

Til den sidste kategori af fejlkilder og usikkerhedsmomenter, hvor det ikke på forhånd kan siges, om forholdet medfører større eller mindre bæreevne, hører ortotropiantagelsen.

Betragter man en typisk brudfigur for en rektangulær halvstensmur, findes der 3 typer brudlinier svarende til vandrette, lodrette og skrå retninger som vist på figur 9.



Figur 9. Brudfigur med vandrette, lodrette og skrå brudlinier.

I følge ortotropiantagelsen er brudmomentet i den skrå brudlinie bestemt af vinklen α og brudmomenterne i de lodrette og vandrette brudlinier af formlen

$$m_{skrå} = m_l \sin^2 \alpha + m_v \cos^2 \alpha \quad (1)$$

hvor m_l og m_v er brudmomenterne om hovedakserne, som forudsættes af være parallel med lodret og vandret retning. Formel (1) er oprindeligt opstillet for armerede betonplader, hvor armeringsmængden er forskellig i de to hovedretninger. For homogent murværk, dvs. halvstensmure hvor revnedannelsen er uafhængig af forbandttypen, er (1) en nærliggende antagelse, men for murværk, hvor revnedannelsen er styret af forbandttypen, er (1) for enkel, da den ikke tager hensyn til forbandttypen.

4.3.1. Eksperimentel bestemmelse af brudmomentet om skrå akser

Af brudfiguren i figur 9 ses, at brudmomenterne om de lodrette og vandrette akser indgår, fordi disse retninger er parallelle med murens understøtninger, mens de skrå retninger er nødvendige for, at der kan dannes en kinematisk mulig mekanisme.

Som omtalt før findes brudmomenterne om vandrette og lodrette akser ved simple bøjningsforsøg med minivægge. Problemet er derfor, hvordan man bestemmer brudmomenterne om skrå akser.

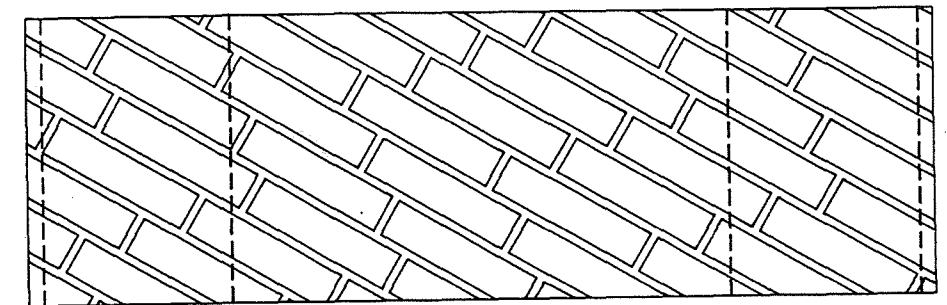
Inden det nærmere beskrives hvordan brudmomentet om skrå akser kan findes eksperimentelt, skal først omtales de antagelser, der implicit gøres, når der i brudlinieteorien anvendes brudmomenter fundet ved simple bøjningsforsøg med minivægge.

I forsøgene med minivægge udsættes forsøgsemnet for en-akset bøjning, samtidig med at forskydningskraften er nul. De brudmomenter der findes, gælder derfor principielt kun for denne form for påvirkning.

Når disse brudmomenter anvendes som brudmomenter for brudlinierne i brudlinieteorien, vil der normalt ikke være en-akset momenttilstand langs brudlinierne, og der vil normalt også være en forskydningskraft, der er forskellig fra nul. Denne anvendelse af brudmomenter, fundet ved en-aksede bøjningsforsøg på brudlinier hvor der er to-akset momenttilstand, svarer til at man har forudsat, at brudmomentet om en given akse er uafhængig af de forskydningskræfter og vridningsmomenter, der virker på tværsnittet.

Argumentet for, at en-akset bøjning uden forskydningskraft vælges til bestemmelse af brudmomenterne ved bøjning om liggefugerne og ved bøjning om studsfigurerne, er derfor ikke, at denne snitkraftfordeling er den "korrekte" men snarere, at dette er den enkleste at etablere.

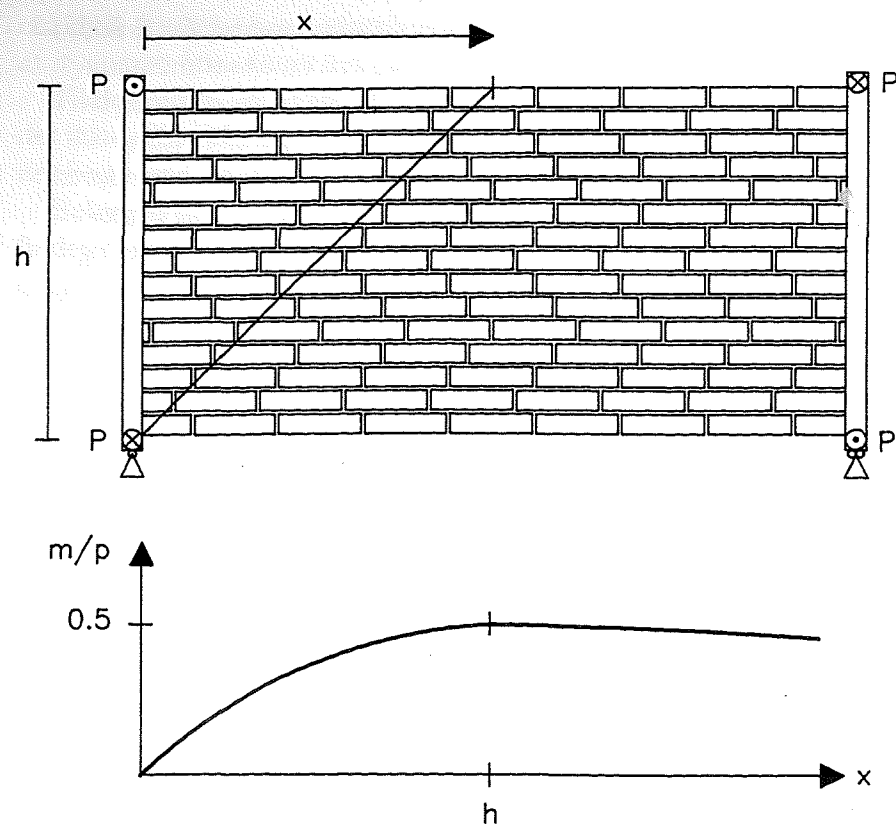
Ved bøjning om skrå akser er en skråt udskåret bjælke som vist på figur 10 ikke symmetrisk om bjælkeaksen, og det er derfor ikke relevant at belaste den i en simpel plan bjælkeopstilling, som indirekte forudsætter denne symmetri.



Figur 10. Skråt udskåret murbjælke.

Der er derfor udviklet en såkaldt 4-punkts pladeprøvning, hvor et rektangulært forsøgsemne understøttes vinkelret på sit plan i tre hjørner og belastes med en enkeltkraft i det fjerde hjørne, svarende til ren vridning. For at hindre en simpel hjørneafknækning forsynes to modstående sider i forsøgsemnet med en forstærkning således, at et brud i forsøgsemnet er tvunget til at forløbe fra en fri ikke-forstærket rand til en fri ikke-forstærket rand.

På figur 11 er vist en opstilling til 4-punkts pladeprøvning.



Figur 11. Forsøgsopstilling til 4-punkts pladeprovning af halvstensmur.

P er størrelsen af den påførte enkeltkraft og dermed også af reaktionerne og h er forsøgsejnets højde. I skrå snit som det på figuren viste, består snitkræfterne af et bøjende og et vridende moment, mens forskydningskraften er nul. Forudsættes det bøjende moment ensformigt fordelt på snittet fås et bøjende moment m pr. længdeenhed, som funktion af snittets hældning udtrykt ved afstanden x , som vist med kurven nederst på figur 11. Kurven, som findes ved momentligevægt om det skrå snit, er bestemt ved

$$m/P = \frac{x/h}{1 + (x/h)^2} \quad (2)$$

Det ses at det bøjende moment har sin maksimumsværdi for $x = h$ svarende til, at skråsnittet danner en vinkel på 45° med liggefugernes retning. Når x varierer mellem $h/2$ og $2h$, svarende til, at vinklen α varierer mellem 63° og 26° , varierer momentet kun mellem sin maksimumsværdi og 80 % af denne.

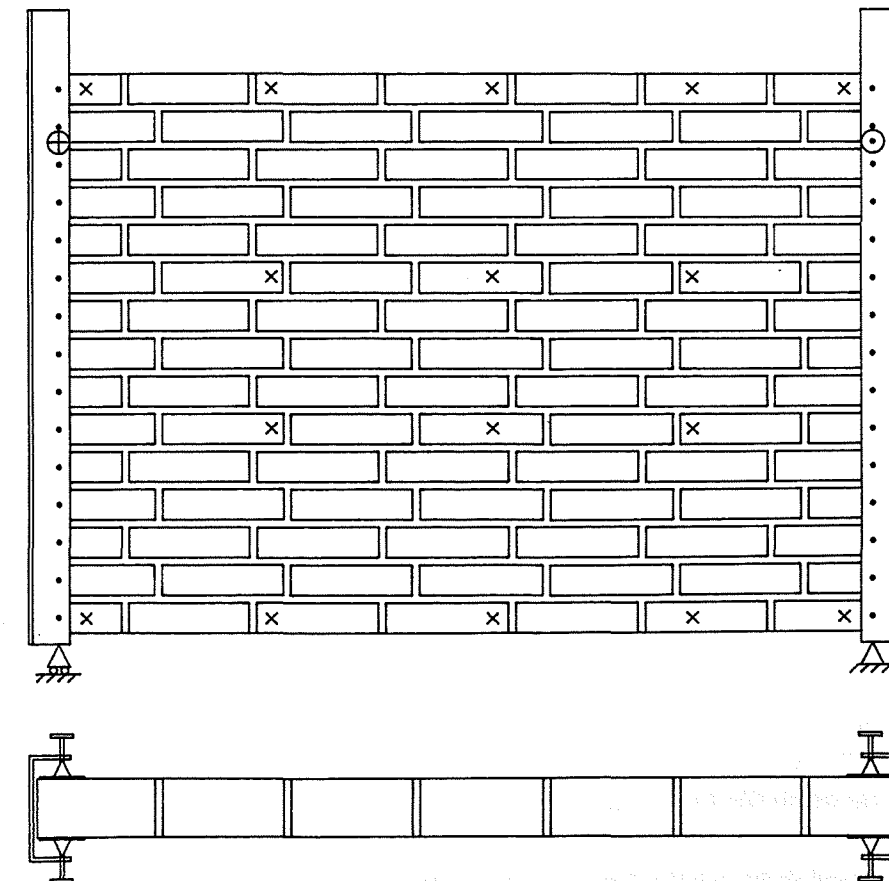
Fordelene ved denne opstilling er dels, at den er meget simpel med en statisk bestemt snitkraftfordeling og dels, at en enkelt prøvning vil give nedreværdier for momentkapaciteten i skråsnit med hældninger, der ligger i intervallet $26^\circ - 63^\circ$ indenfor en usikkerhed på 20 %.

5 4-punkts pladeforsøg

Som omtalt i indledningen er formålet med 4-punkts pladeforsøgene dels, at få afklaret om de antagelser der gøres i nugældende praksis, vedrørende bøjningsegenskaberne af murværk ved bøjning om skrå akser, er på den sikre eller usikre side, og dels om det er relevant at skelne mellem homogent og inhomogent murværk og i givet fald, hvor grænsen går udtrykt ved mørteltype og stentype.

5.1. Beskrivelse af forsøgsopstillinger

Princippet i 4-punkts pladeforsøgene er, at et rektangulært lodret forsøgsemne understøttes i tre hjørner og belastes i det fjerde. For at hindre en simpel hjørneknækning forsynes to modstående sider i forsøgsemnet med en forstærkning, således at brud i forsøgsemnet er tvunget til at forløbe fra en fri ikke-forstærket kant til en fri ikke-forstærket kant. Forstærkningerne påsættes forsøgsejnets lodrette sider i form af to U-profiler, som i hver flange er forsynet med en lodret række gevindhuller med en indbyrdes afstand svarende til et skifte. Se figur 12.



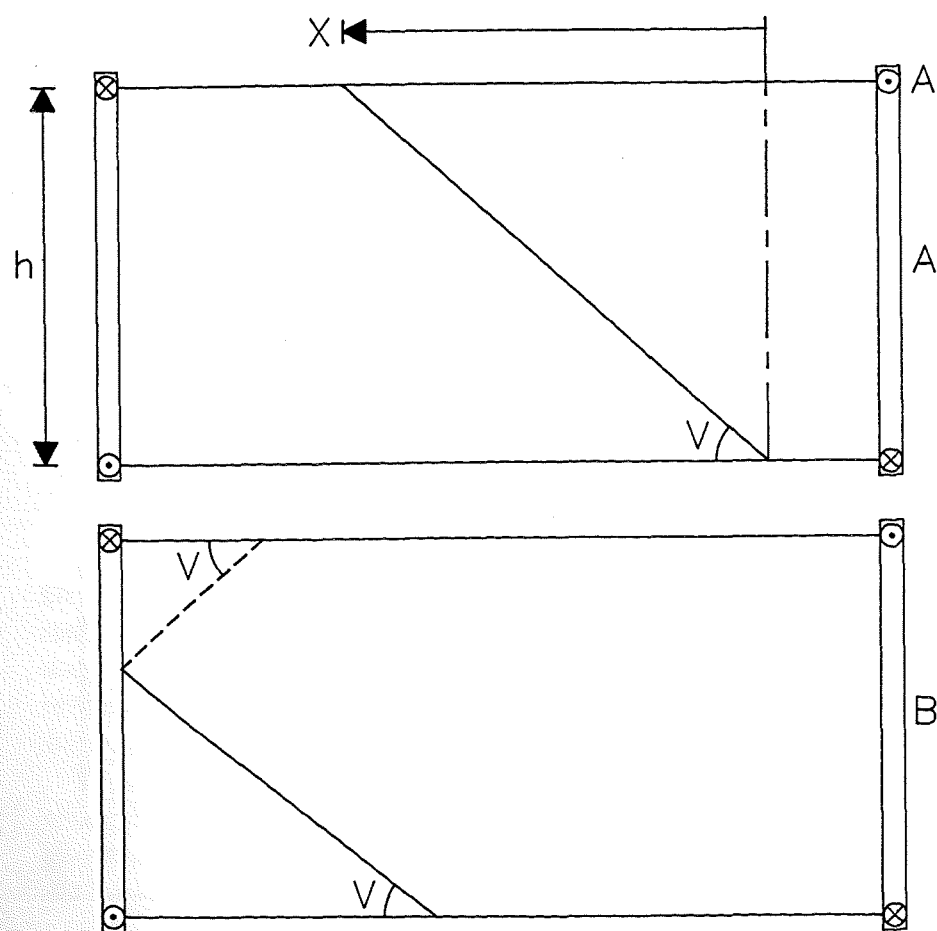
Figur 12. Opstalt og vandret snit i forsøgsopstilling. Krydserne angiver de punkter, hvor udbøjningen måles.

Fra hver side indskrues fastholdelsesbolte forsynet med vingehoved og plasttrædepuder, indtil kontakt med stenene opnås, således at hver sten langs kanten af forsøgsemnet er fastholdt i et U-profil. Anordningen med fastholdelsesbolte bevirker, at små vinkeldrejninger mellem mur og U-profil kan foregå uhindret. U-profilerne fungerer også som transportforstærkning, så forsøgsemnerne problemfrit kan flyttes fra opnu-ringsted til forsøgsstand.

Begge U-profiler understøttes foruden af et fast dreje-vippeleje; det ene leje er bevægeligt i vandret retning i forsøgsemnets plan. Foroven understøttes U-profilerne af to vandrette pendulsøjler vinkelret på forsøgsemnets plan. I den ene pendulsøjle er indbygget en hydraulisk presse og en kraftmåler. Den hydrauliske presse styres af en deformationsmåler som måler væggenes udbøjning i fastholdelsespunktet. Der er via målerammer monteret 16 elektriske deformationsmålere til registrering af hele væggenes udbøjningsform.

5.2. Forsøgsemnets mulige brudmåder

På figur 13 er vist 2 forskellige brudmåder.

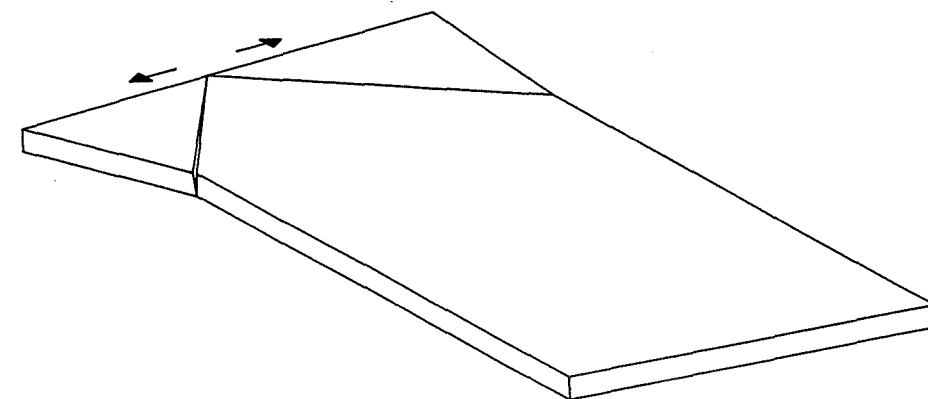


Figur 13. Brudmåder for forsøgsemne.

Efter brudlinieteorien giver de 2 brudmåder samme bæreevne. Udtrykkes denne ved bøjningsmomentet pr. længdeenhed i den skrå brudlinie fås

$$m_v = P \frac{x/h}{1 + (x/h)^2}$$

I brudmåde B indgår 2 brudlinier, hvor den nederste åbner sig på murens forside, mens den stiplede åbner sig på murens bagside. På figur 14 er vist et rumligt billede af brudmåden.



Figur 14. Brudfigur B.

I brudlinierne vil omdrejningsaksen ikke ligge midt i muren men i tryksiden tæt ved muroverfladen. Det bevirker at de to trekanten som brudlinierne afskærer, vil bevæge sig fra hinanden i den forstærkede kants retning, som de begge støder op til. Denne bevægelse er angivet med pile på figur 14.

En forudsætning for at de 2 brudmåder A og B giver samme bæreevne efter brudlinieteorien er at denne bevægelse kan foregå frit. Hindres denne bevægelse må man forvente, at et brud vil forløbe efter brudmåde A. Da brudmåde A må foretrækkes, fordi det så ikke er nødvendigt at tage stilling til, hvad der præcist sker, når revnen tilbagekastes fra randen, er der i begge ender og på hver side af forsøgsemnerne pålimet fladjern, der fungerer som trækstringere.

Pålimningen sker ved at benytte vingemøtrikkerne på U-profilerne til etablering af tryk i limfugen mellem fladjern og murværk under hærdningen. Som det vil fremgå af forsøgsresultaterne, er det imidlertid ikke lykkedes at hindre brudmåde B i også at forekomme.

5.3. Præsentation og tolkning af forsøgsresultater

Der er udført 40 4-punkts pladeforsøg med 15 skifter høje halvstensmure, opmuret af professionelle murere.

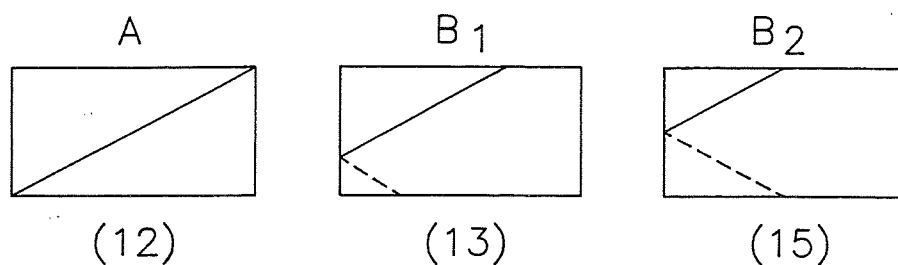
I forsøgene blev kraften P , se figur 12, øget fra nul og opefter hvert 30'te sekund ved at der blev påtvunget en deformation δ vinkelret på muren i spring på 0,2 mm. Hvert 5'te sekund blev kraften P og deformationen δ registreret sammen med udbøjningen vinkelret på væggenes plan i 16 punkter (markeret med x på figur 12).

Revnerne i forsøgsemnerne blev søgt optegnet efterhånden som de dannedes. Dette viste sig imidlertid at være meget vanskeligt, fordi det

er svært at få øje på små revner i murværk. I forsøgene blev det først muligt at optegne alle revner når forsøgsemnet var deformeret maksimalt.

Ud fra de 16 punkter, hvor væggenes udbøjning målt, blev væggenes udbøjningsflade modelleret ved "bivariate" interpolation i en triangulering af de 16 punkter, dvs. fladen blev repræsenteret ved en samling plane trekantfacetter [12]. Ved analyse af denne flades form som funktion af lasttrinnet, var det muligt at afgøre ved hvilket lasttrin de forskellige revner blev dannet.

Revnebillederne kan groft inddeles i 3 grupper svarende til en mekanisme bestående af en enkelt diagonalrevne, en bestående af to diagonalrevner med forskellig længde og en med 2 lige lange diagonalrevner, som vist på figur 15.



Figur 15. Revnebilledetyper. Tallene i parentes angiver antallet af forsøgsresultater.

I alle de tilfælde hvor bruddet skete ved mekanisme B (B_1 og B_2 i figur 15) dannedes de to diagonalrevner ved forskellige lasttrin, og i de tilfælde hvor deres længde var forskellige, blev den længste dannet først. Første registrerbare revne dannedes i alle tilfælde umiddelbart efter, at maksimallasten på væggen var opnået.

Disse observationer peger på, at der ved mekanisme B ikke er tilstrækkelig deformationskapacitet til, at de to diagonalrevner kan samvirke. Hvis der ikke var foretaget foranstaltninger, i form af pålmede randstringere, til at gøre det vanskeligere for mekanisme B at fremkomme, måtte man forvente en reduceret bæreevne ved mekanisme B i forhold til mekanisme A. I to af forsøgene var forsøgsemnet ikke forsynet med randstringere, og bæreevnen for disse målt til at være noget lavere end i de øvrige forsøgsemner.

Da alle tre mekanismer optræder i forsøgene, og da de målte bæreevner tilsyneladende er uafhængige af den observerede mekanisme, kan man konkludere, at i forsøgsemnerne med pålmede randstringere er bæreevnerne ved de tre mekanismer nogenlunde lige store.

Kun i de forsøg hvor mekanisme A optræder, kan forsøgsresultatet siges direkte at give bøjningsstyrken om den akse, som bruddet forløber efter.

I forsøgene hvor mekanisme B optræder, kan forsøgsresultaterne benyttes til at give nedreværdier for bøjningsstyrken om skrå akser med de hældninger, som tillader, at bruddet kan forløbe retlinet fra en ikke-forstærket rand til en ikke-forstærket rand.

Ved præsentationen af forsøgsresultaterne er der valgt at lade det størst målte bøjningsmoment pr. længdeenhed m_{45} , i et snit som danner 45° med liggefugernes retning, være repræsentant for forsøgsemnets

styrke. Momentet om akser med andre af de hældninger, hvorefter bruddet kan forløbe i forsøgsemner, kan findes af

$$m_x = 2 m_{45} \frac{x/h}{1+(x/h)^2}$$

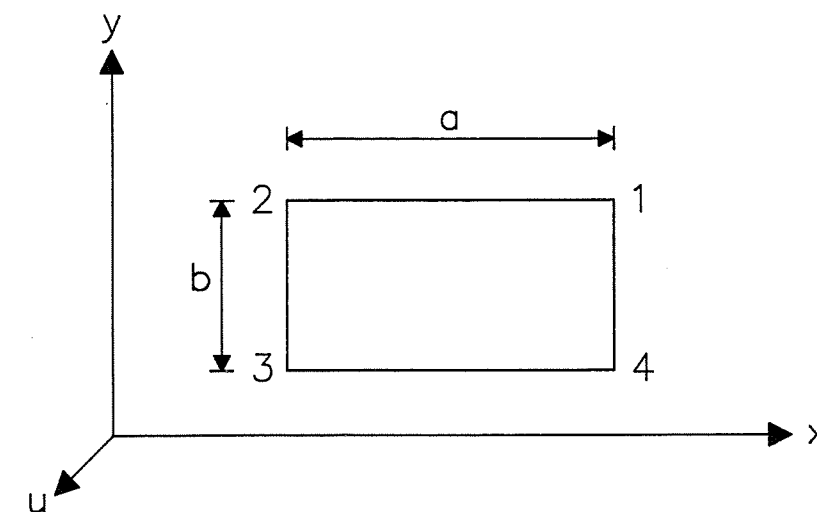
hvor m_x er momentet pr. længdeenhed om en akse, hvis hældning er bestemt af længden x som vist på figur 11 og h er forsøgsemnets højde.

Udbøjningsmålingerne blev sammen med kraftmålingen anvendt til at bestemme murværkets forskydningsmodel G på følgende måde.

Det forudsættes at murens udbøjningsflade kan bestemmes ud fra teorien for tynde elastiske plader som

$$u = \frac{3P}{G h^3} x y \quad (3)$$

hvor u er udbøjningen, P er enkeltkraften i hjørnerne, h er pladens tykkelse og (x,y) er koordinaterne til pladepunktet med udbøjningen u som vist på figur 16.



Figur 16. Koordinatsystem indlagt i plade.

Måles udbøjningerne i de 4 hjørner af et rektangel (u_1, u_2, u_3, u_4) hvis sider er parallelle med x og y -aksen danner disse 4 punkter en vindskæv firkant. Afstanden u_1^a fra den plan som indeholder punkterne 2, 3 og 4 til punkt 1 bliver

$$u_1^a = u_1 + u_3 - u_2 - u_4 \quad (4)$$

Er sidelængderne i rektanglerne a og b fås af (3)

$$u_1^a = \frac{3P}{G h^3} a b \quad (5)$$

der er uafhængig af rektanglerets placering på pladen, fordi krumningerne er konstante.

Af (4) og (5) kan G findes.

Forudsætter man, at murværk er et isotropt materiale, er E-modulet givet ved

$$E = 2G(1+\nu) \quad (6)$$

hvor ν er Poissons forhold. E kan betragtes som et stivhedsmål for muren.

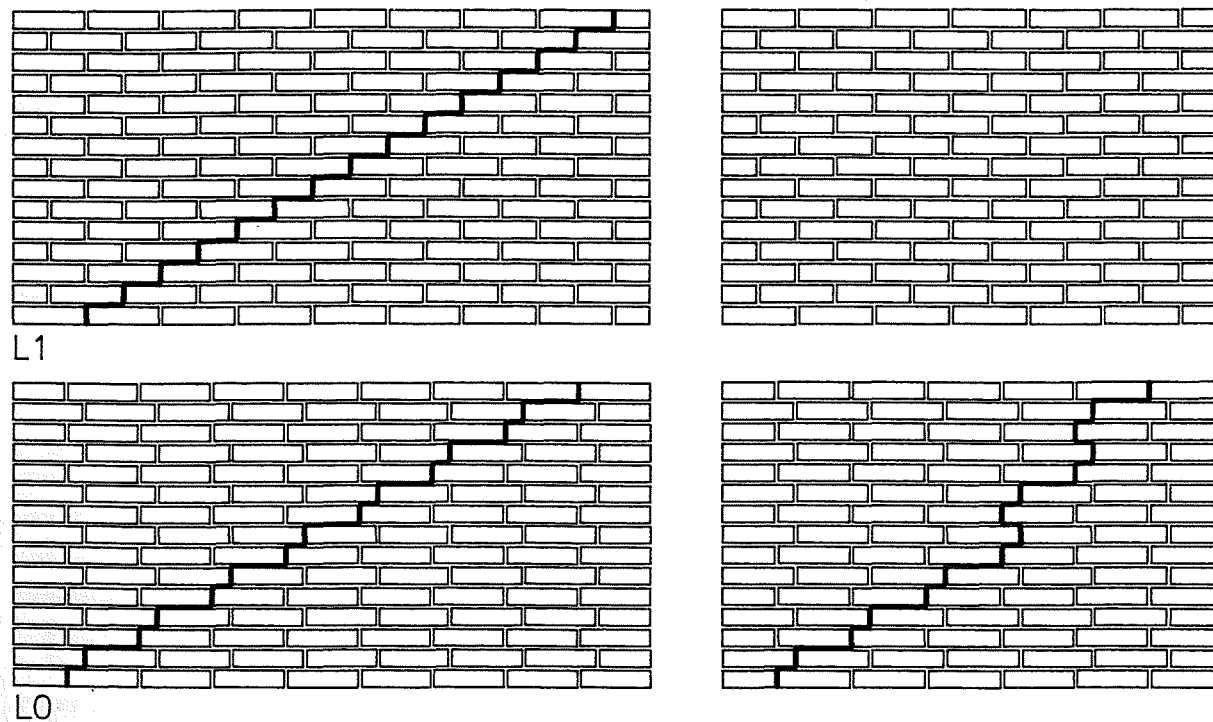
5.3.1. Første forsøgsserie

Forsøgene er inddelt i 2 forsøgsserier hver bestående af 16 forsøgsemner, hvor stentype, mørteltype, forbandttype og forsøgsemnets længde blev varieret systematisk samt 8 forsøg, hvor virkningen af andre parametre blev undersøgt.

I den første forsøgsserie på 16 forsøgsemner blev alle emner opmuret af samme stentype. I forsøgene blev der anvendt 2 forskellige mørteltyper, 2 forskellige forbandttyper og forsøgsemnerne havde 2 forskellige længder. Dette giver i alt $2 \times 2 \times 2 = 8$ forskellige kombinationer. Der blev lavet 2 forsøgsemner af hver kombination, således at det samlede antal forsøgsemner bliver 16.

Alle murene blev opmuret i en uopvarmet ladebygning og lagret der ved en temperatur på ca. 8°. Hærdetiden for væggene var 6-14 uger.

På figur 17 er vist de 4 forskellige udformninger af forsøgsemnerne. Halvstensforbandtet kaldes i det følgende L1, mens det anvendte 1/4 stens løberforbandt kaldes L0.



Figur 17. Forsøgsemnernes geometriske udformning i første forsøgsserie.

Stenen er en gul blødstrogen fra Prøvelyst-Wevers teglværk med en trykstyrke på 22-30 MPa og en minutsugning på 2,4 kg/m² (stentype D).

De to anvendte mørtler er tørmørtler, leveret af System Mørtel:

- KC 60/40/850 med en trykstyrke på 3,8 MPa og en bøjningstrækstyrke på 1,5 MPa
- KC 35/65/650 med en trykstyrke på 11,5 MPa og en bøjningstrækstyrke på 3,6 MPa.

I tabel 1 er givet en oversigt over forsøgresultaterne.

Tabel 1. Oversigt over første forsøgsserie.

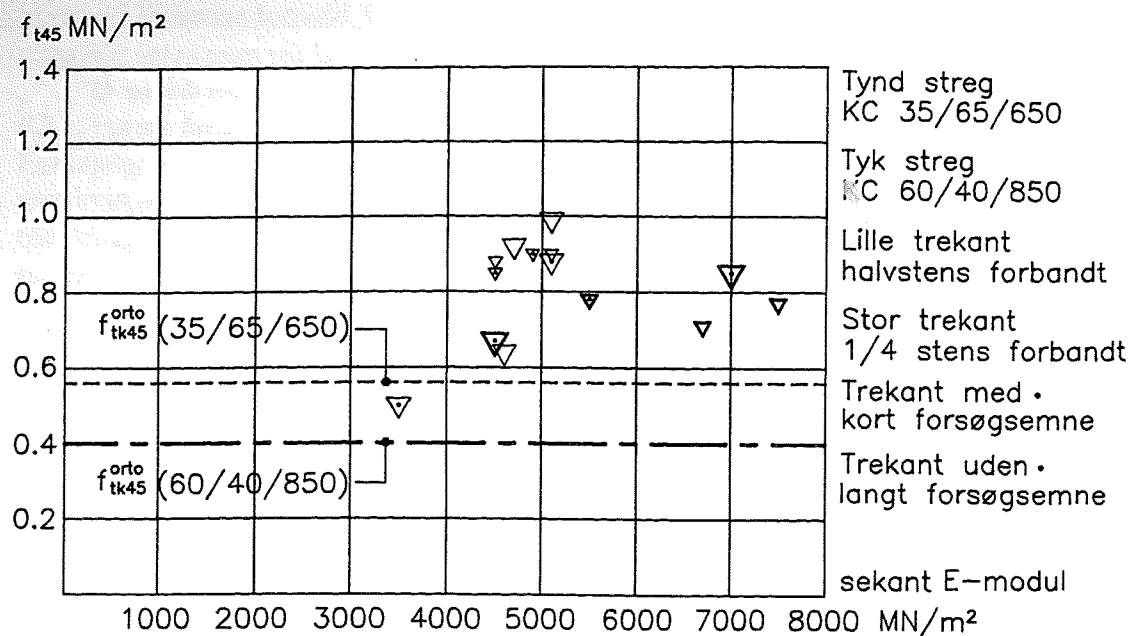
P_{max} er den største målte kraft, u_e er hjørneudbøjningen ved den største målte last og f_{45} er den maksimale bøjningstrækstyrke ved bøjning om akser, som danner 45° med vandret.

Mørtel	Længde m	Forbandt	Brudmåde (A,B1,B2)	P_{max} kN	u_e mm	f_{45} MPa
KC 60/40*	2,09	L 0	B1	1,7	11	0,40
KC 60/40	2,09	L 0	A	2,8	7	0,66
KC 60/40	2,03	L 1	B2	3,1	5	0,73
KC 60/40	2,03	L 1	A	3,3	5	0,77
KC 60/40	1,61	L 0	B2	2,8	8	0,66
KC 60/40	1,61	L 0	B2	3,6	7	0,84
KC 60/40*	1,55	L 1	B1	2,5	7	0,59
KC 60/40	1,55	L 1	B2	3,3	7	0,77
KC 35/65	2,09	L 0	B2	3,9	12	0,91
KC 35/65	2,09	L 0	B2	4,2	9	0,98
KC 35/65	2,03	L 1	A	3,7	11	0,87
KC 35/65	2,03	L 1	A	3,8	11	0,89
KC 35/65	1,64	L 0	B1	3,7	13	0,87
KC 35/65	1,64	L 0	B2	2,2	10	0,52
KC 35/65	1,55	L 1	A	3,6	9	0,84
KC 35/65	1,55	L 1	A	3,8	10	0,89

* Forsøg uden randstringer.

Bøjningstrækstyrken i et snit, som danner 45° med liggefugernes retning, er fundet ved at antage, at momentet/længdeenhed er det samme i hele snittet, og at spændingsfordelingen over væggenes tykkelse er retlinet.

På figur 18 er vist bøjningstrækstyrken i et snit der danner 45° med liggefugerne som funktion af sekant E-modulet bestemt ved (6) svarende til ca. 1/4 af maksimallasten.



Figur 18. Bøjningstrækstyrker i et 45° snit i forsøgsemnet som funktion af E-modulet.

På figuren er kun vist 14 forsøgsresultater, da 2 af forsøgene ikke blev udført med pålignede randstringere.

Først betragtes forsøgene med den stærke mørtel KC 35/65/650, svarende til de med tynd streg tegnede trekanter på figur 18.

Det ses at alle forsøgsemnerne har en bøjningstrækstyrke på ca. 0,9 MN/m² og et E-modul på ca. 5000 MN/m², bortset fra et enkelt som afviger markant med en bøjningstrækstyrke på 0,5 MN/m og et E-modul på 3500 MN/m². En forklaring på denne markante afvigelse er, at forsøgsemnet var dårligt opmuret med særlig mange kun delvis fyldte studsfiger. I det følgende ses der bort fra dette forsøg. Af de øvrige forsøg kan konkluderes, at hverken forbandtet eller forsøgsemnets længde ser ud til at betyde noget for styrken og stivheden.

Brudformen var karakteriseret ved, at der dannedes forholdsvis mange stenrevner. Murværk bestående af sten med stenklasse 30 og mørtel KC 35/65/650 kan derfor betragtes som et homogent materiale.

Betragtes forsøgene med den svage mørtel alene, ses det at de stivhedsmæssigt afviger en del fra hinanden, men at deres styrke ikke varierer markant mere end styrkerne for murene med den stærke mørtel.

Ud fra forsøgsresultaterne ser det ikke ud til, at de to forbandttypen som er anvendt i forsøgene, se figur 14, har nogen indflydelse på forsøgsresultaterne, selv om de kvalitative betragtninger i afsnit 4.2.2 peger på at der burde være en vis effekt.

Forsøgsemnets længde ser heller ikke ud til at have væsentlig indflydelse på bæreevnen, idet brudmåde A og brudmåde B giver nogenlunde samme bæreevne. Som følge heraf er alle de resterende forsøg udført med lange forsøgsemner.

På figur 18 er også indtegnet de karakteristiske bøjningstrækstyrker f_{t45k}^{orto} om akser som danner 45° med liggefugernes retning bestemt af formel (7).

$$f_{t45k}^{orto} = 0,5 f_{isk} + 0,5 f_{ilk} \quad (7)$$

hvor f_{ilk} og f_{isk} er de karakteristiske bøjningstrækstyrker ved bøjning om henholdsvis liggefugerne og studsfigerne, givet i tabel 2.

Tabel 2. Karakteristiske bøjningstrækstyrker for gul blødstrogen sten fra Prøvelyst-Wevers teglværk.

Mørtel	f_{ilk} (MPa)	f_{isk} (MPa)
KC 60/40	0,18	0,61
KC 35/65	0,28	0,83

f_{ilk} er bestemt ved forsøg udført på murcentret med minivægge [10] mens f_{isk} er bestemt ud fra en empirisk formel, som angiver sammenhængen mellem f_{isk} og f_{ilk} som funktion af stentype og mørteltype, der er angivet i [11].

5.3.2. Anden forsøgsserie

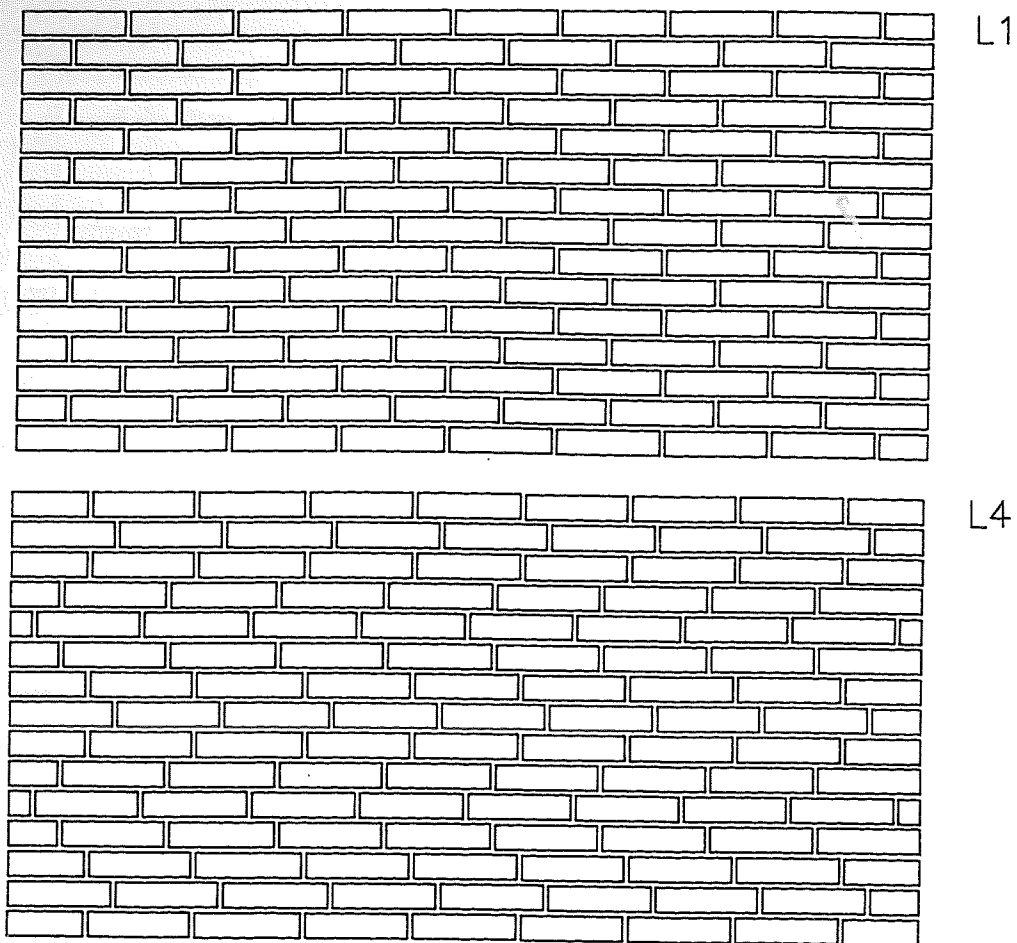
I den anden forsøgsserie på 16 forsøgsemner blev der anvendt 4 forskellige stentyper, kaldet A, B, C og D.

- Sten A er en gul maskinsten med huller fra Vedstrårup teglværk med en trykstyrke på 42-50 MPa og en minutsugning på 3,9 kg/m²
- Sten B er en gul maskinsten med huller fra Pedershvile teglværk med en trykstyrke på 30-45 MPa og en minutsugning på 3,6 kg/m²
- Sten C er en rød massiv blødstrogen sten fra Vesterled teglværk med en trykstyrke på 22-30 MPa og en minutsugning på 1,8 kg/m²
- Sten D er den samme sten som blev anvendt i første forsøgsserie. Dens trykstyrke er 22-30 MPa og dens minutsugning er 2,4 kg/m².

Der blev anvendt de samme to mørteltyper som i første forsøgsserie

- KC 35/65/850
- KC 60/40/650

og to forskellige forbandttypen som vist på figur 19.



Figur 19. Forsøgsemnernes udformning. Anden forsøgsserie.

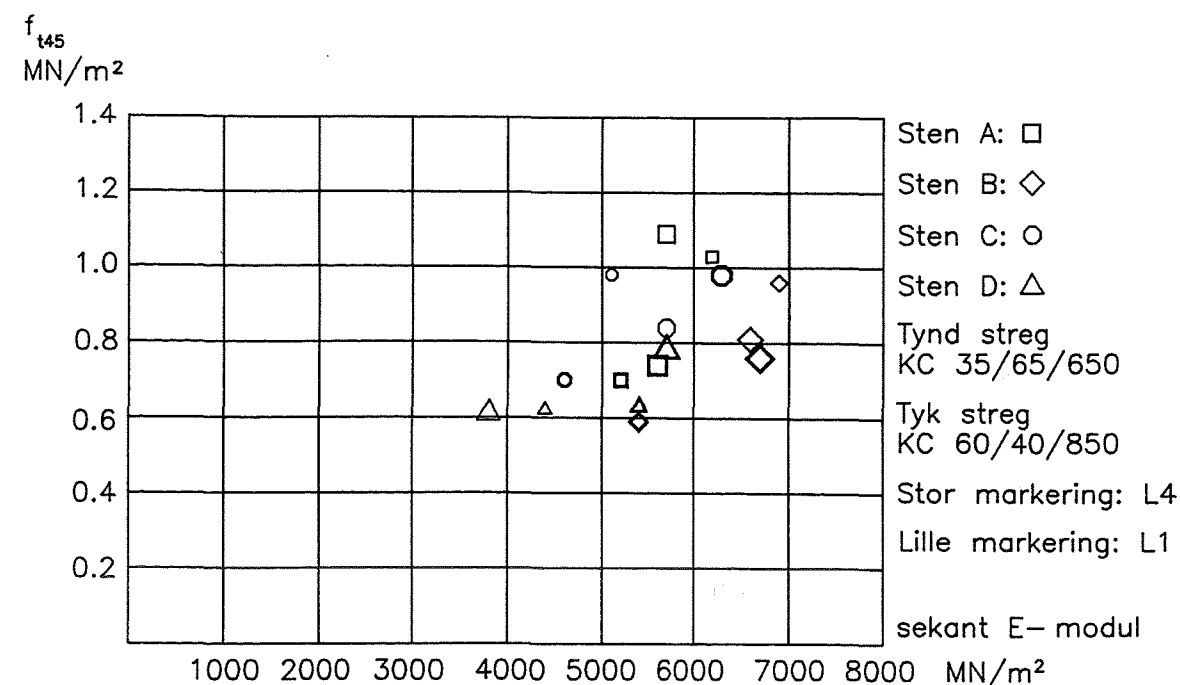
De 4 stentyper, 2 mørteltyper og 2 forbandttyper giver i alt $4 \times 2 \times 2 = 16$ kombinationer. Alle murene blev opmuret under samme forhold som murene i første forsøgsserie, bortset fra at lagringstemperaturen kun var ca. 5 °C. Hærdetiden var 6-14 uger.

I tabel 3 er givet en oversigt over forsøgsresultaterne.

Tabel 3. Oversigt over anden forsøgsserie.

Mørtel	Stentype	Forbandt	Brudmåde (A,B1,B2)	P_{max} kN	u_e mm	f_{t45} MPa
KC 60/40	A	L1	A	3,0	9	0,70
KC 60/40	B	L1	B2	2,5	6	0,60
KC 60/40	C	L1	B1	3,0	9	0,70
KC 60/40	D	L1	B1	2,7	6	0,63
KC 60/40	A	L4	B2	3,2	11	0,75
KC 60/40	B	L4	B1	3,3	7	0,77
KC 60/40	C	L4	B2	4,2	9	0,98
KC 60/40	D	L4	B2	3,4	8	0,80
KC 35/65	A	L1	B1	4,4	9	1,03
KC 35/65	B	L1	B1	4,1	8	0,96
KC 35/65	C	L1	A	4,2	11	0,98
KC 35/65	D	L1	A	2,7	9	0,63
KC 35/65	A	L4	B1	4,6	12	1,08
KC 35/65	B	L4	B1	3,5	6	0,82
KC 35/65	C	L4	A	3,6	8	0,84
KC 35/65	D	L4	B1	2,6	9	0,61

På figur 20 er forsøgsresultaterne som før, repræsenteret ved bøjningstrækstyrken i et 45° skråsnit som funktion af sekant E-modulet, svarende til ca. 1/4 af maksimallasten.



Figur 20. Bøjningstrækstyrken i et 45° snit i forsøgsemne som funktion af sekant E-modulet.

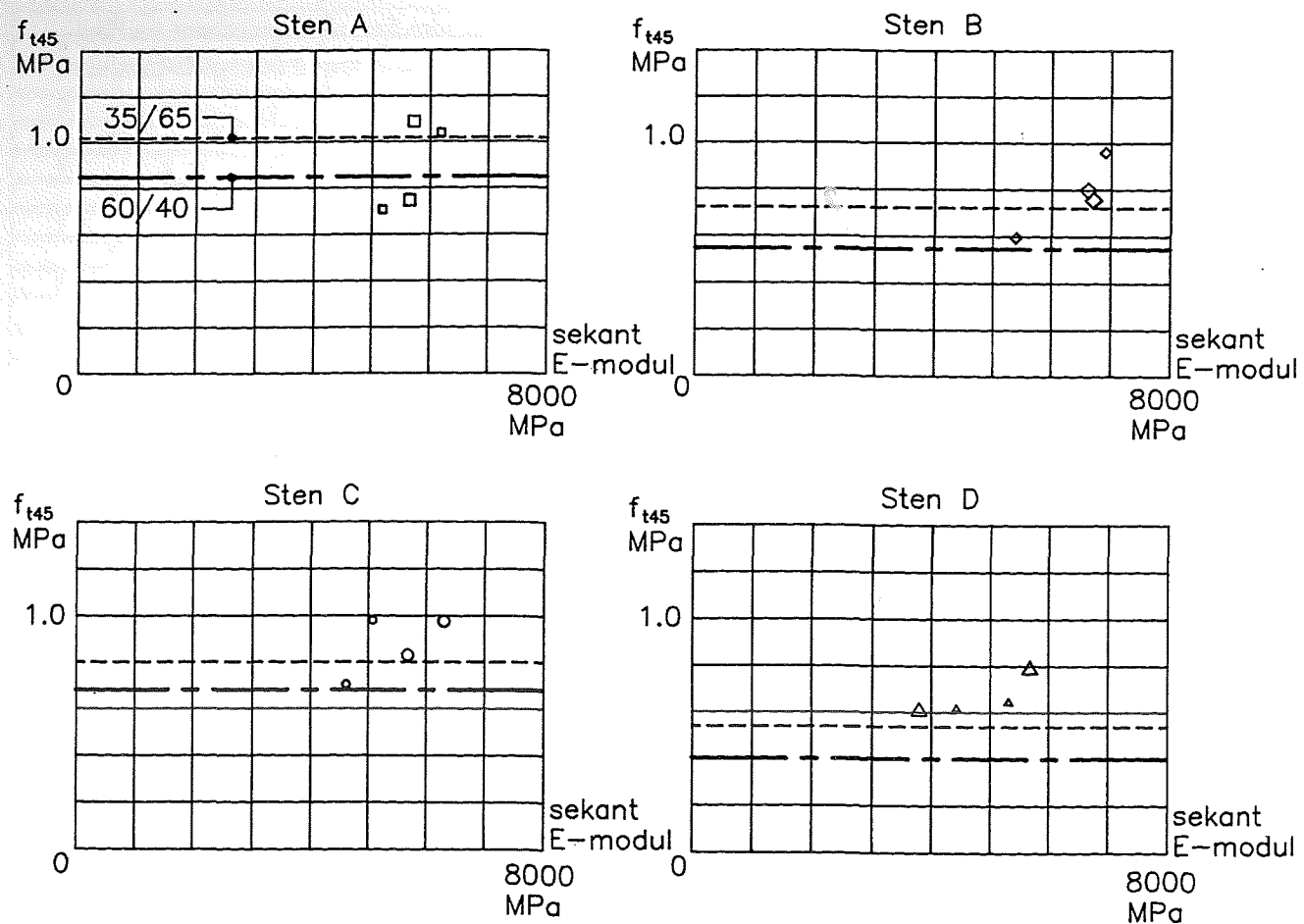
På figur 21 er resultaterne afbilledet for hver af de 4 stentyper. På figuren er også indtegnet de bøjningstrækstyrker $f_{t45k}^{prø}$, som kan bestemmes af formel (7) med indsættelse af værdierne fra tabel 4.

De karakteristiske bøjningstrækstyrker i tabel 4 er taget fra [10] og [11].

Tabel 4. Karakteristiske bøjningstrækstyrker.

Mørtel	Sten	f_{tk} (MPa)	f_{sk} (MPa)
KC 60/40	A	0,55	1,14
KC 60/40	B	0,26	0,81
KC 60/40	C	0,45	0,89
KC 60/40	D	0,18	0,61
KC 35/65	A	0,89	1,15
KC 35/65	B	0,43	1,02
KC 35/65	C	0,73	0,93
KC 35/65	D	0,28	0,83

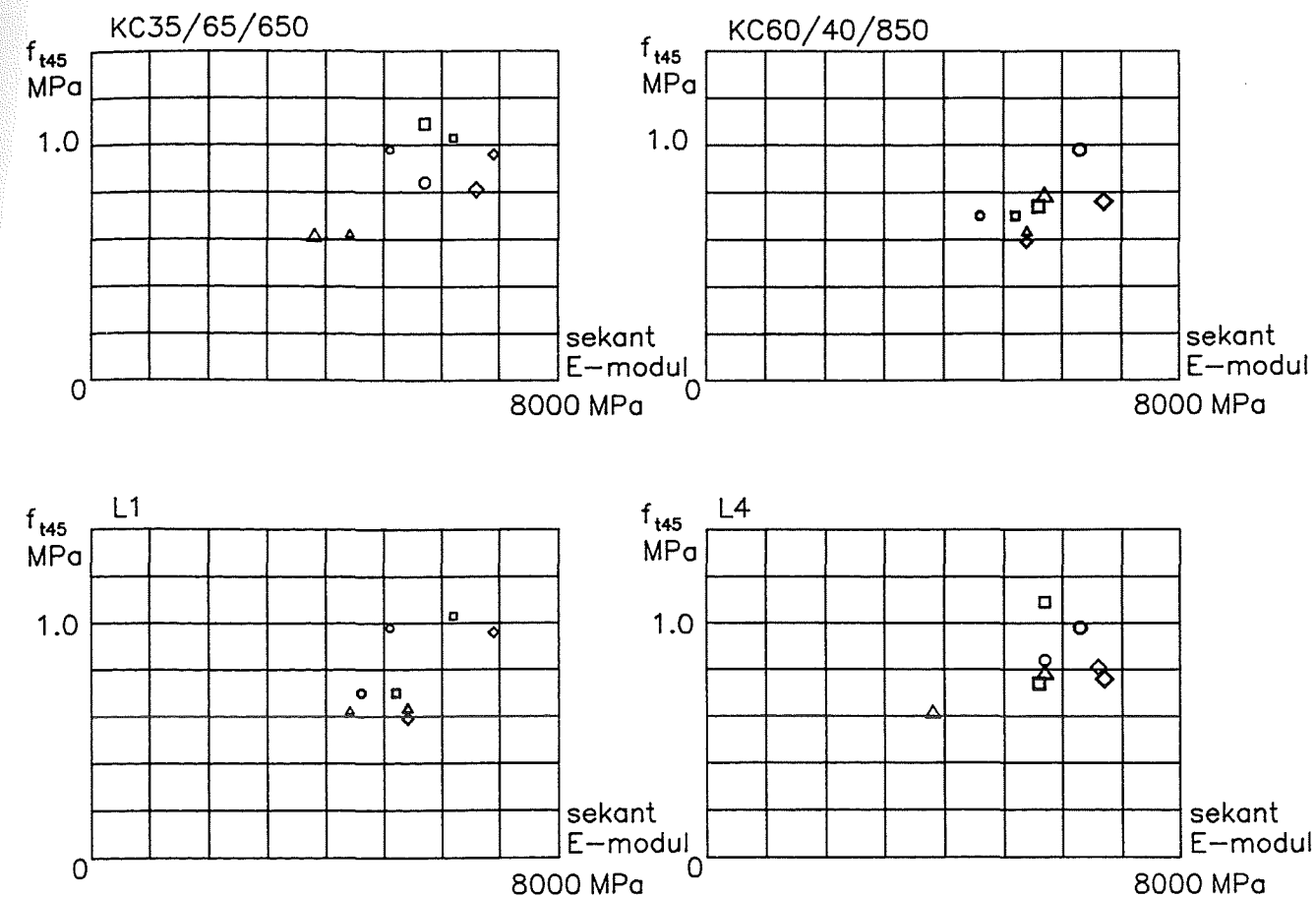
Det ses af figur 21, at for stentype A og mørteltype 60/40/850 giver formel (7) værdier på den usikre side. For de øvrige ser formel (7) ud til at give værdier nogenlunde på den sikre side.



Figur 21. Bøjningstrækstyrker for de enkelte stentyper.

På figur 22 er forsøgene samlet dels efter mørteltype og dels efter forbandttype. Først betragtes de 4 tilfælde hver for sig

- *Forsøg med KC 35/65/850.*
Der kan ikke generelt siges noget om at forbandttype L4 (store markeringer) er bedre eller dårligere end forbandttype L1 (små markeringer).
- *Forsøg med KC 60/40/650.*
Forbandttype L4 giver altid større bæreevne og E-modul end forbandttype L1. I gennemsnit fås 0,2 MPa større bøjningstrækstyrker for L4 end for L1.
- *Forsøg med forbandttype L1.*
Bortset fra et enkelt forsøgsresultat giver mørtel KC 35/65/850 i gennemsnit 0,2 MPa større bøjningstrækstyrker end mørtel KC 60/40/650.
- *Forsøg med forbandttype L4.*
Mørteltype KC 35/65/850 giver generelt ikke større bøjningstrækstyrker end KC 60/40/650.



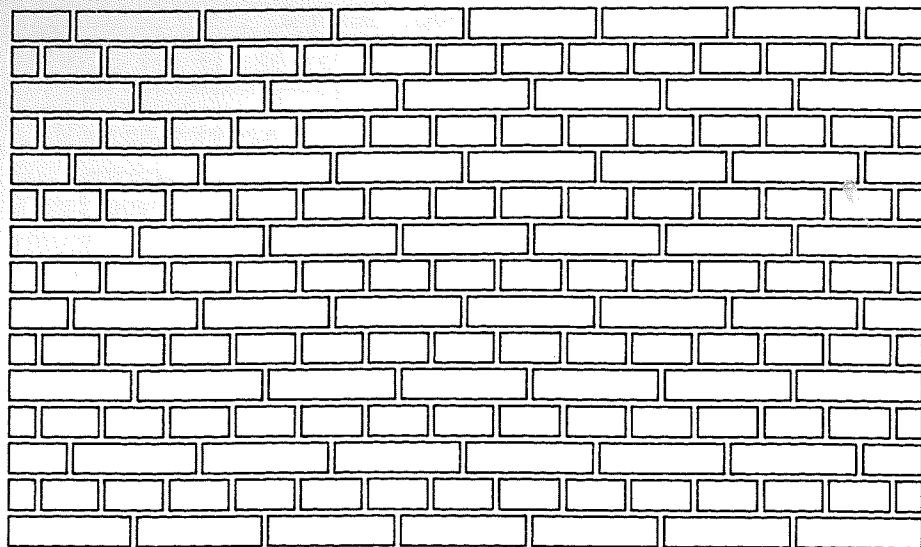
Figur 22. Forsøgsresultater fordelt efter mørteltype og efter forbandttype.

Sammenlignes alle forsøgene med mørteltype KC 35/65/850 med alle med KC 60/40/650, fås at KC 35/65/850 i gennemsnit giver 0,1 MPa større bøjningstrækstyrke end KC 60/40/850.

Sammenlignes alle forsøgene med forbandttype L1 med L4 fås at forbandttype L4, i gennemsnit giver 0,1 MPa større bøjningstrækstyrke end forbandttype L1.

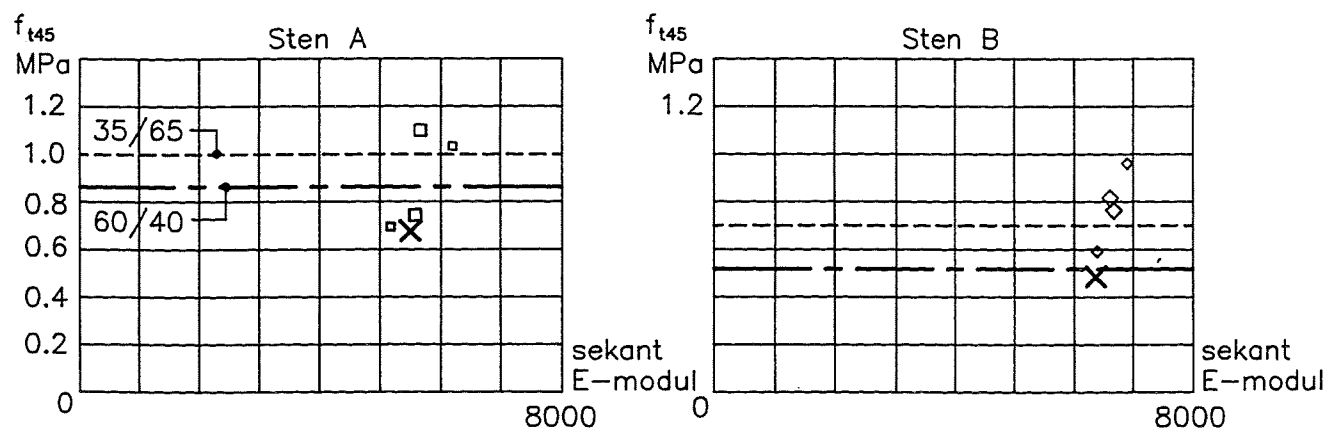
5.3.3. Forsøg med krydsforbandt

Der er udført 2 forsøg med krydsforbandt som vist på figur 23.



Figur 23. Forsøgsemne med krydsforbandt.

I det ene forsøgsemne blev anvendt stentype A og i det andet stentype B. Begge emner blev opmuret i KC 60/40/650. På figur 24 er resultaterne angivet sammen med de øvrige forsøg, der er udført med stentype A og stentype B.

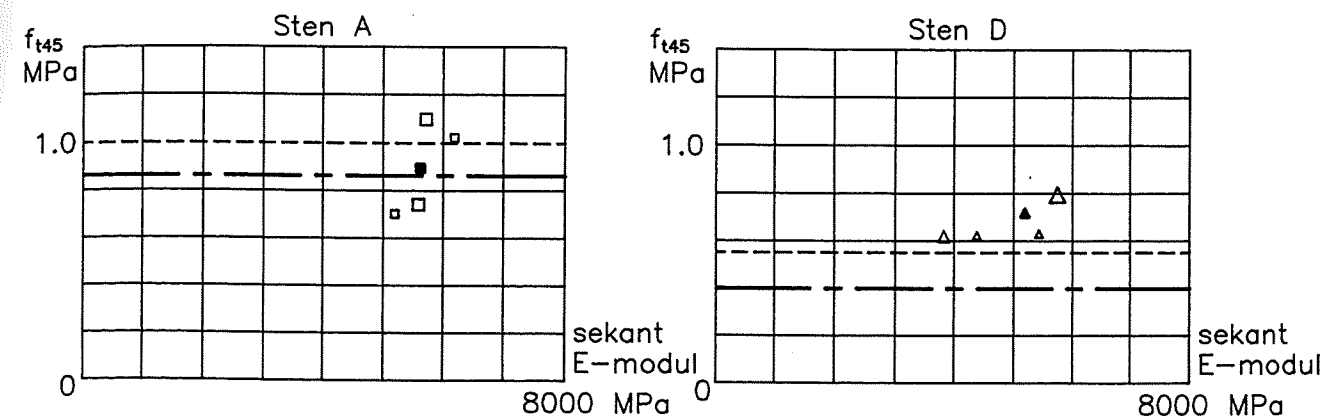


Figur 24. Resultater fra forsøg med krydsforbandt (markeret med x).

Det ses at krydsforbandt giver lidt lavere bæreevne end forbandterne L1 og L4, hvilket passer fint med de kvalitative modeller beskrevet i afsnit 4.2.2.2.

5.3.4. Forsøg med liggefugearmering

Der er udført 2 forsøg med indlagt armering i hver anden liggefuge. Armeringen bestod af 2 rustfri $\varnothing 6$ jern med en indbyrdes afstand på 50 mm svejst sammen til et gitter med et zig-zag bøjet $\varnothing 4$ jern. Der blev anvendt forbandt L1 og mørtel KC 35/65/650. I det ene emne var anvendt stentype A og i det andet stentype D. På figur 25 er resultaterne angivet sammen med de øvrige forsøg der er udført med stentype A og D.



Figur 25. Resultater fra forsøg med armerede liggefuger (vist med udfyldt signatur).

Det ses at armeringen ikke har indflydelse på bæreevnen. Af arbejdslinierne for de to forsøgsemner i appendix ses, at armeringen imidlertid bevirker en betydelig forøgelse af væggens sejhed.

5.3.5. Forsøg med ren kalkmørtel

Der er udført 4 forsøg med anvendelse af rent kalkmørtel. To af emnerne var opmuret med L1-forbandt med anvendelse af stentype D og de 2 andre emner var opmuret med L4-forbandt også med anvendelse af stentype D.

Der fandtes bæreevner der var ca. en fjerdedel af værdierne for de tilsvarende emner med en KC-mørtel. Alle bruddene var delvis skøre, som det fremgår af figurerne i appendix.

Den lave styrke skyldes især, at kalkmørtel hærder meget langsomt, idet det blev konstateret, at mørtlen kun var hærdet i de yderste 1-2 cm. af fugen.

5.4. Konklusion

Forsøgene er udført med henblik på, at søge svar på følgende spørgsmål.

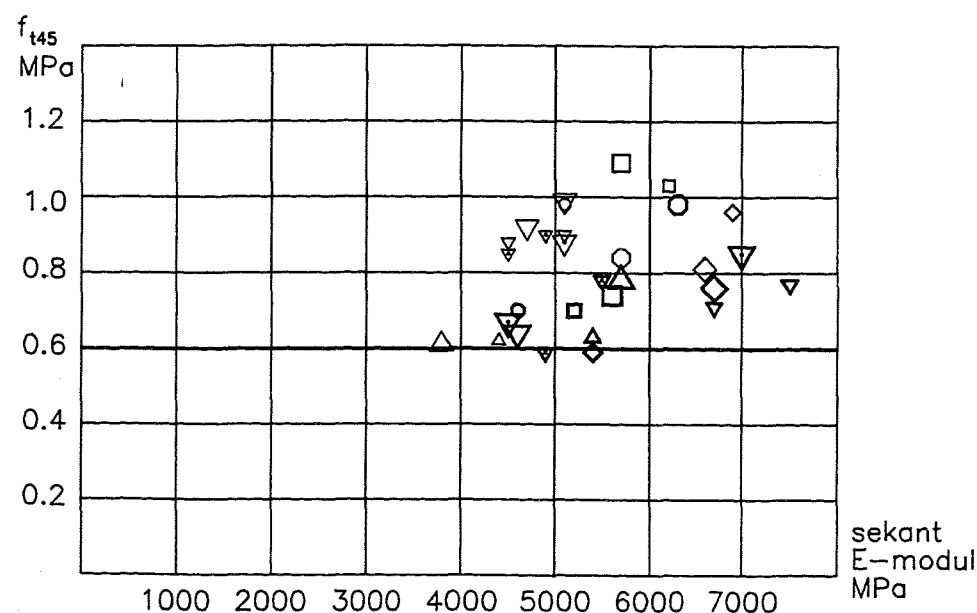
- Under hvilke omstændigheder kan murværk betragtes som et homogent materiale, og hvornår bør det betragtes som et inhomogent materiale.
- Kan ortotropiantagelsen anvendes til bestemmelse af murværks bøjningsbæreevne ved bøjning om skrå akser.
- Kan brudlinieteorien benyttes til bestemmelse af tværbelastet murværks bæreevne.

Kriteriet for om murværk kan betragtes som et homogent eller et inhomogent materiale er, om revner dannes i både sten og mørtel eller primært kun i mørtlen. Tæller man antallet af revnede sten i samtlige forsøgsemner, er der ca. 45 revnede sten i de mure, hvor der er anvendt KC 35/65/650 og 16 revnede sten i de mure, hvor der er anvendt KC

60/40/850 mørtel, mens der ikke er fundet revner i stenene i forsøgsemnerne, hvor der er anvendt ren kalkmørtel.

Da antallet af forsøgsemner med KC 35/65/650 og KC 60/40/850 mørtel begge er 18, er hyppigheden af revnede sten ca. 3 gange så stor for mure med KC 35/65/850 som i mure med KC 60/40/650 mørtel. Sammenholdes dette med figur 18 som viser, at for mure med KC 60/40/850 mørtel giver forbandttype L4 ca. 0,2 MPa større bøjnings-trækstyrke end forbandttype L1, kan man konkludere, at for de i denne undersøgelse anvendte sten må mure med KC 60/40/850 mørtel betragtes som inhomogent murværk, mens mure med KC 35/65/650 mørtel kan betragtes som homogent murværk.

Betragter man samtlige forsøgsresultater fra forsøgsemner opmuret med KC 60/40/850 og KC 35/65/650 mørtel fra 1. og 2. forsøgsserie, hvor der var pålimet kantstringere, som vist på figur 26, ses det, at de 2 mørteltyper groft taget giver samme bøjningstrækstyrke. Dette er bemærkelsesværdigt, da den rene mørtelstyrke for KC 35/65/650 er 2-3 gange højere end for KC 60/40/850. Forsøgsemner opmuret med kalkmørtel gav derimod væsentligt lavere bøjningsstyrke, hvilket må skyldes den væsentligt lavere rene mørtelstyrke.



Figur 26. Forsøgsresultater for mure med KC 35/65/650 og KC 60/40/850 mørtel.

I de forsøgsemner, som var opmuret med KC 60/40/850, skete bruddet som omtalt fortrinsvis i mørtlen eller i skillefladen mellem sten og mørtel, mens bruddet i forsøgsemnerne opmuret med KC 35/65/650 i langt højere grad medførte revner i stenene.

Disse forhold lægger op til, at man for mure opmuret af gængse danske mursten kan konkludere, at den optimale (balancerede) mørtelstyrke, med hensyn til bøjningsstyrken om skrå akser, er den som svarer til KC 60/40/850, som medfører at et brud primært sker ved revnedannelse i mørtlen. Stærkere mørtler fører ikke til væsentligt større bøjningsstyrker, men bevirker at det dannes flere stenrevner i brudtilstanden.

Forsøgene er udført med fire forskellige stentyper, hvor den stærkeste har en trykstyrke på 46 MPa og den svageste en trykstyrke på 26 MPa. Man kunne derfor forvente, at den ovenfor givne konklusion kunne nuanceres til at afhænge af stentypen. På det foreliggende grundlag er dette imidlertid ikke muligt. Det skyldes at antallet af forsøg ikke er stort nok, men måske også at stentrykstyrken ikke er nogen god vikarierende parameter for stentrekstyrken, som er den relevante parameter i denne sammenhæng.

Sammenhængen mellem trykstyrke og trækstyrke for gængse danske mursten er undersøgt af Murcentret. Denne undersøgelse viser, at spredningen på trækstyrken er meget stor, og at trækstyrken ikke kan afledes af trykstyrken. [13].

For forsøgsemnerne opmuret med KC 35/65/650 gav de to forbandt-typer L1 og L4 samme bøjningsstyrke. Med den svage kalkcementmørtel KC 60/40/850 lå alle bøjningsstyrkerne for forsøgsemner opmuret efter L4 forbandtet over alle bøjningsstyrkerne for forsøgsemner opmuret efter L1 forbandtet.

Den før formulerede konklusion kan derfor nuanceres på følgende måde.

For mure opmuret af gængse danske mursten er den optimale mørtelstyrke med hensyn til bøjningsstyrken om skrå akser den som svarer til KC 60/40/850. Anvendelsen af KC 60/40/850 medfører, at revnerne i brudtilstanden primært sker ved revnedannelse i mørtlen, og anvendelse af stærkere mørtler fører ikke til større bøjningsstyrker, hvis der er valgt et gunstigt forbandt. Anvendelsen af den stærke mørtel medfører kun, at der dannes flere stenrevner. For ugunstige forbandt-typer giver den stærke mørtel 0-20 % større bøjningsstyrke end den svagere.

Af figurerne 18 og 21 fremgår det, at anvendelsen af formel (7) bortset fra 2 tilfælde ser ud til at være på den sikre side. Det skal imidlertid bemærkes, at de bøjningstrækstyrker som forsøgsresultaterne sammenlignes med er karakteristiske værdier, hvor hver værdi er fundet som en sum af en eksperimentel bestemt værdi og en værdi ekstrapoleret ud fra forsøgsresultater med andre materialesammensætninger, end de her benyttede. I denne extrapolation, se [11], er der indbygget en ukendt sikkerhed, hvilket medfører, at konklusionen om at "ortotropiantagelsen ser ud til at være på den sikre side", skal tages med et vist forbehold.

Betragtes igen figur 26 haves som karakteristisk værdi for bøjningstrækstyrken ved bøjning om en akse, som danner en vinkel på 45° mod liggefugerne.

$$f_{t45k} = 0,6 \text{ MPa}$$

Den tilsvarende værdi i vejledningen til murværksnormen er

$$f_{t45k} = \frac{1}{2} (0,25 + 0,5) = 0,375 \text{ MPa}$$

Forsøgene giver ikke direkte svar på, om brudlinieteorien kan anvendes på tværbelastet murværk, men bekræfter at de brudmomenter om skrå akser, som en anvendelse af brudlinieteorien indirekte forudsætter, kan forekomme.

Da forsøgene er udført deformationsstyret, er der fundet arbejds-linier, som også dækker området, efter at maksimallasten er opnået. Arbejds-linierne er vist i appendix 1. Formen af disse arbejds-linier kan

tolkes som, at bruddet ved bøjning om skrå akser besidder en begrænset plasticitet. Det er i sagens natur ikke muligt på grundlag af de udførte forsøg, at afgøre om dette er tilstrækkeligt til, at de skrå brudlinier kan samvirke fuldt med vandrette og lodrette brudlinier, selvom man forudsætter at disse besidder en lignende begrænset plasticitet.

Arbejdslinierne for de to forsøgsemner hvor der er indlagt armering i liggefugerne, tyder derimod på så gode plastiske egenskaber at man sikkert kan regne med fuld samvirken mellem skrå og lodrette brudlinier i vægge med liggefugearmering, mens det er usikkert om de vandrette brudlinier også kan samvirke, da deres plasticitet ikke vil forøges ved indlæggelse af liggefugearmering.

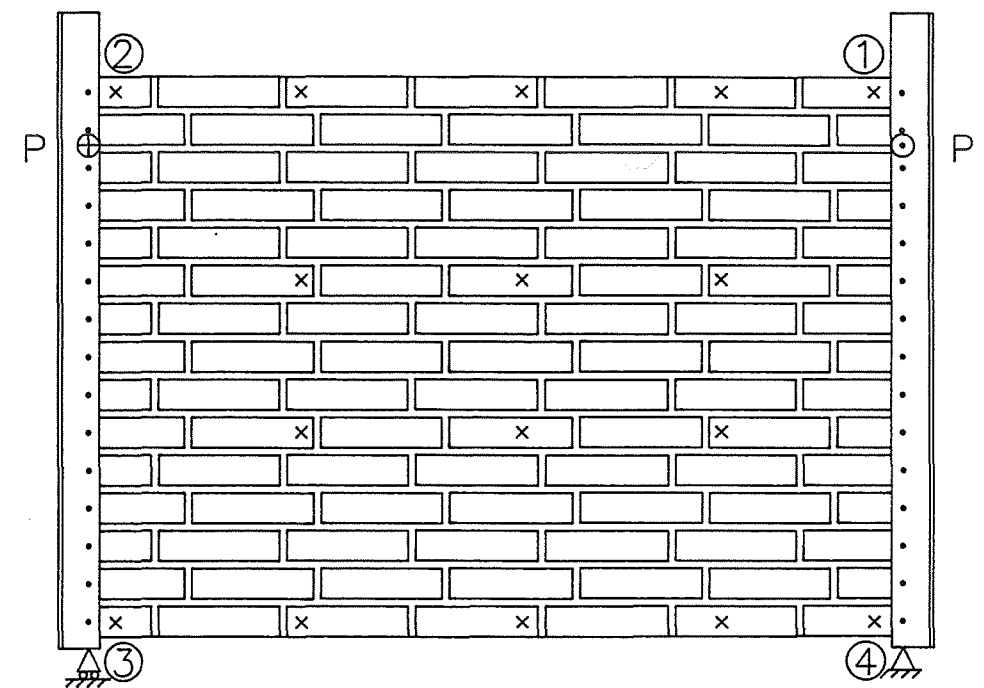
Det kan derfor konstateres, at hvis der skal opnås større sikkerhed for, at brudlinieteorien kan anvendes på dansk murværk, er det nødvendigt med forsøg med hele vægfeltet med realistiske understøtningsbetingelser hvor alle 3 typer af brudlinier har mulighed for at samvirke. Sådanne forsøg skal være deformationsstyrede og så godt instrumenterede, at revneudviklingen kan følges, og de bør være ledsaget af en videreudvikling af den teoretiske modellering af murværk, som er omtalt i afsnit 4.2.2.1.

Appendiks

Dette appendiks indeholder arbejdslinie og brudbillede for samtlige 40 forsøgsemner. Som arbejdslinie for forsøgsemnerne er valgt at afbilde den ydre hjørnekraft P , som funktion af den korrigerede hjørneudbøjning bestemt af formlen

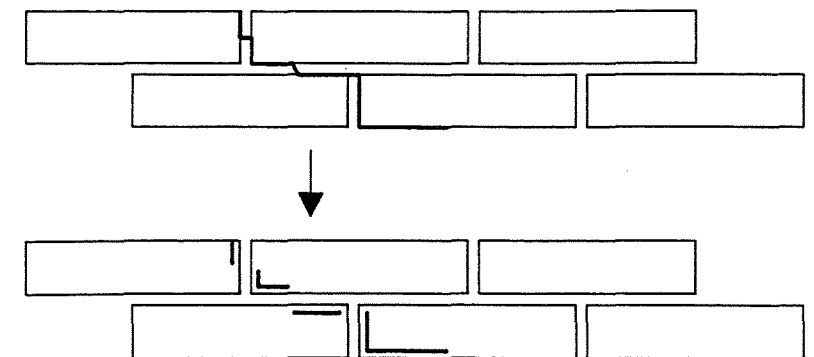
$$u_1^k = u_1 + u_3 - u_2 - u_4$$

Hvor u_1, u_2, u_3, u_4 er de målte udbøjninger i de 4 hjørnepunkter som vist på figur A1.



Figur A1. Markering af de 4 punkter som benyttes til bestemmelse af den korrigerede hjørneudbøjning.

Revnerne i forsøgsemnerne, som primært fremkom i skillefladerne mellem sten og mørtel er optegnet på stenene som vist på figur A2.



Figur A2. Princip for optegning af revner.

Revner på murens forside er optegnet med fuld streg, mens revner på murens bagside er optegnet med stiptet streg.

De følgende sider indeholder hver resultater fra ét forsøg. Der er dels givet materialesammensætningen for hvert forsøgsemne, idet de anvendte sten er angivet ved et af bogstaverne (A, B, C, D) hvor

- Sten A er en gul maskinsten med huller fra Vedstrårup teglværk med en trykstyrke på 42-50 MPa
- Sten B er en gul maskinsten med huller fra Pedershvile teglværk med en trykstyrke på 30-45 MPa
- Sten C er en rød massiv blødstrøgen sten fra Vesterled teglværk med en trykstyrke på 22-30 MPa
- Sten D er en gul massiv blødstrøgen sten fra Prøvelyst-Wevers teglværk med en trykstyrke på 22-30 MPa.

Selve forsøgsresultaterne er givet i form af en arbejdslinie og et brudbillede.

Endvidere er der for hvert forsøgsemne angivet den signatur, hvormed forsøgsemnet er repræsenteret i de figurer i rapporten, som indeholder kurver over forsøgsresultaterne.

Første forsøgsserie udgøres af forsøgene 1-16.

Anden forsøgsserie udgøres af forsøgene (17-20), 22, (25-27), (30-37).

Forsøgene med kalkmørtel er 21 og 38-40.

Forsøgene med armering er 23 og 24.

Forsøgene med krydsforbandt er 28 og 29.

Mur 01

Stentype

D

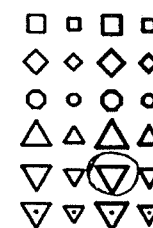
Mørteltype

KC 60/40/850

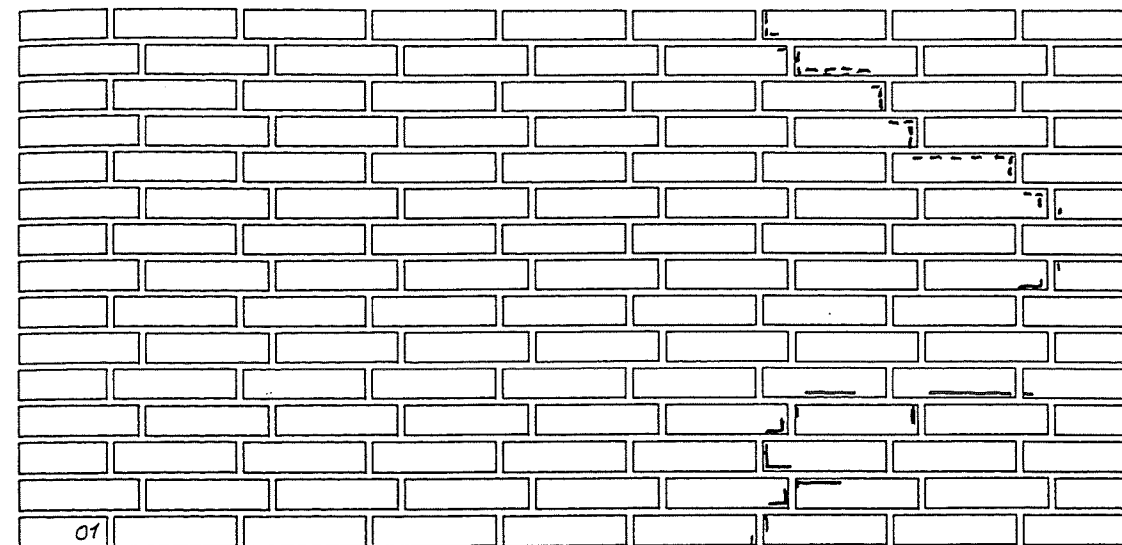
Forbandttype

L0

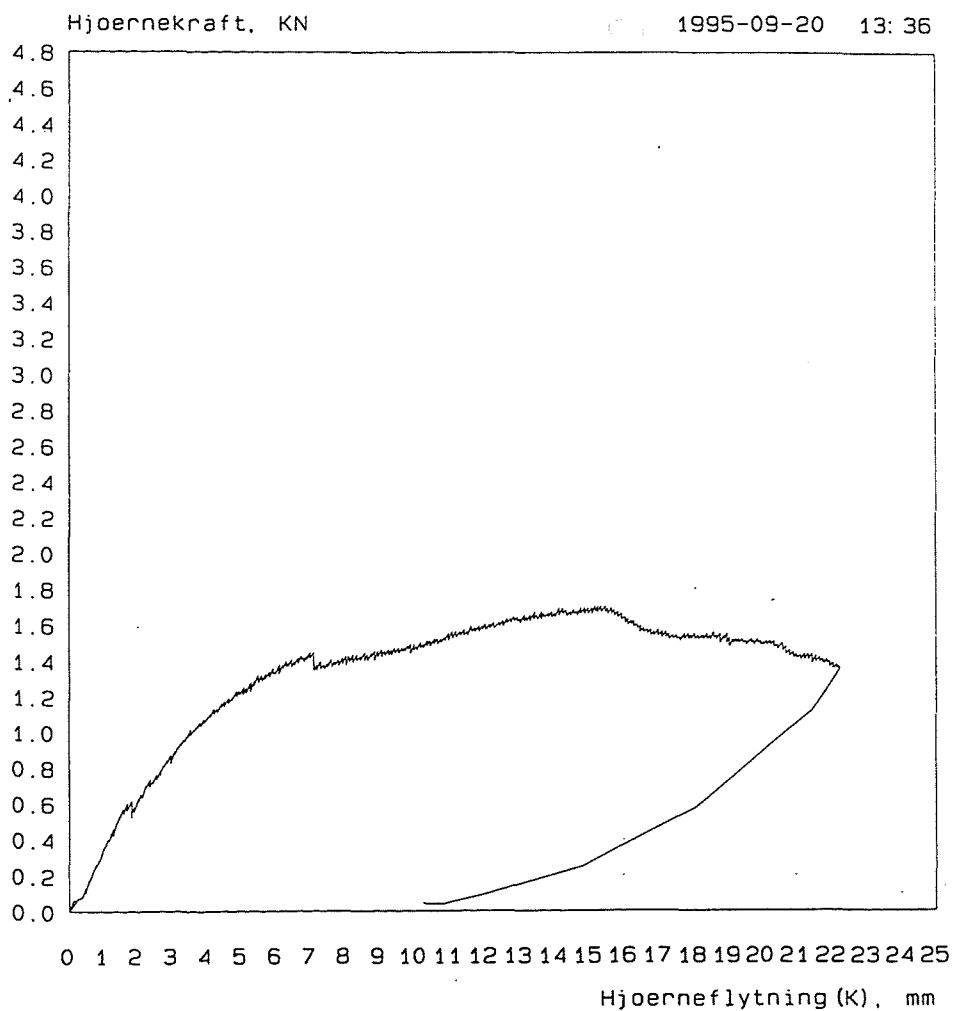
Kurvesignaturer



Brudbillede

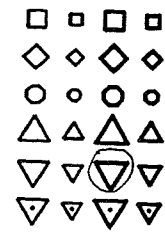


Arbejdslinie.

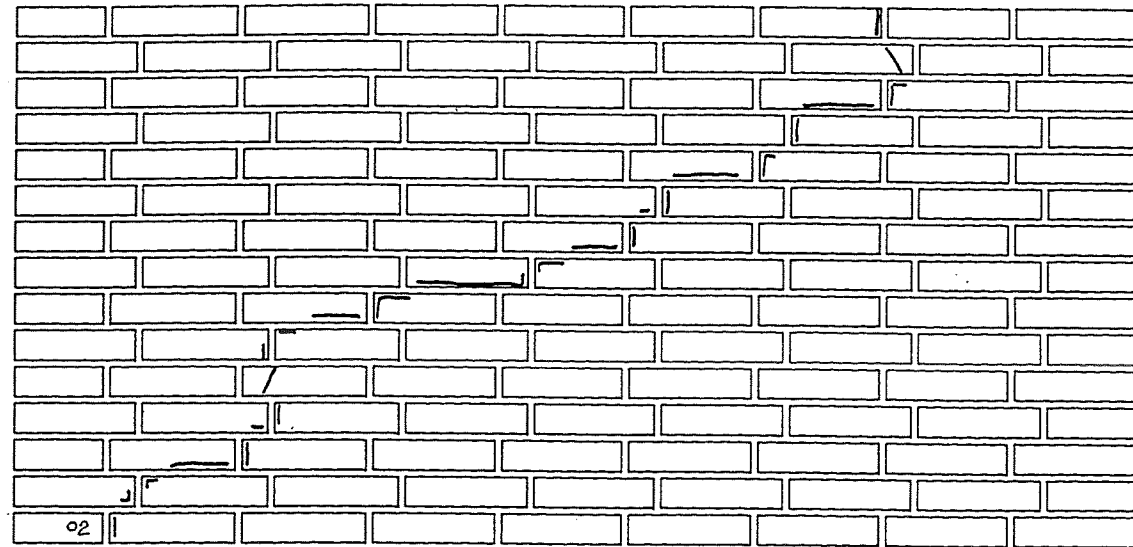


Mur 02
 Stentype D
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L0

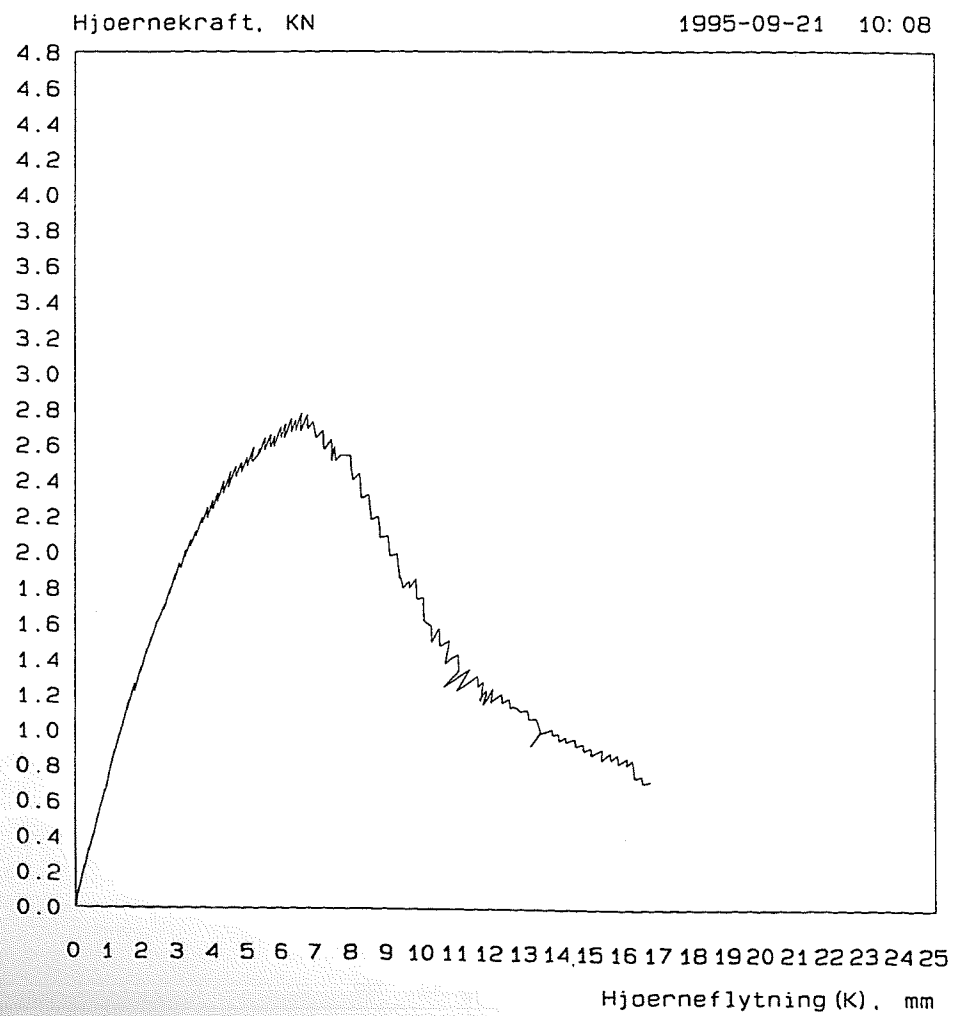
Kurvesignaturer



Brudbillede

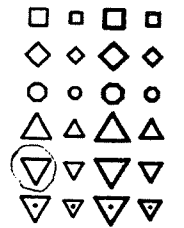


Arbejdslinie.

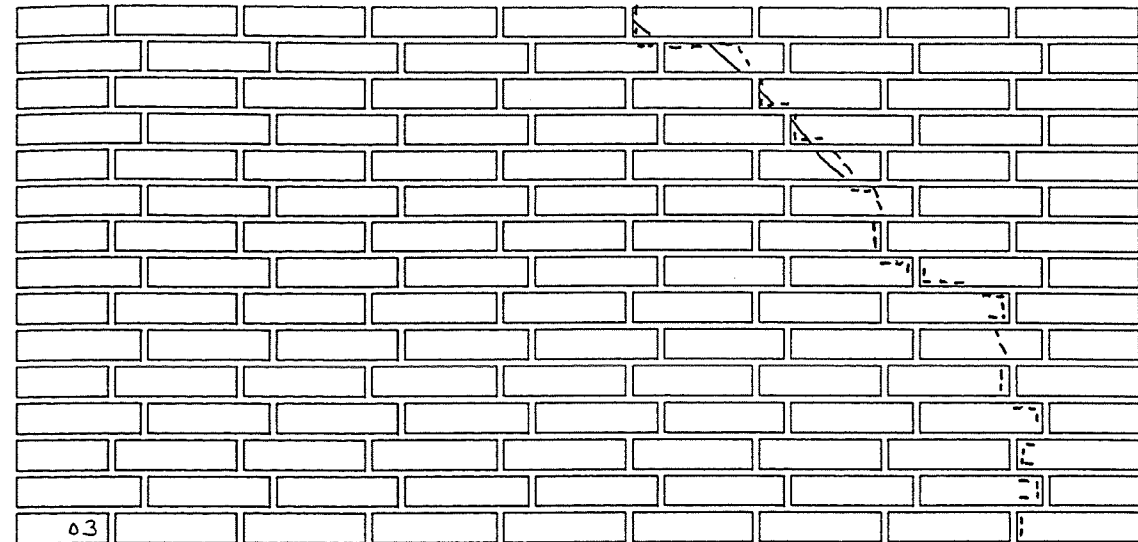


Mur 03
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L0

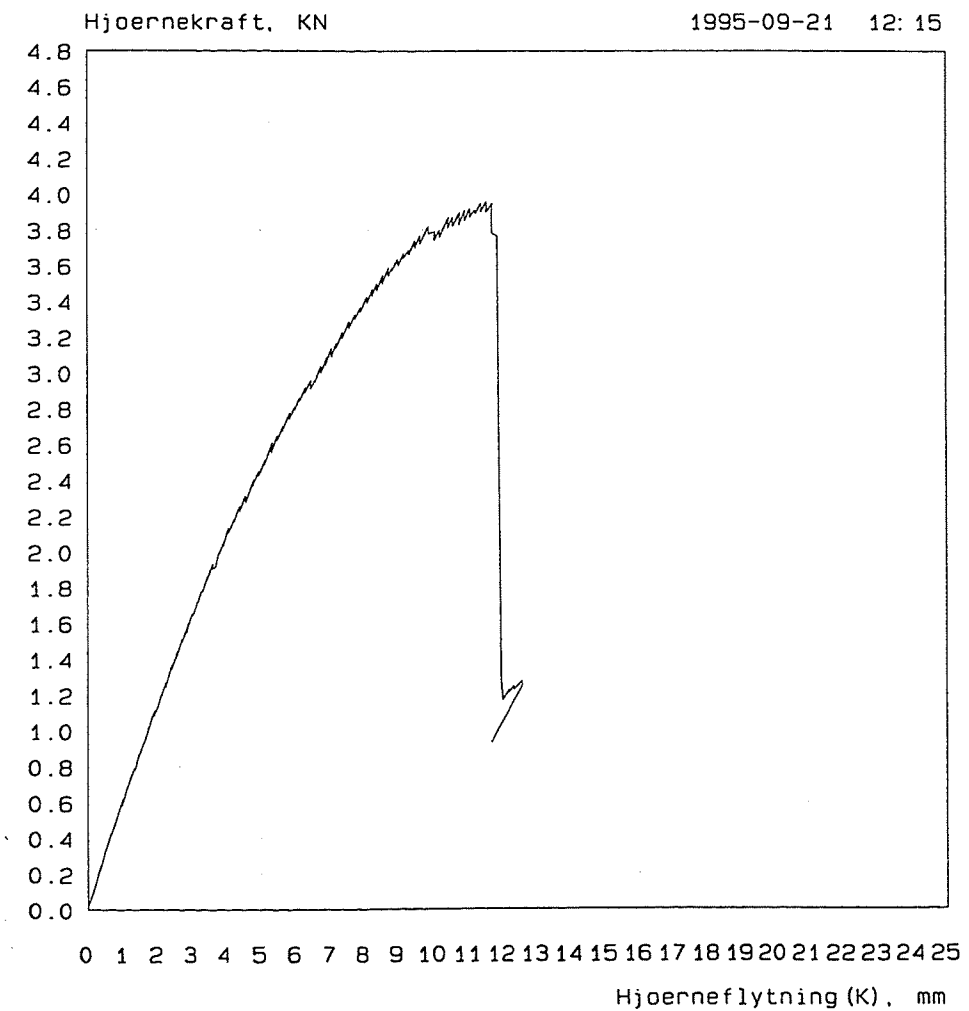
Kurvesignaturer



Brudbillede

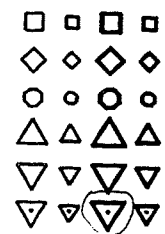


Arbejdslinie.

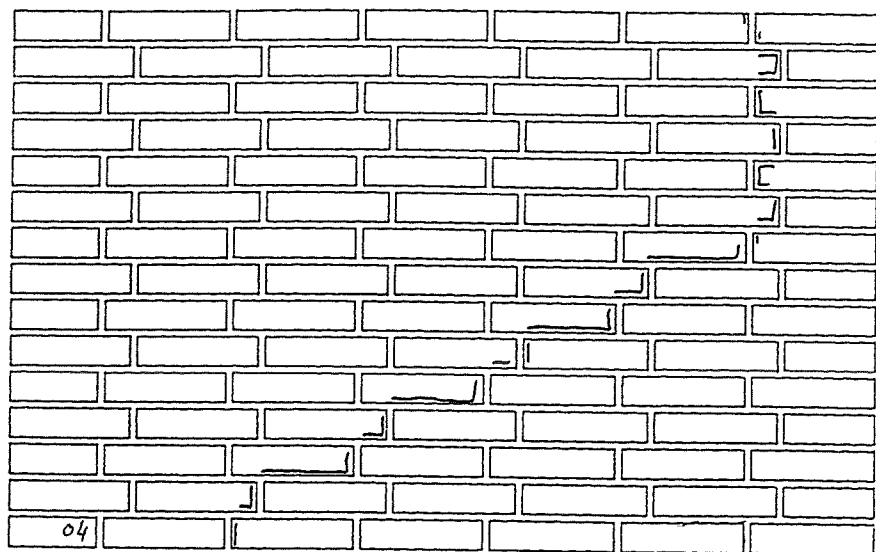


Mur 04
 Stentype D
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L0

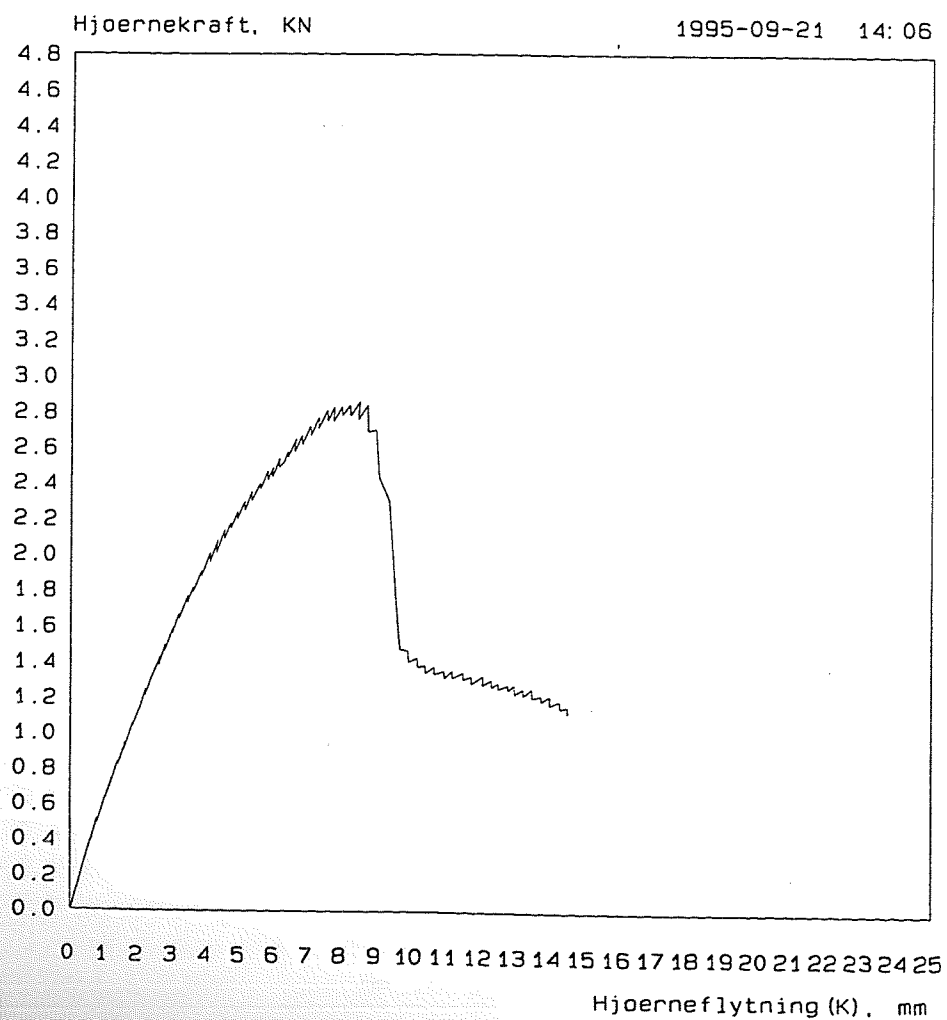
Kurvesignaturer



Brudbillede

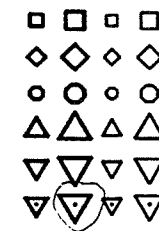


Arbejdslinie.

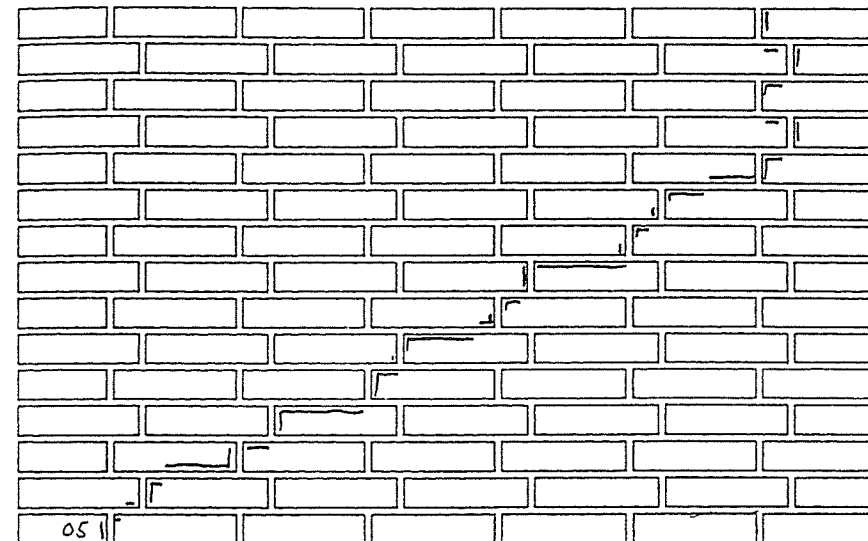


Mur 05
 Stentype D
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L0

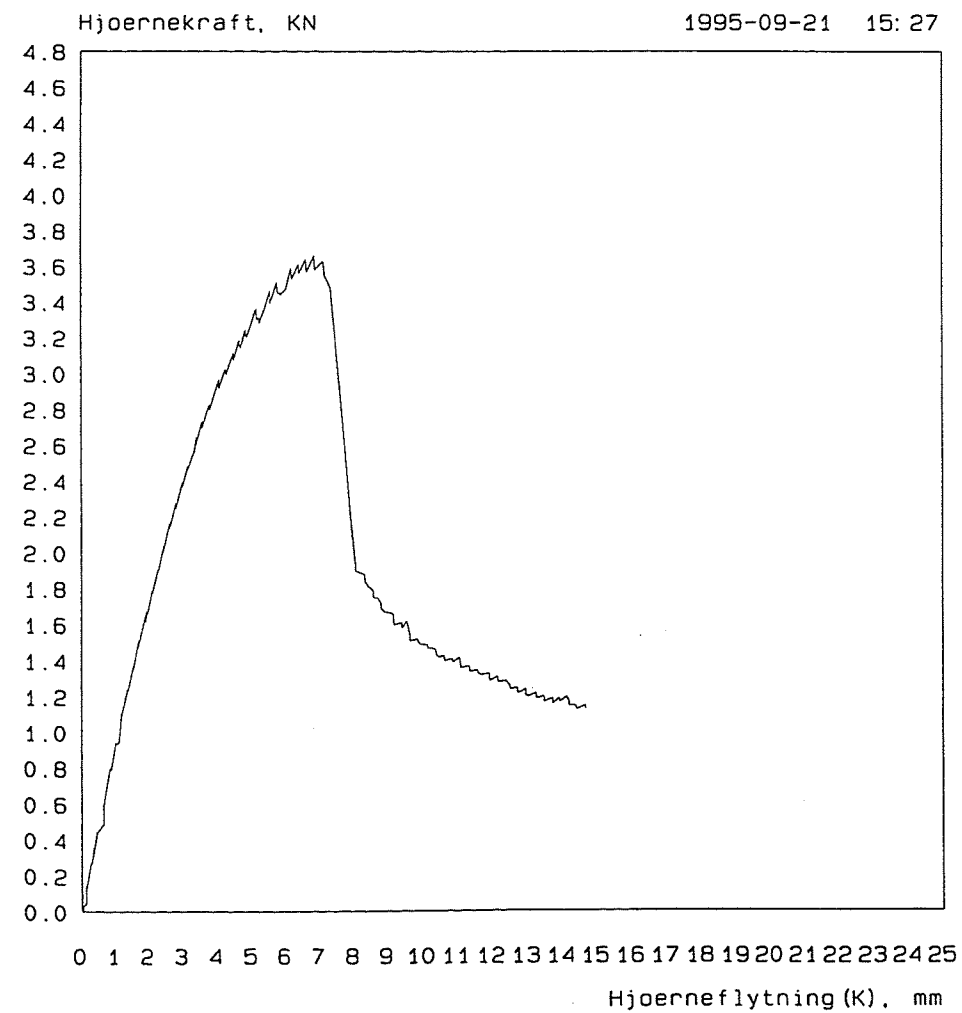
Kurvesignaturer



Brudbillede

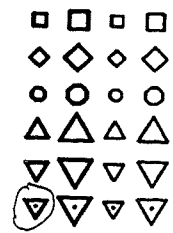


Arbejdslinie.

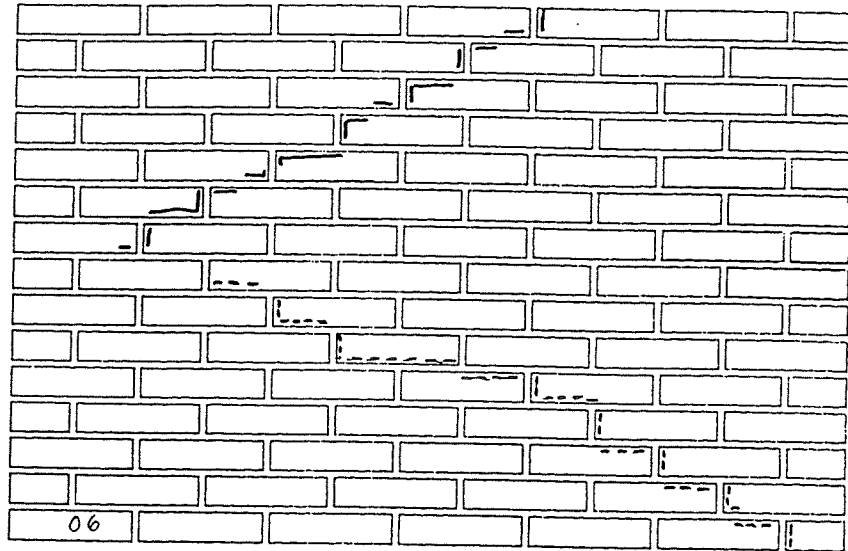


Mur 06
 Stentype D
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L1

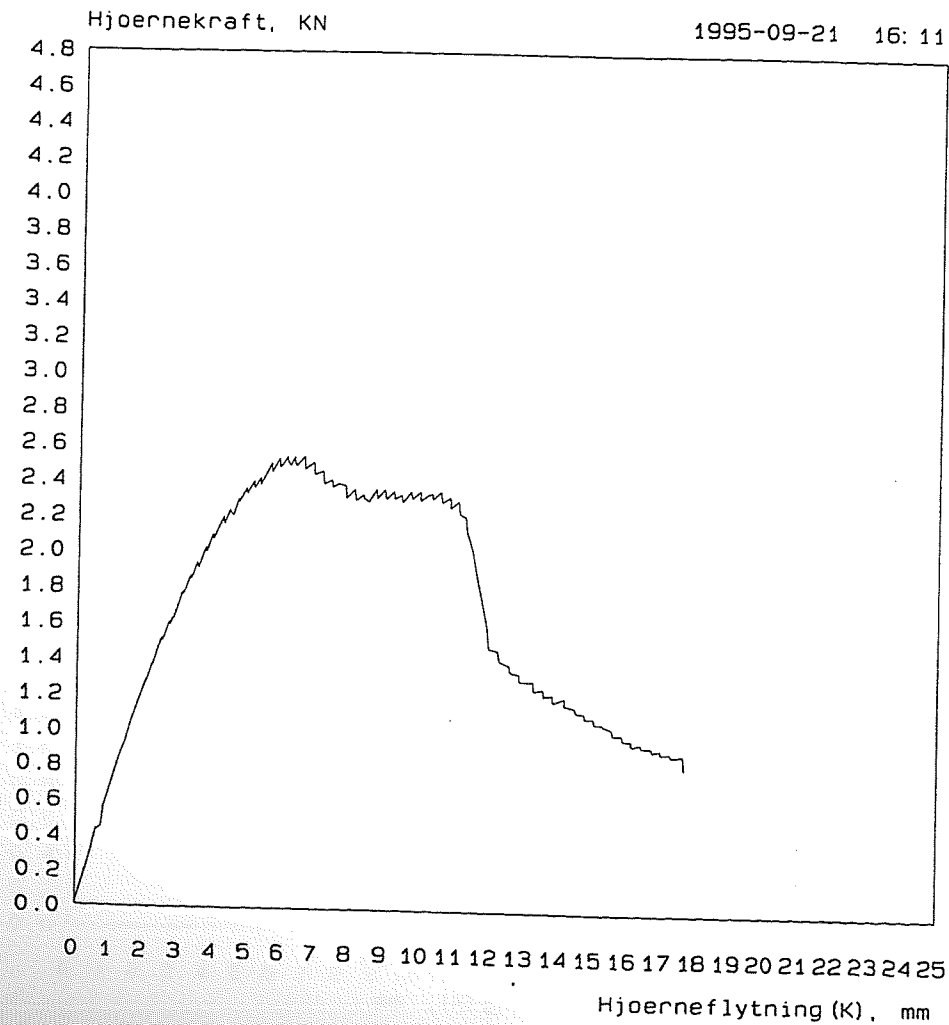
Kurvesignaturer



Brudbillede

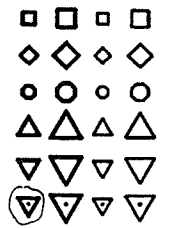


Arbejdslinie.

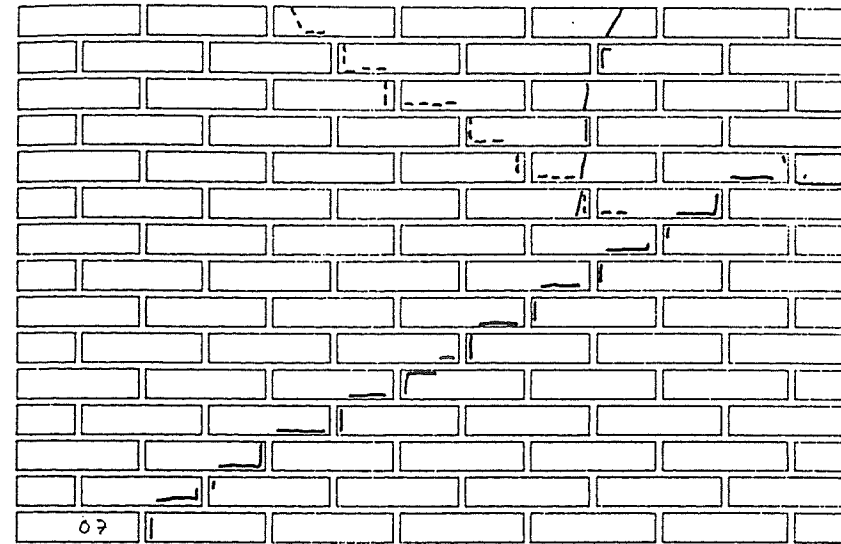


Mur 07
 Stentype D
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L1

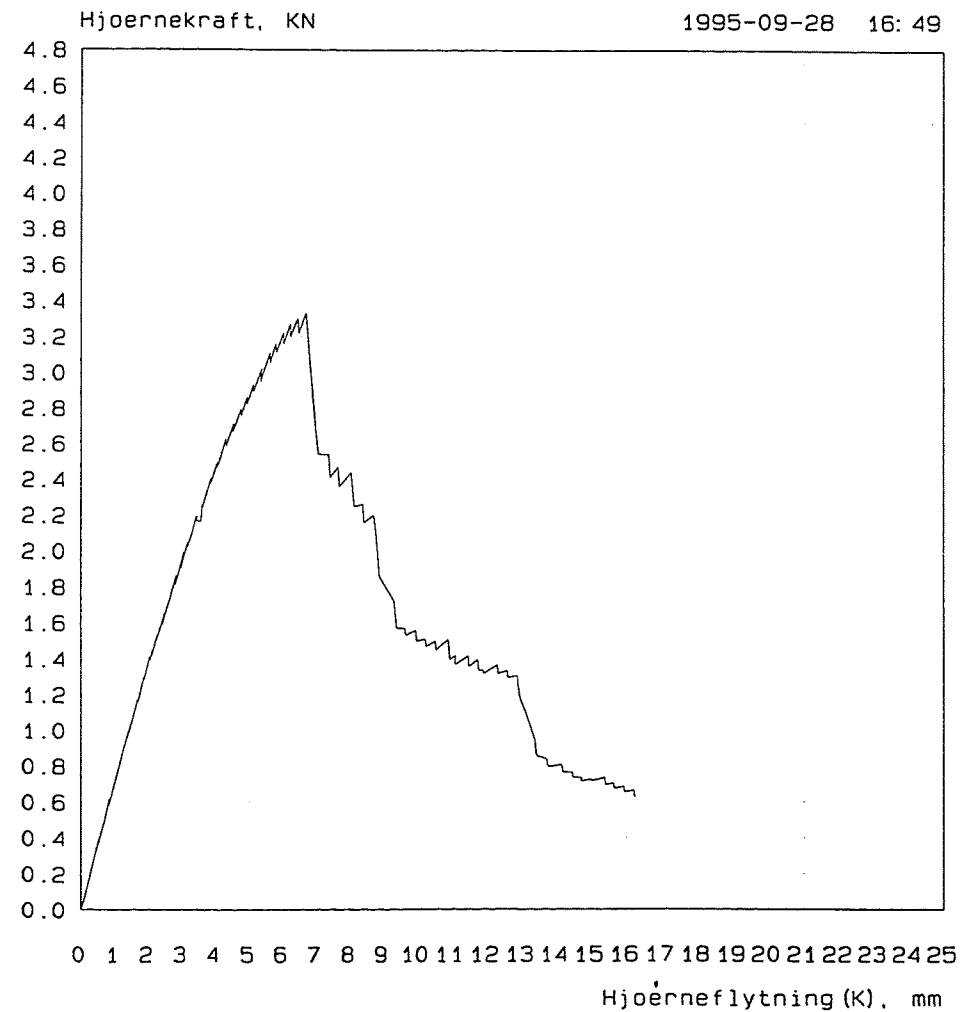
Kurvesignaturer



Brudbillede

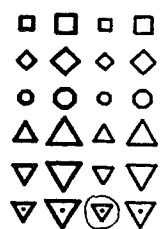


Arbejdslinie.

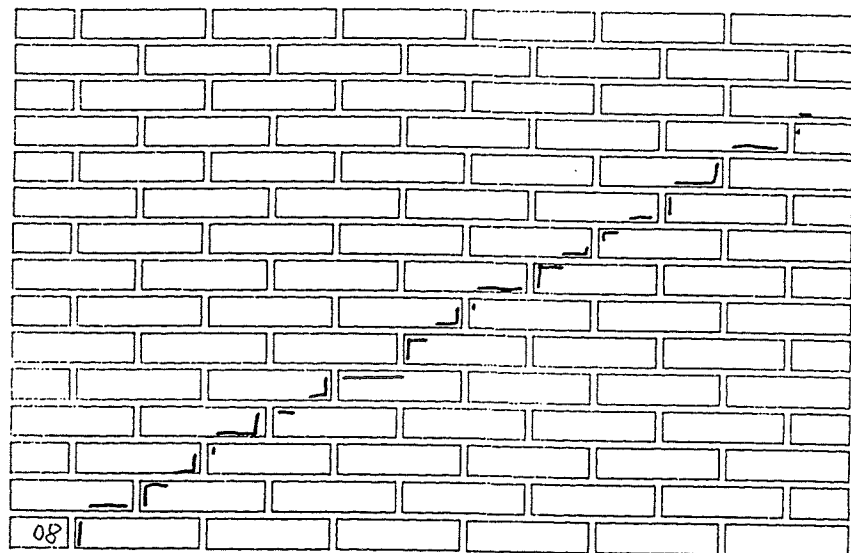


Mur 08
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L1

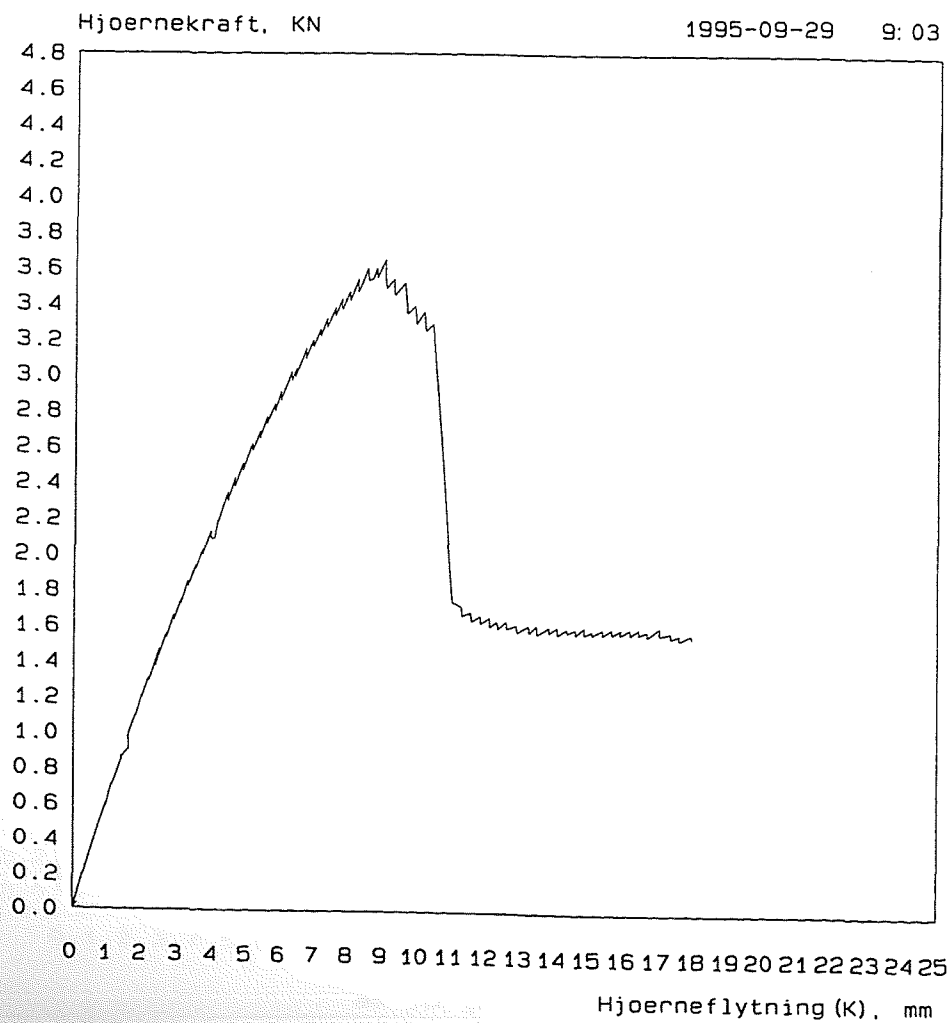
Kurvesignaturer



Brudbillede

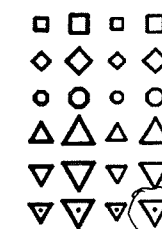


Arbejdslinie.

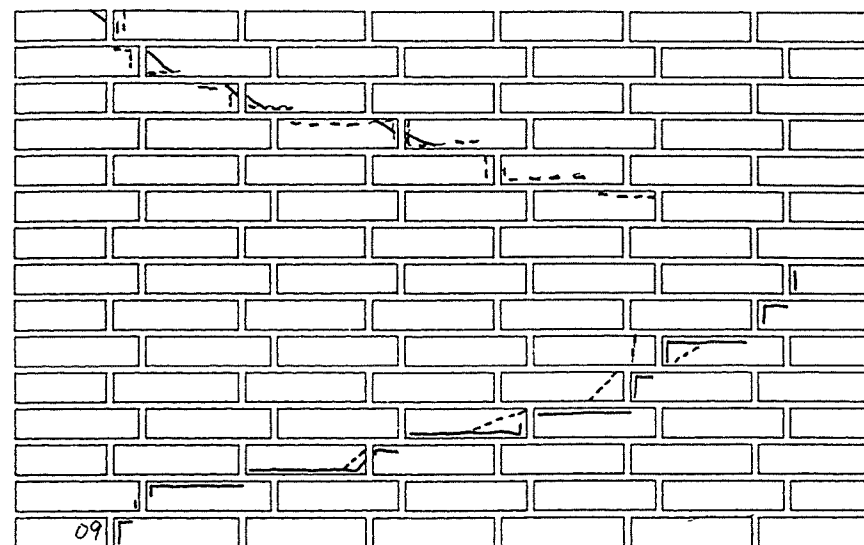


Mur 09
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L0

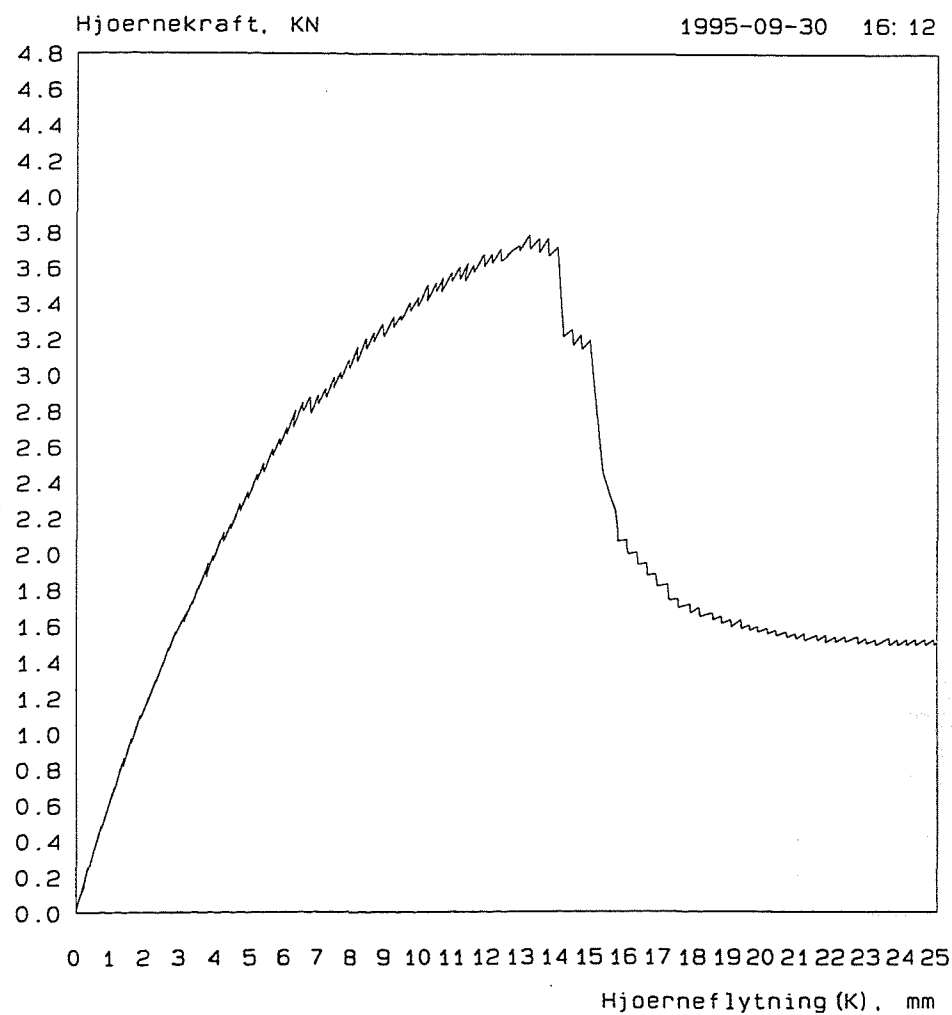
Kurvesignaturer



Brudbillede

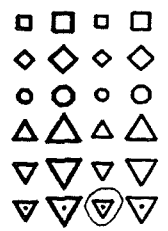


Arbejdslinie.

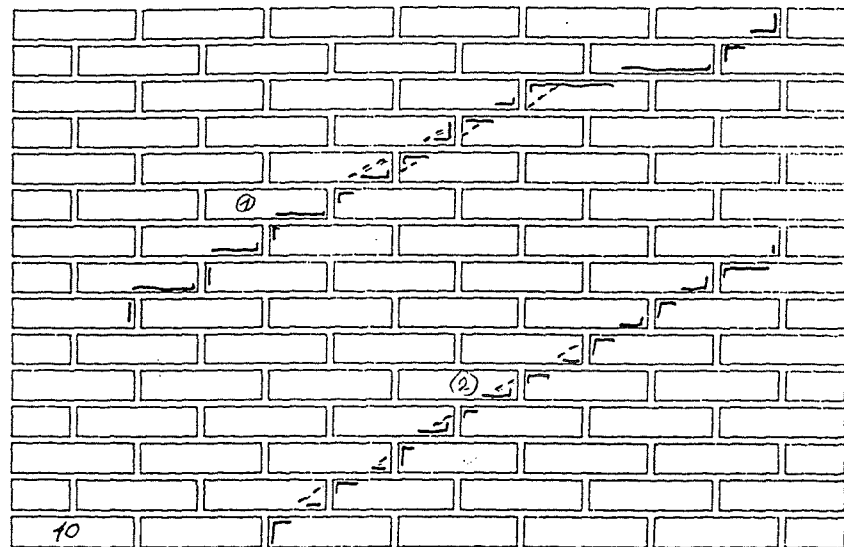


Mur 10
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L1

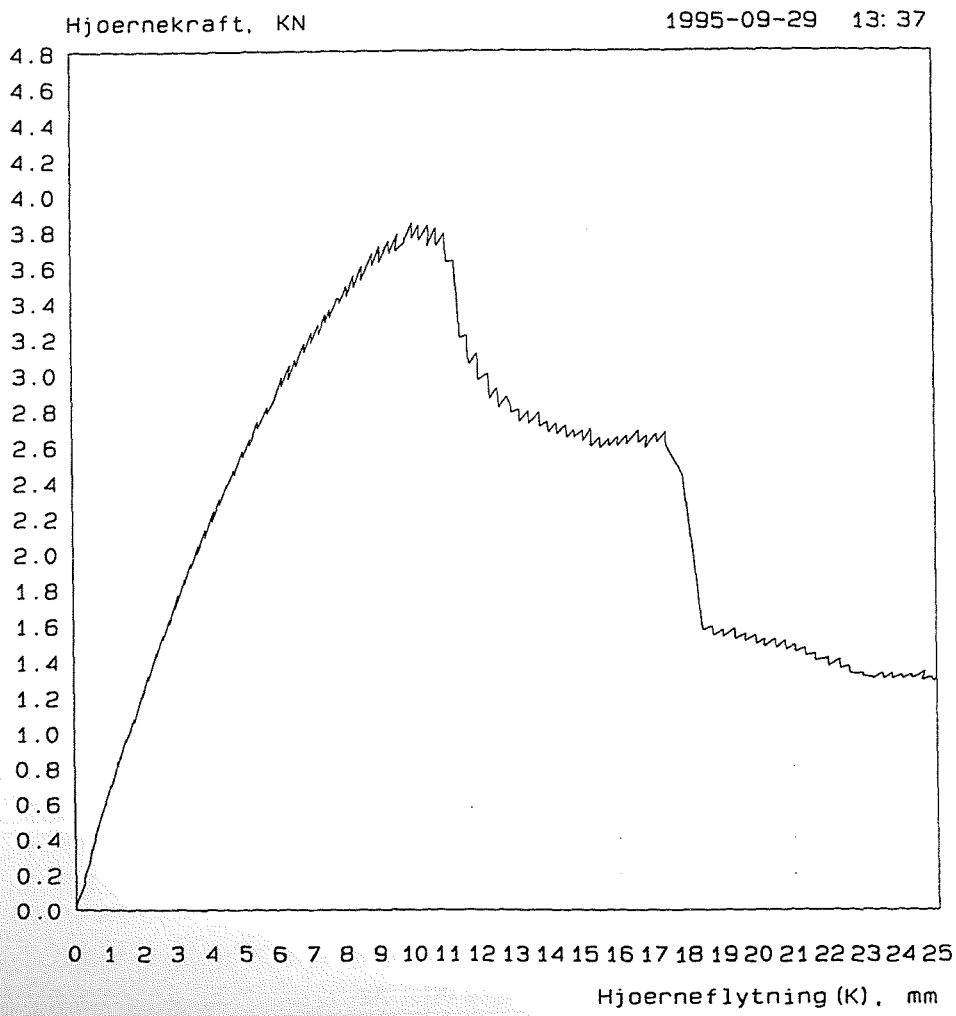
Kurvesignaturer



Brudbillede

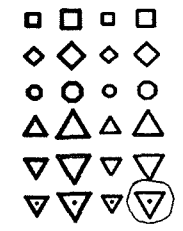


Arbejdslinie.

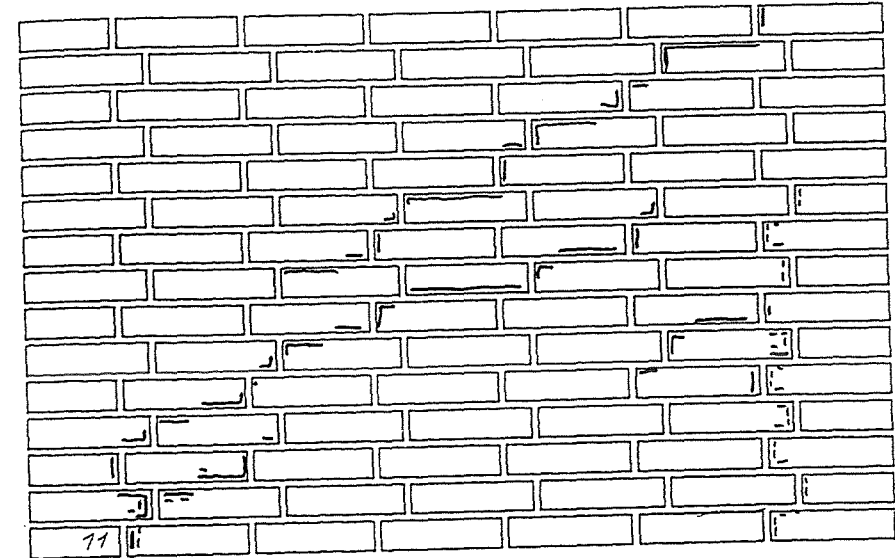


Mur 11
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L0

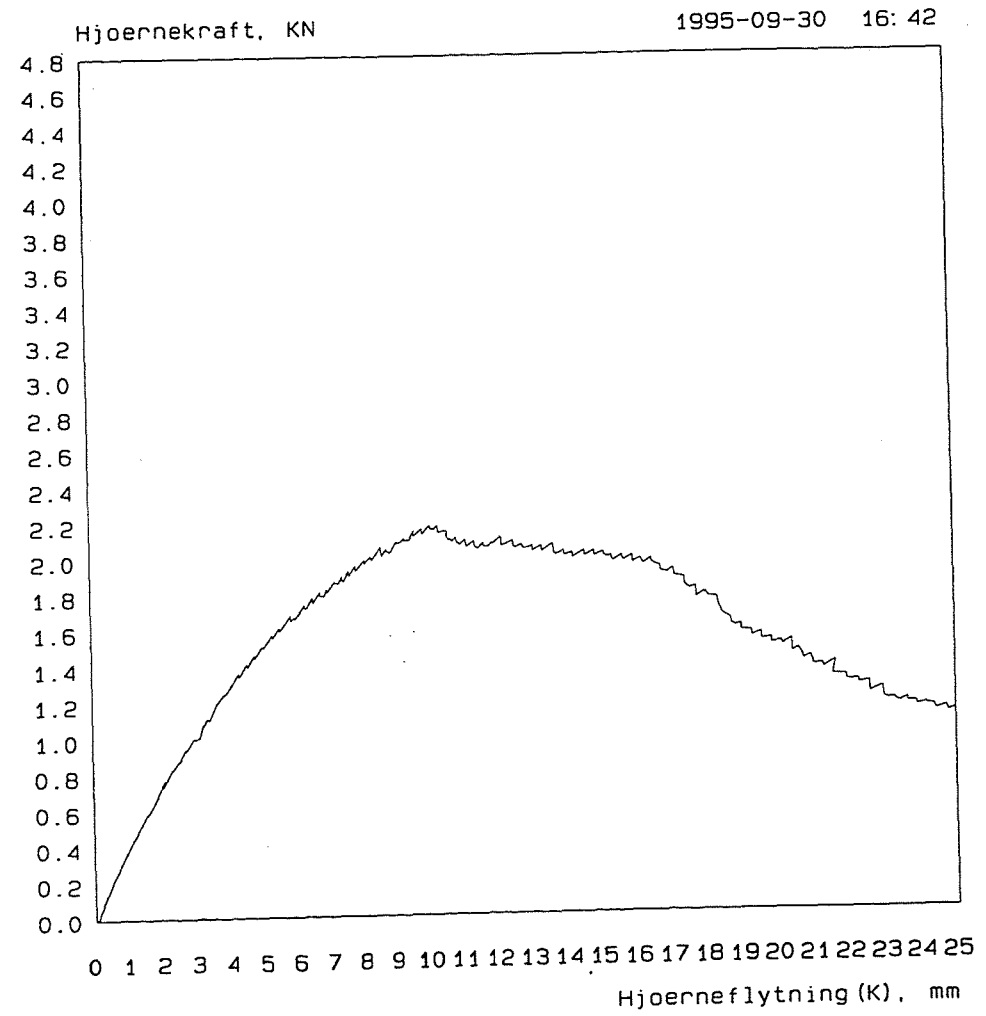
Kurvesignaturer



Brudbillede

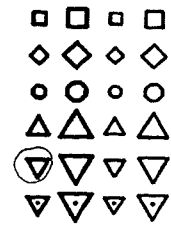


Arbejdslinie.

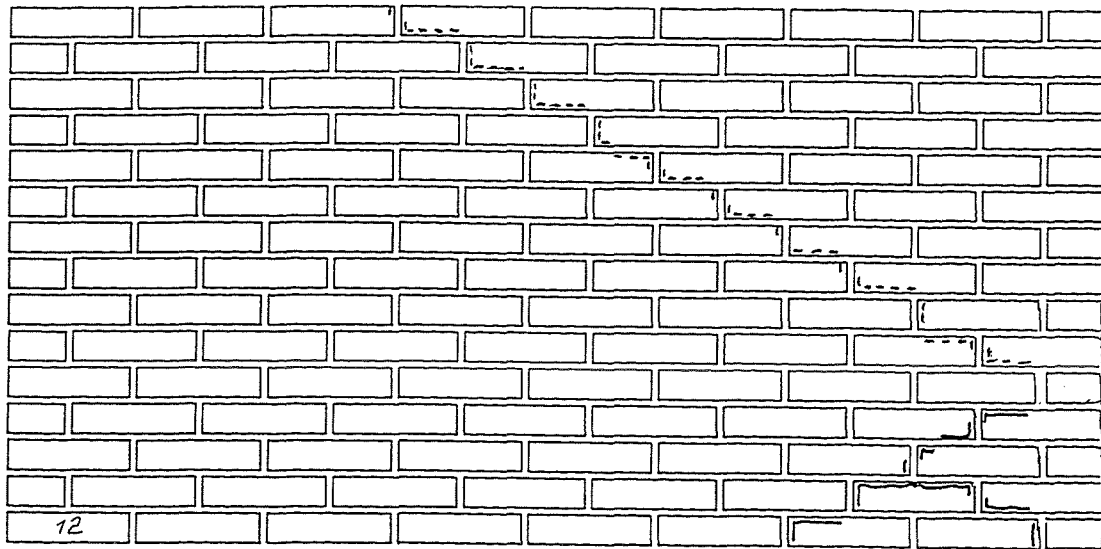


Mur 12
 Stentype D
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L1

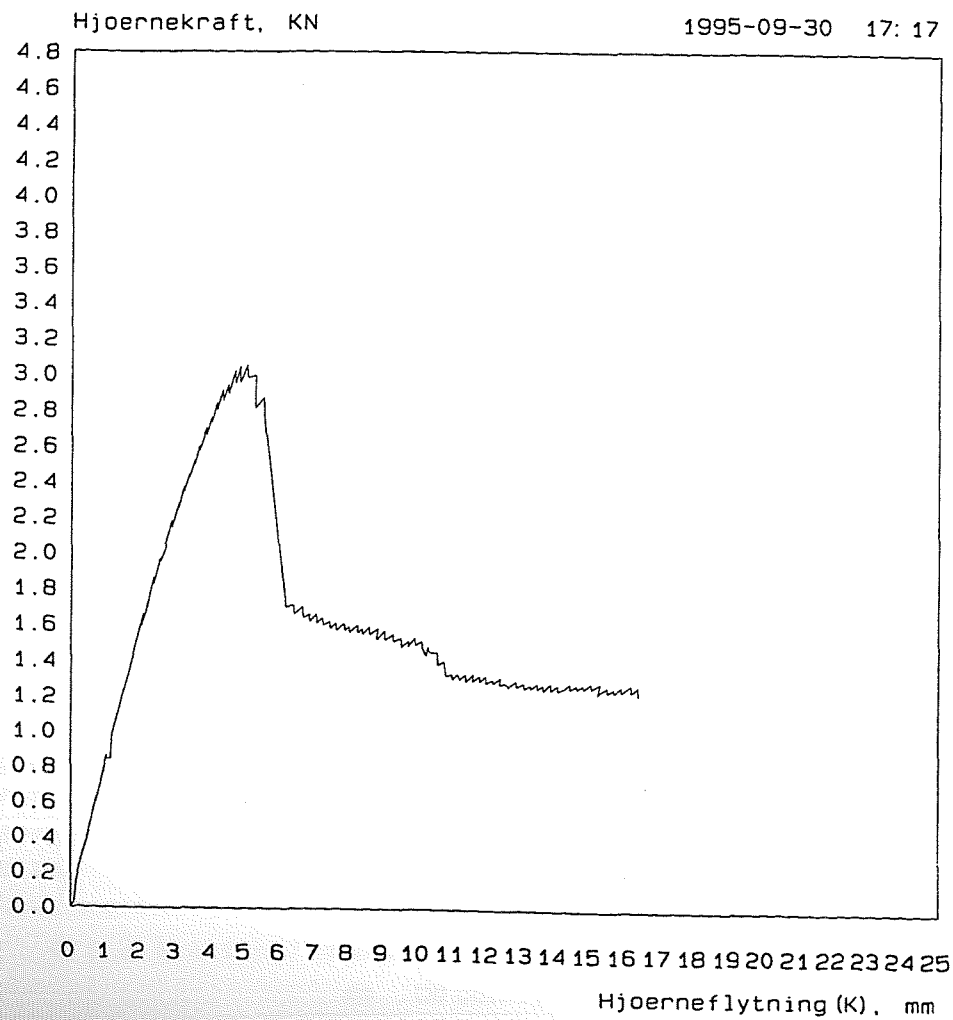
Kurvesignaturer



Brudbillede

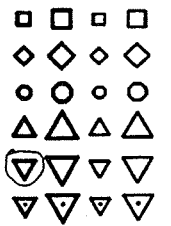


Arbejdslinie.

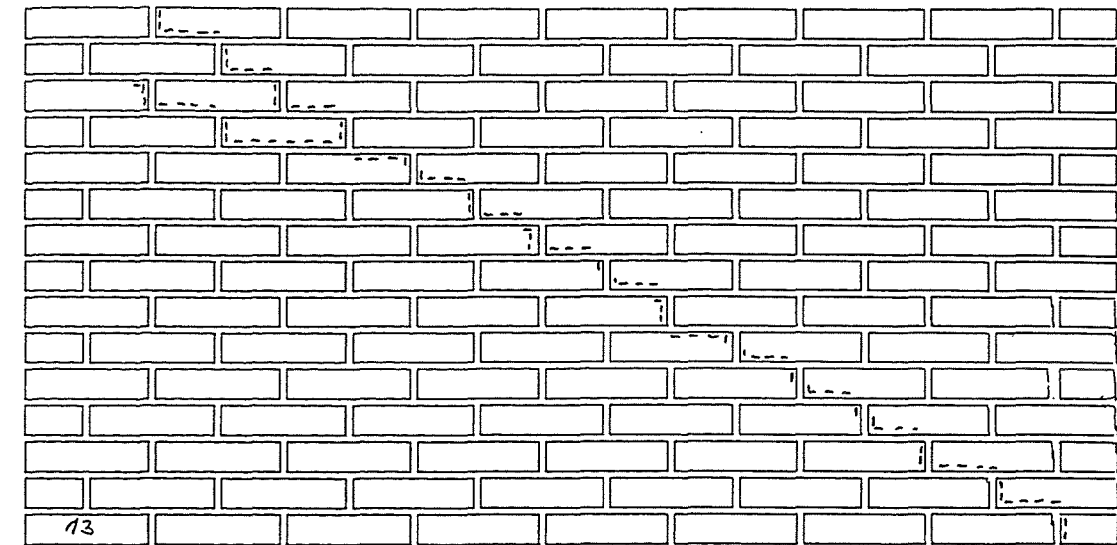


Mur 13
 Stentype D
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L1

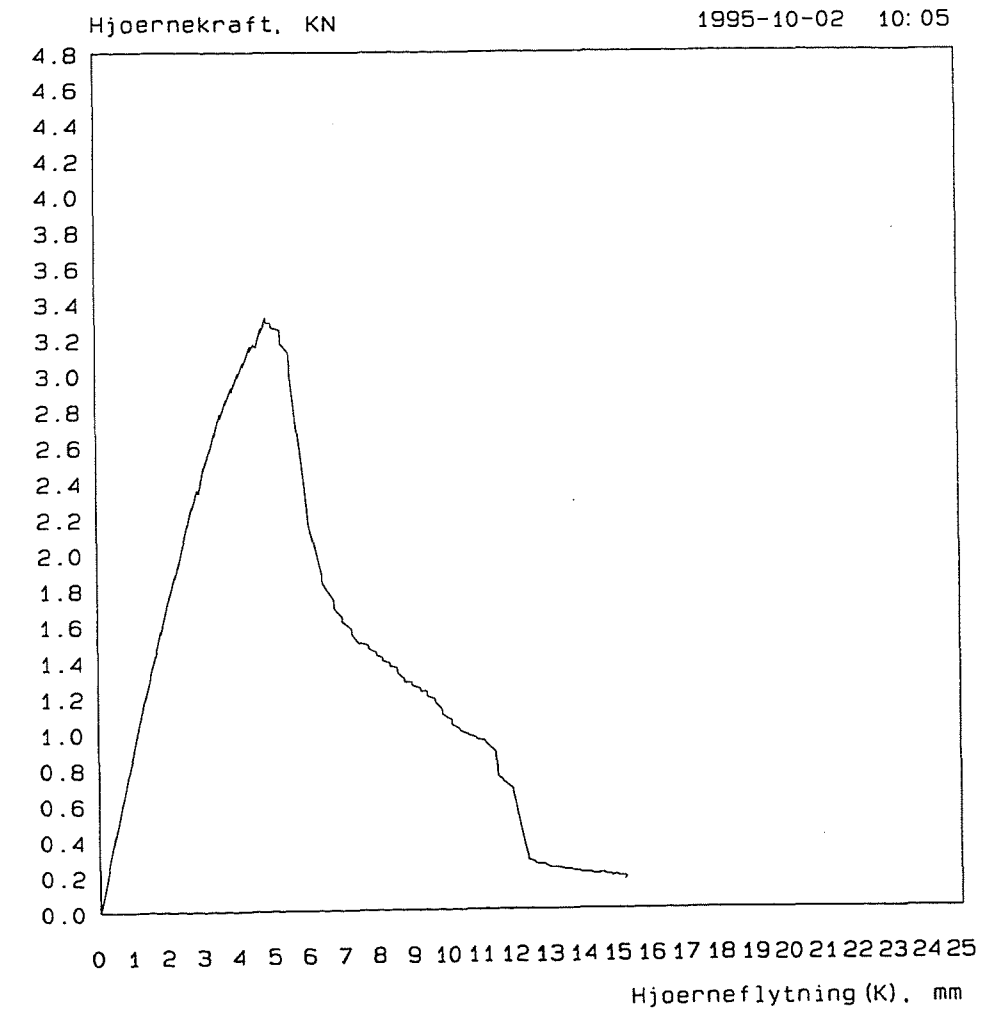
Kurvesignaturer



Brudbillede

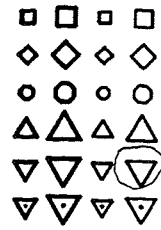


Arbejdslinie.

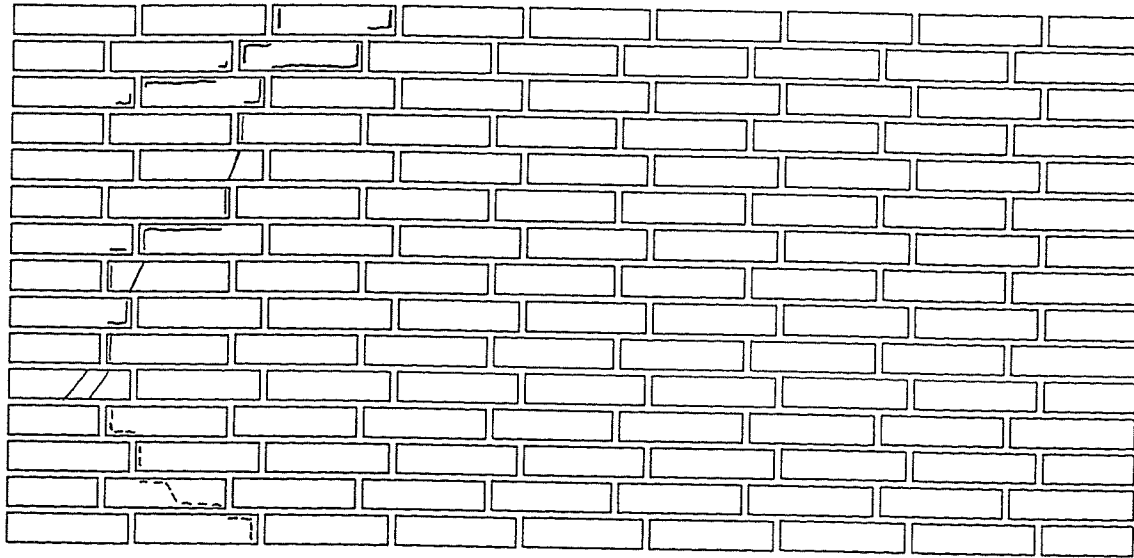


Mur 14
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L0

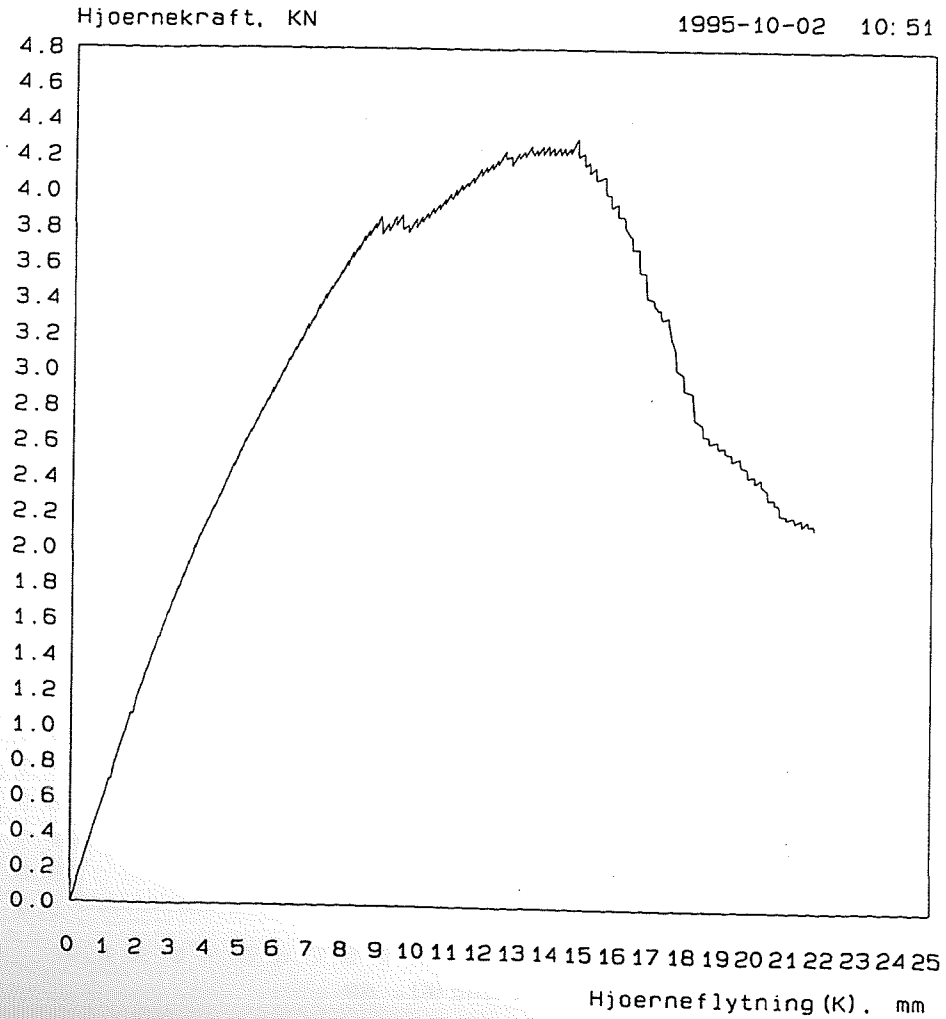
Kurvesignaturer



Brudbillede

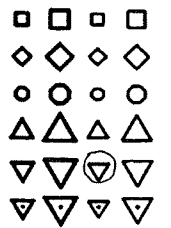


Arbejdslinie.

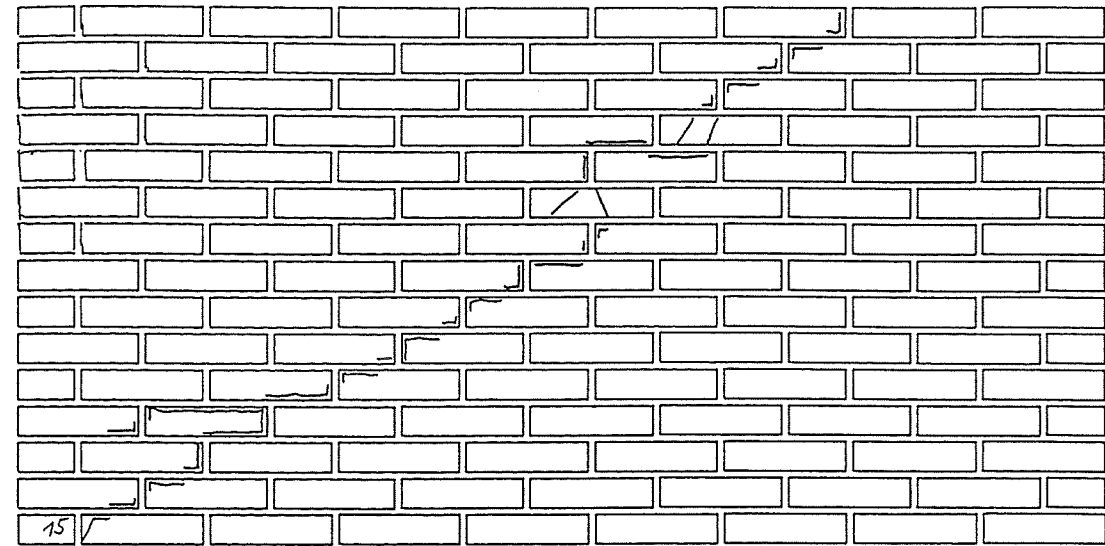


Mur 15
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L1

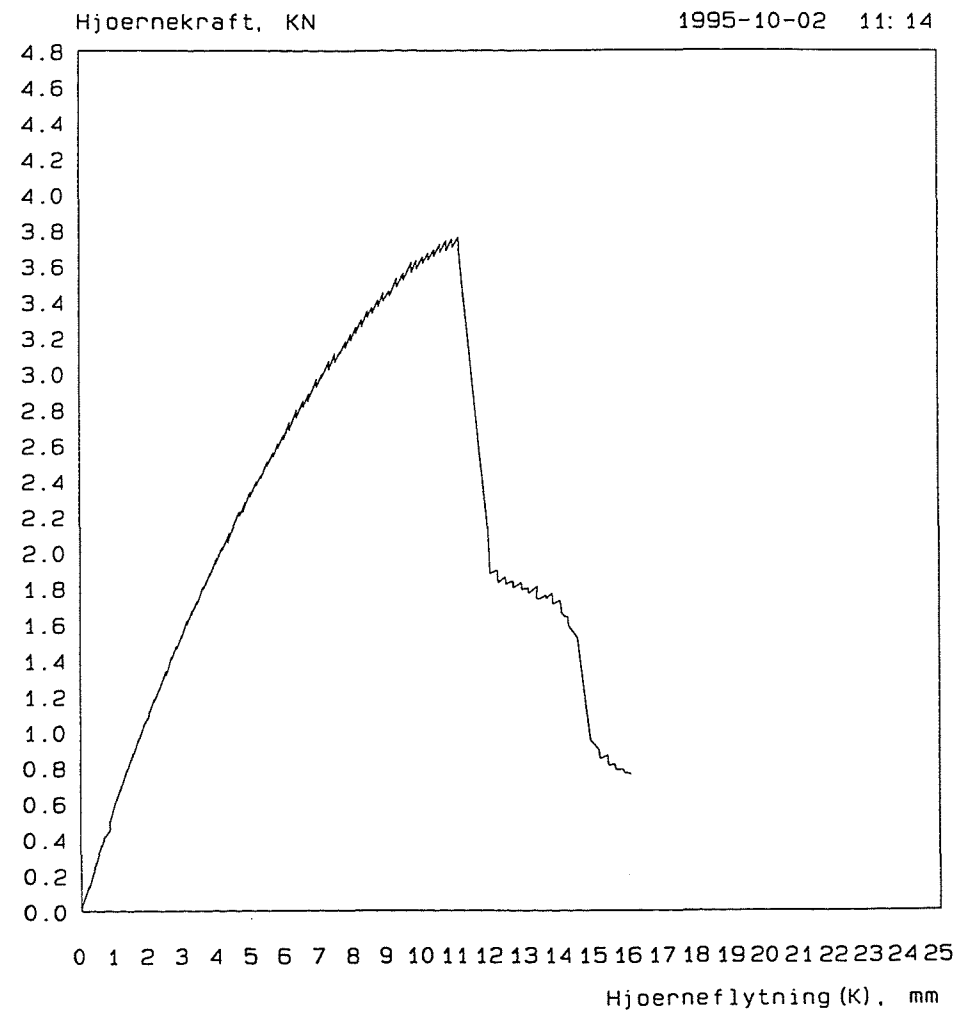
Kurvesignaturer



Brudbillede

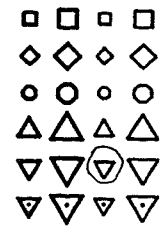


Arbejdslinie.

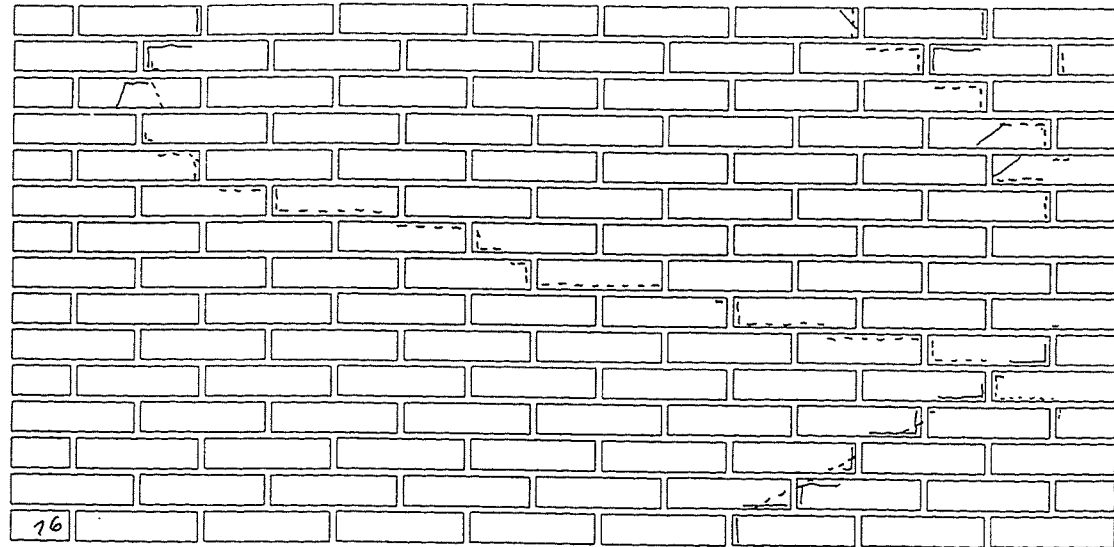


Mur 16
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L1

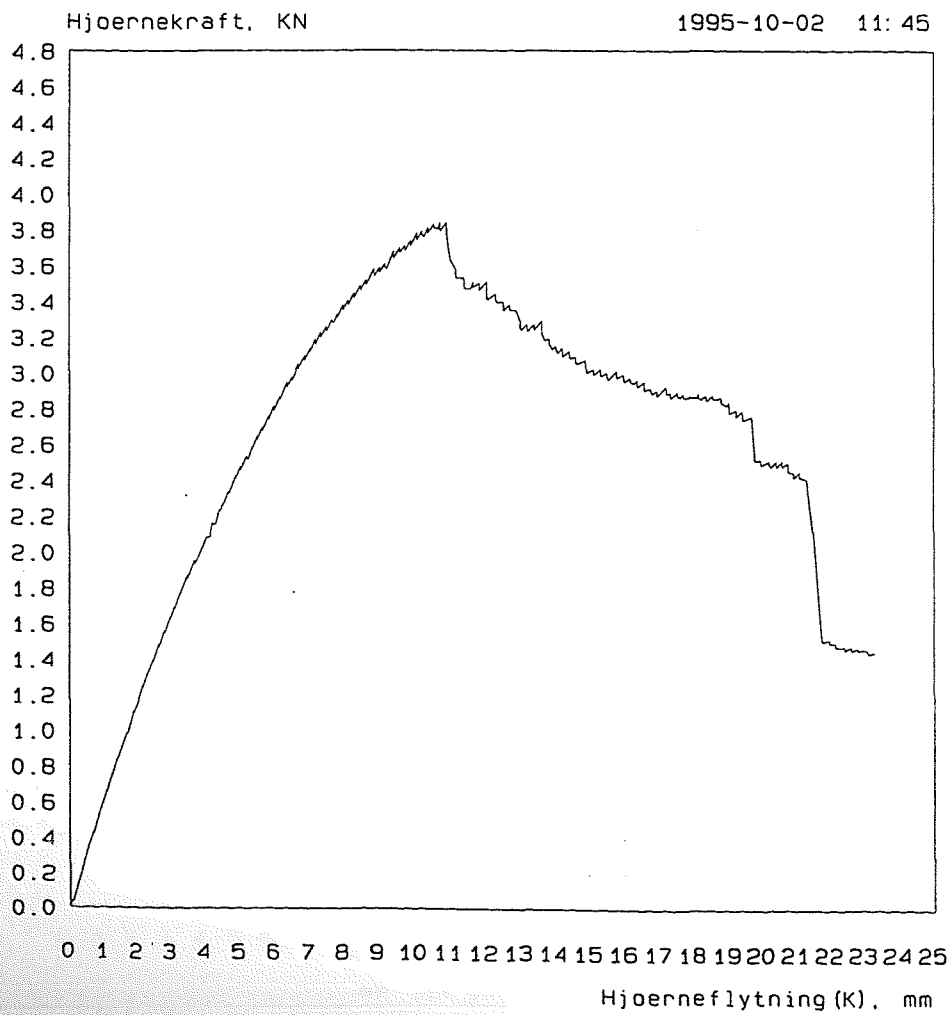
Kurvesignaturer



Brudbillede

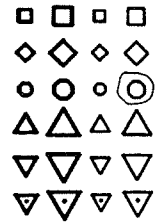


Arbejdslinie.

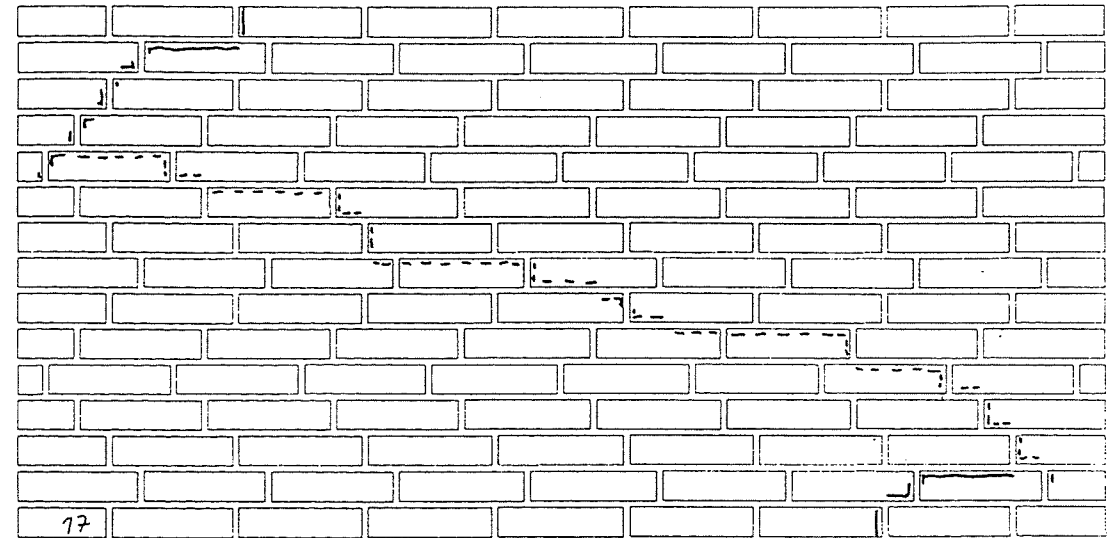


Mur 17
 Stentype C
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L4

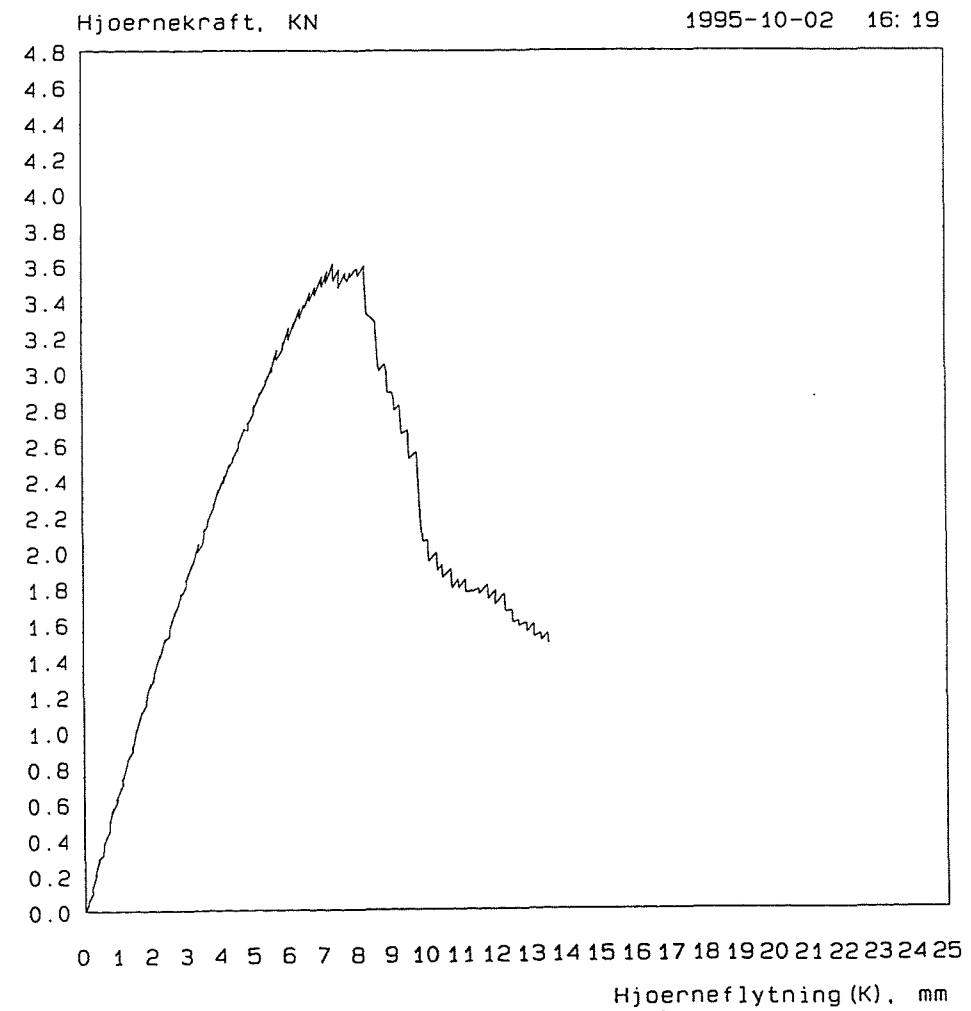
Kurvesignaturer



Brudbillede

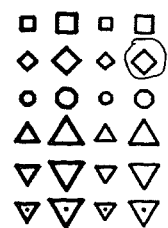


Arbejdslinie.

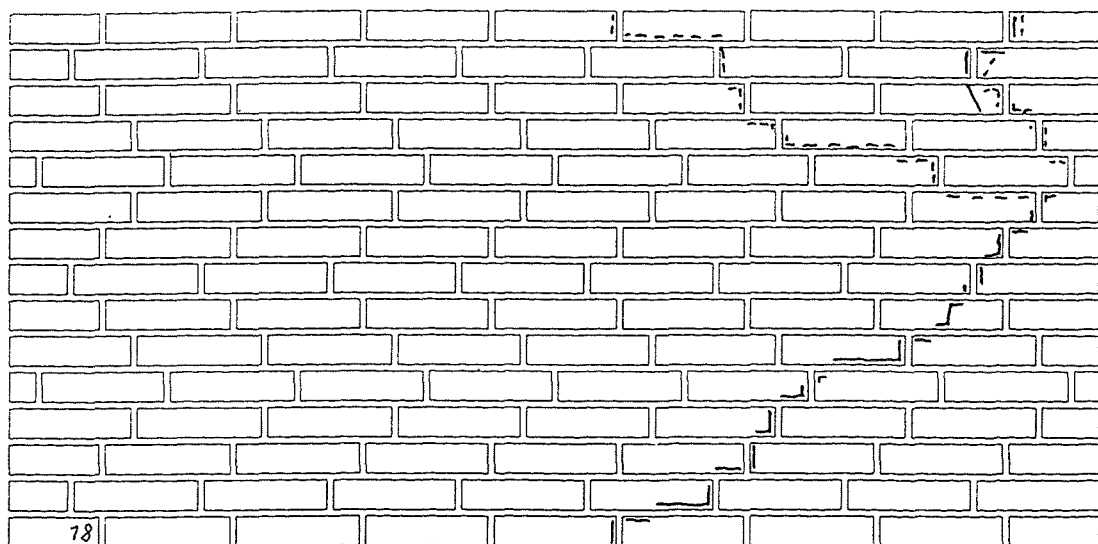


Mur 18
 Stentype B
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L4

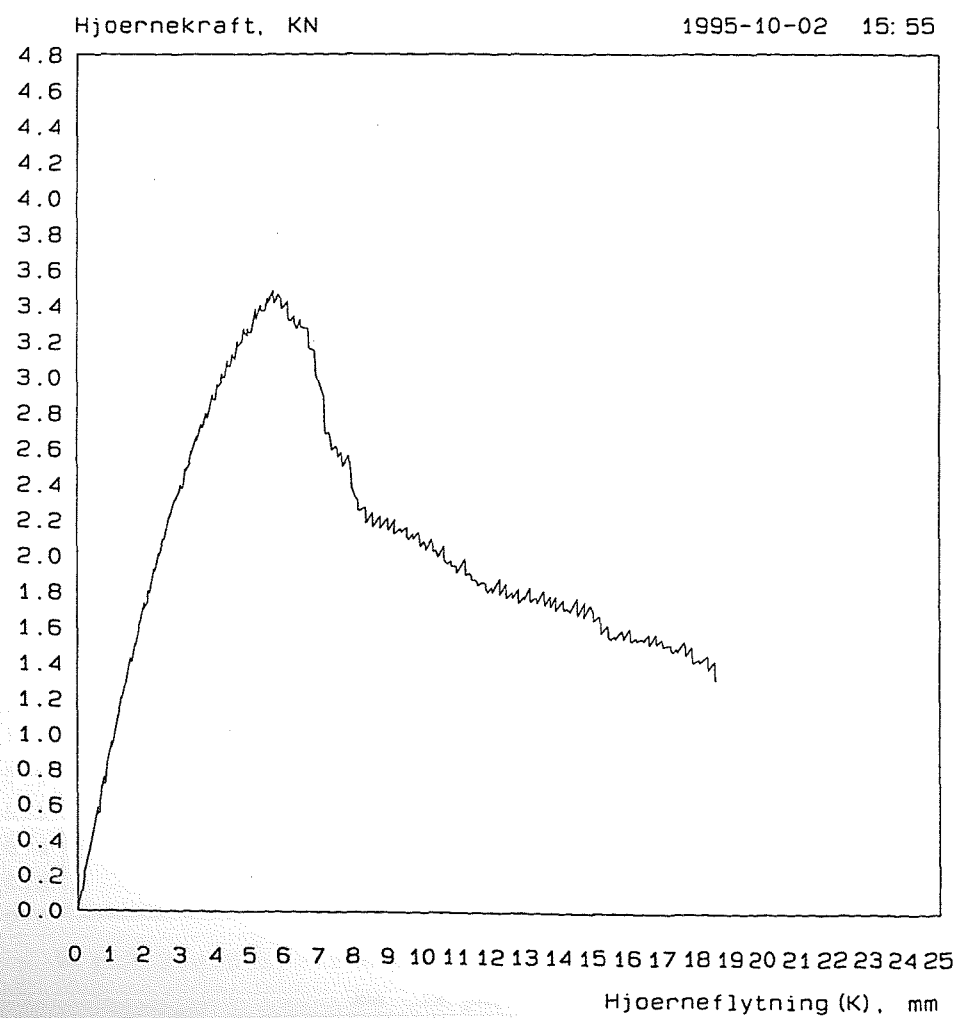
Kurvesignaturer



Brudbillede

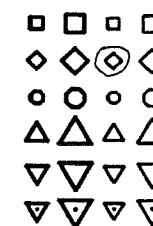


Arbejdslinie.

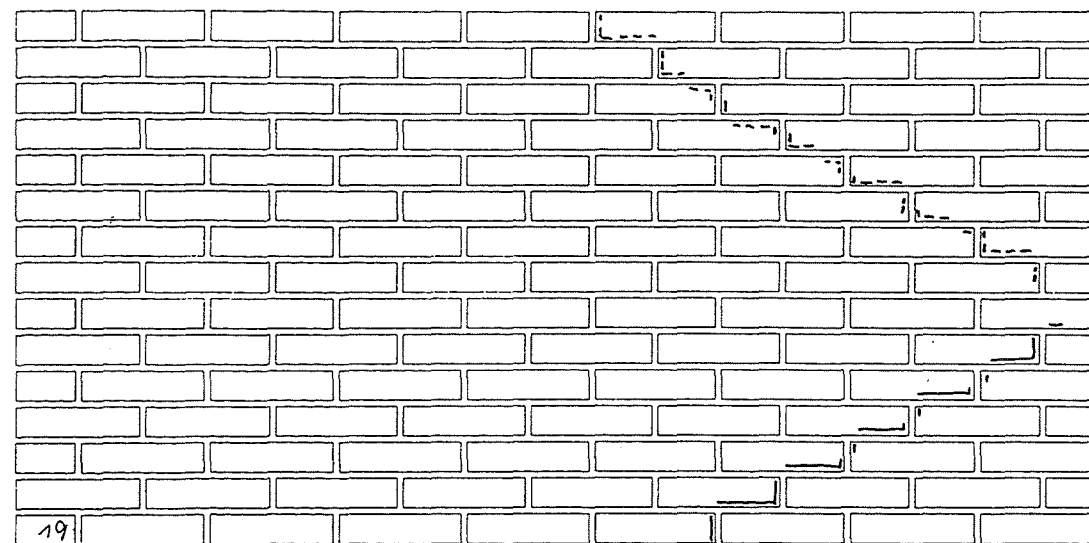


Mur 19
 Stentype B
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L1

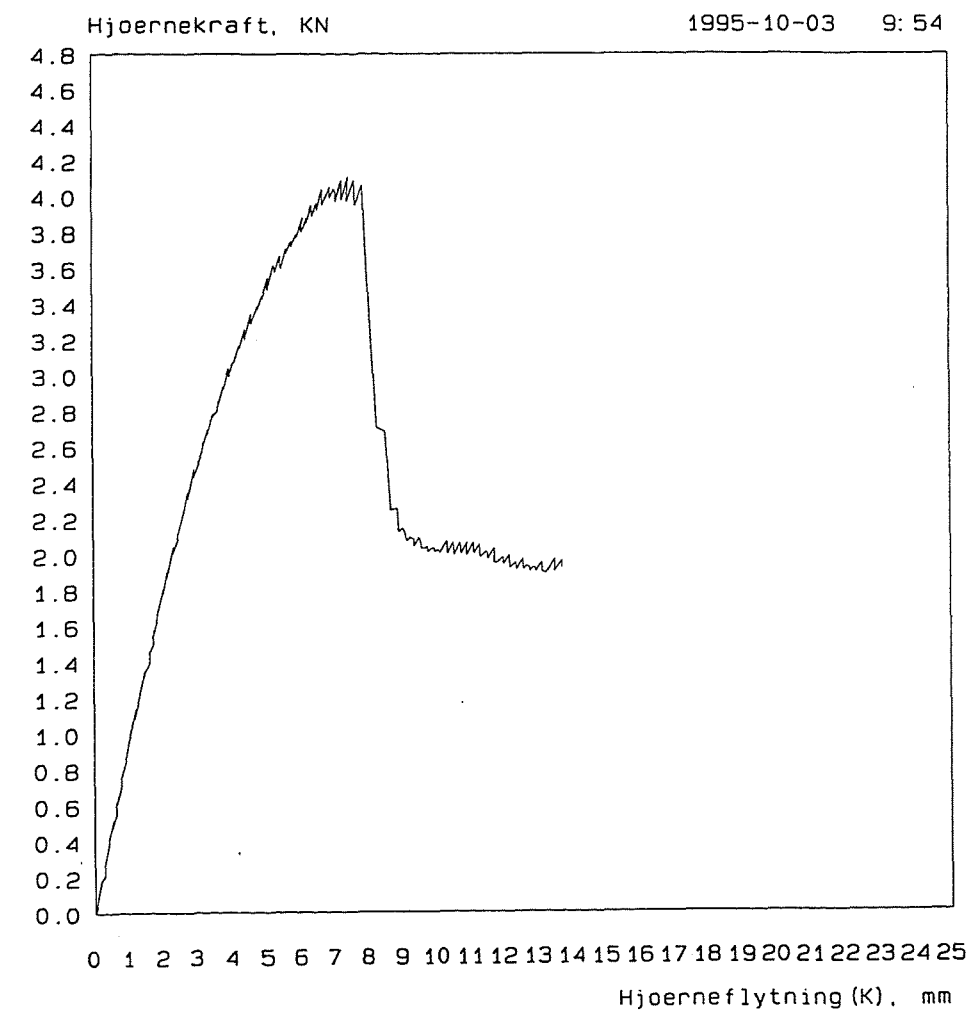
Kurvesignaturer



Brudbillede

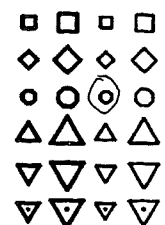


Arbejdslinie.

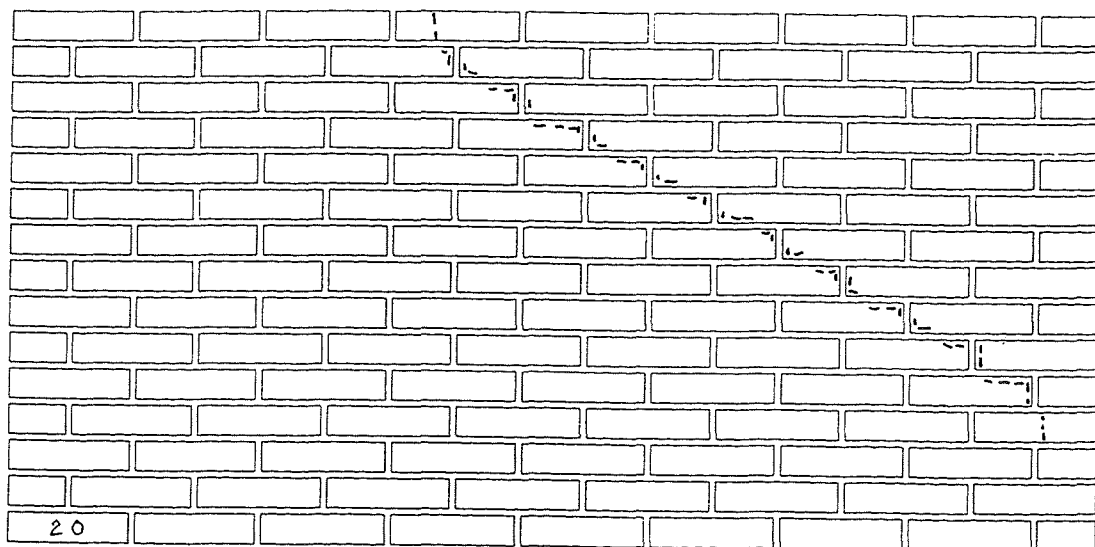


Mur 20
 Stentype C
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L1

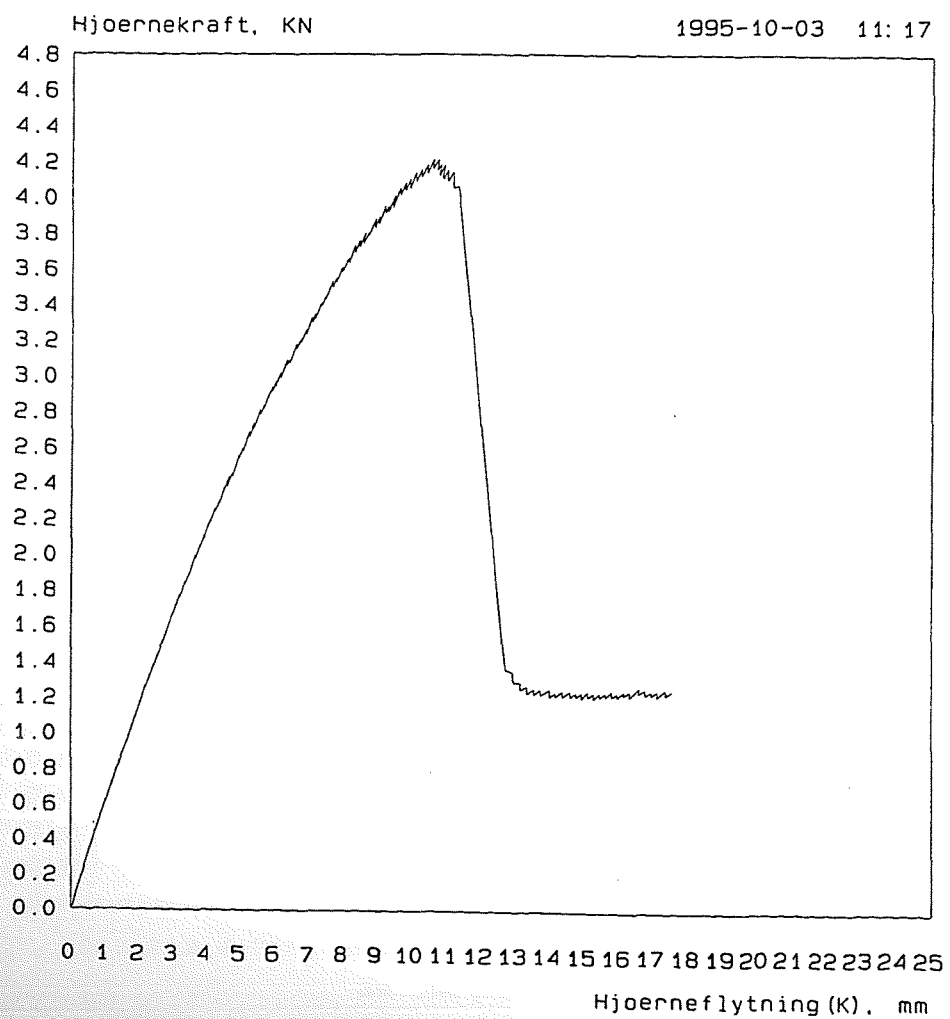
Kurvesignaturer



Brudbillede

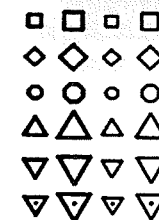


Arbejdslinie.

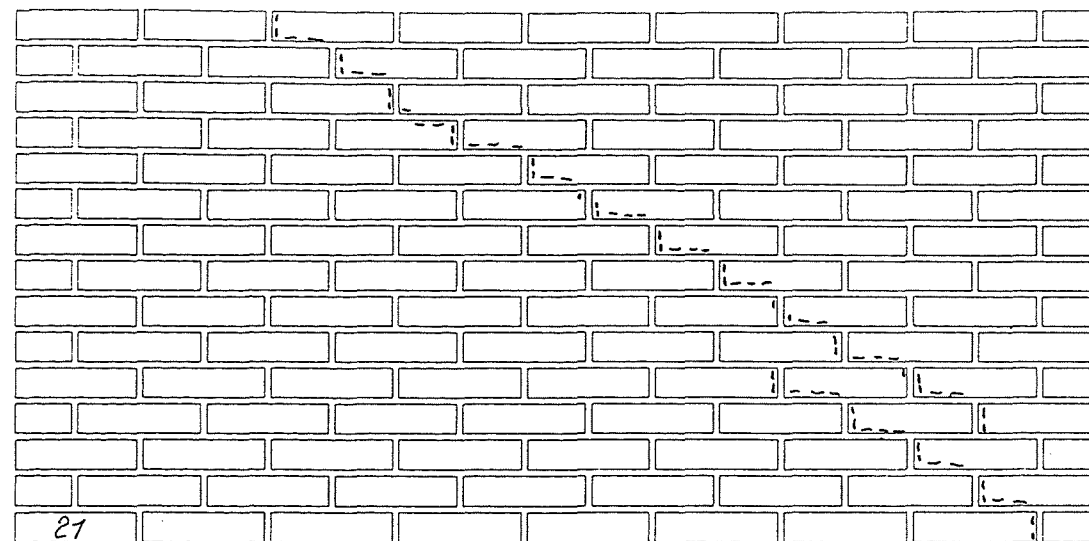


Mur 21
 Stentype D
 Mørteltype Kalkmørtel
 Forbandttype L1

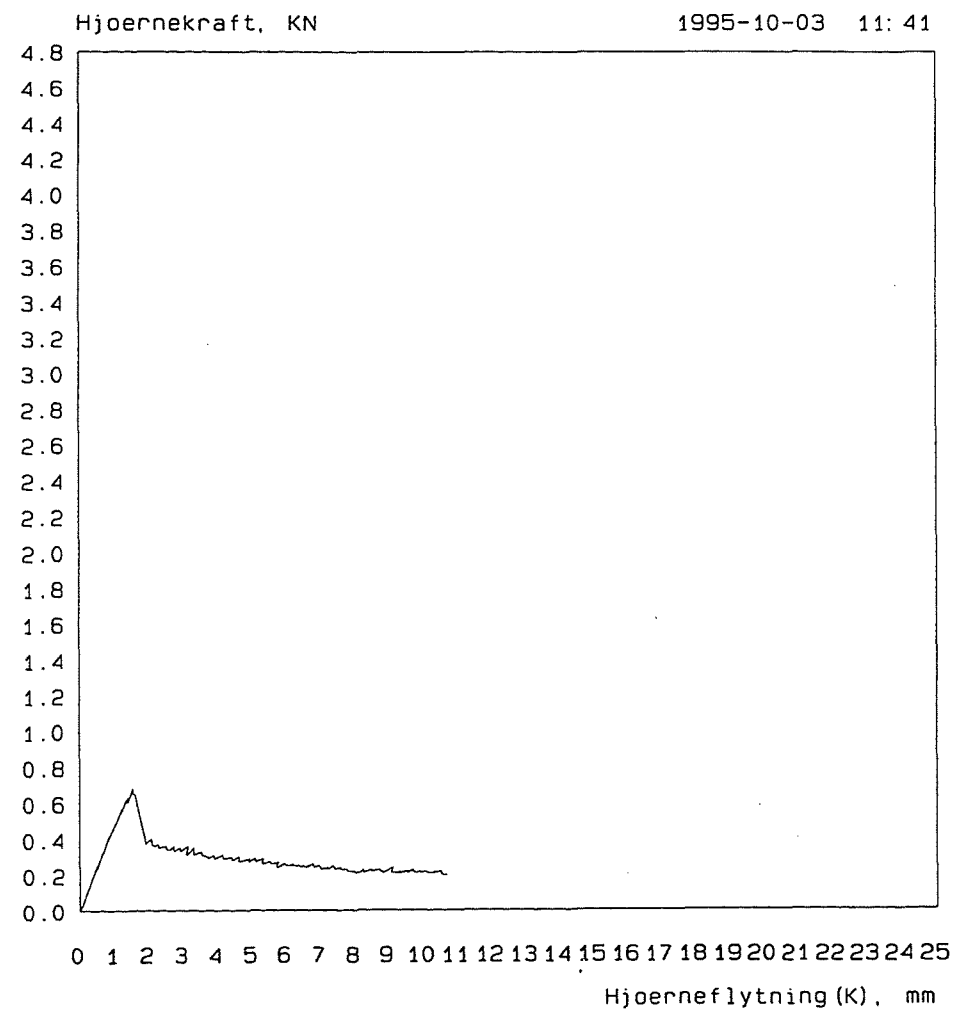
Kurvesignaturer



Brudbillede

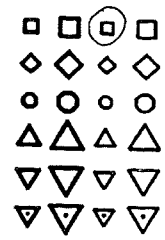


Arbejdslinie.

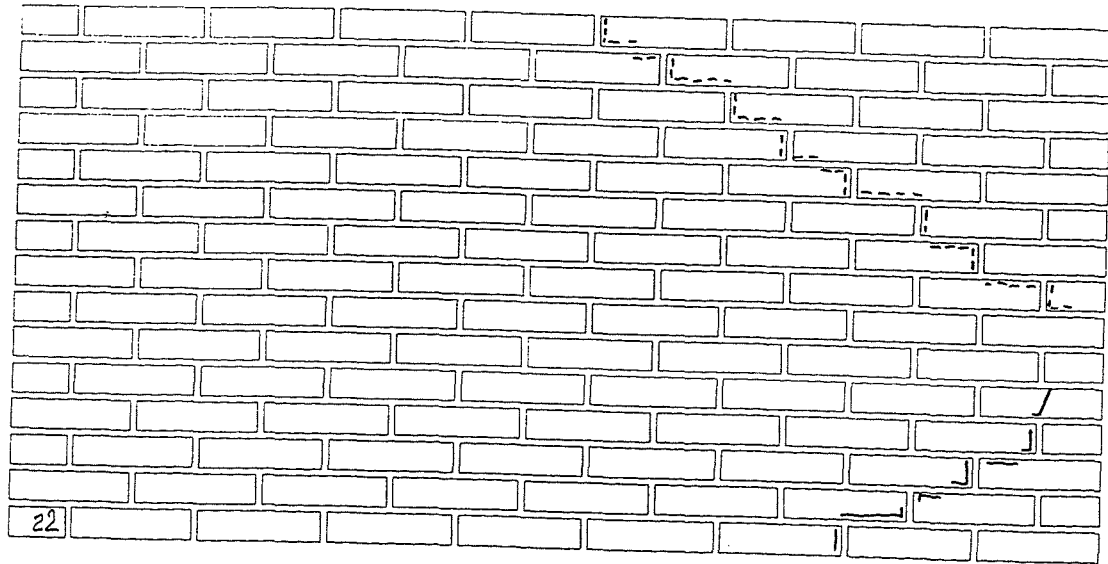


Mur 22
 Stentype A
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L1

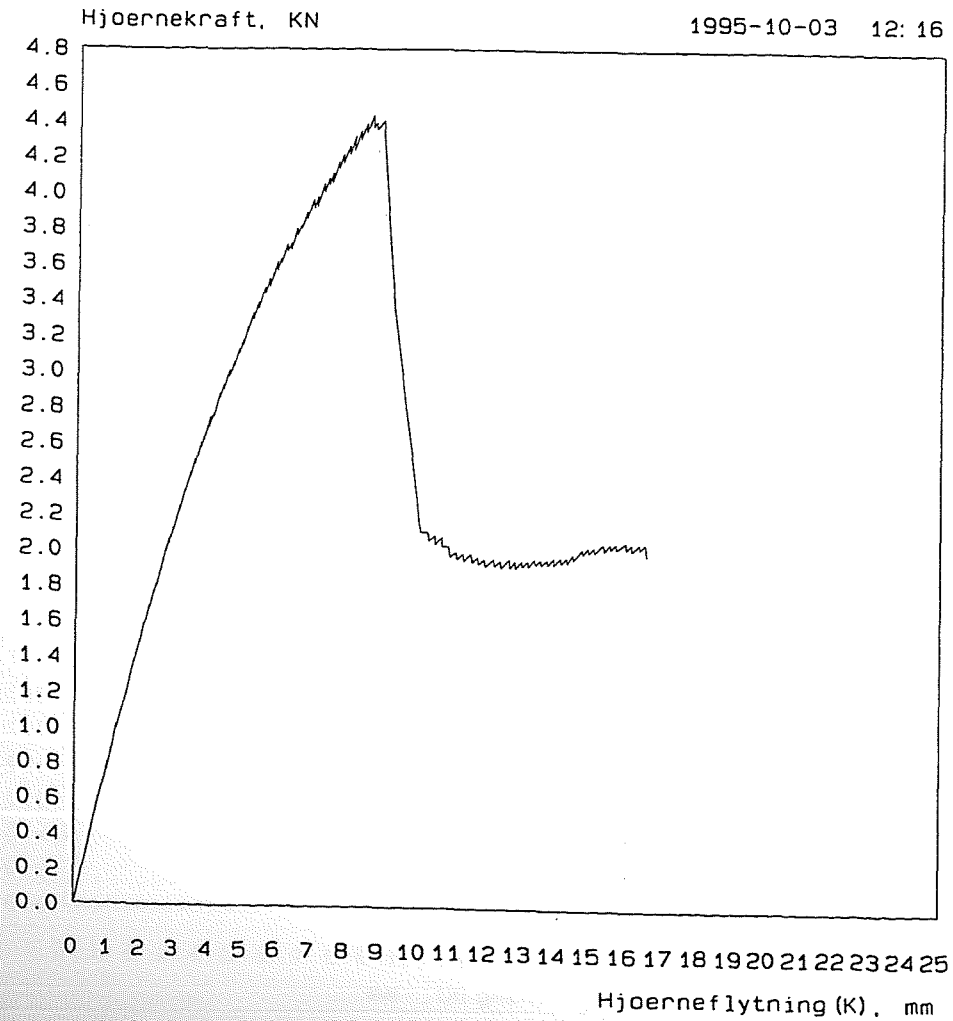
Kurvesignaturer



Brudbillede

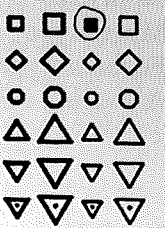


Arbejdslinie.

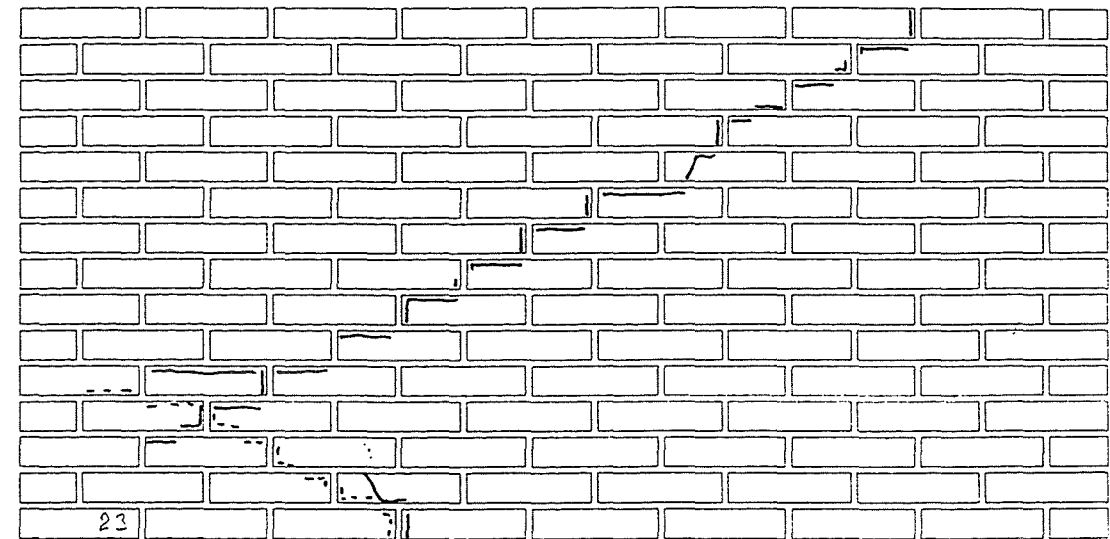


Mur 23
 Stentype A
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L1
 Armering i liggefugen

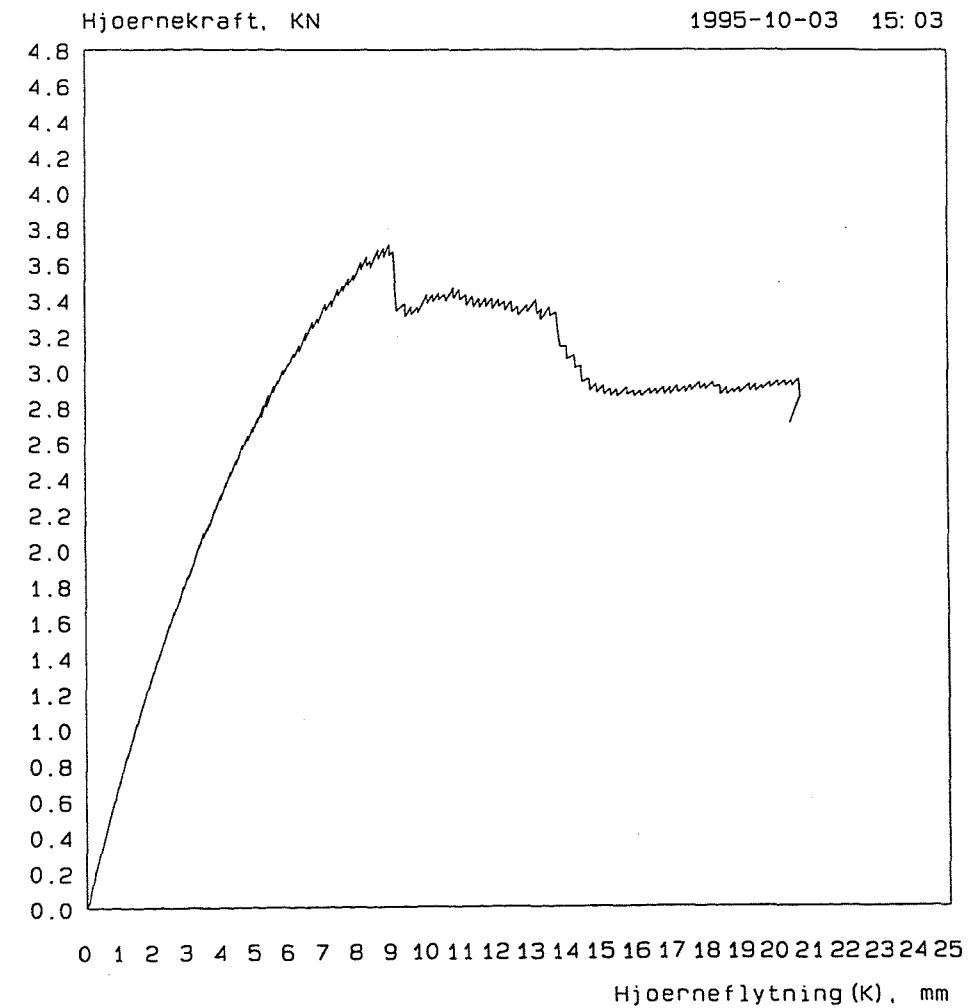
Kurvesignaturer



Brudbillede

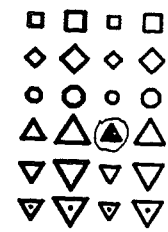


Arbejdslinie.

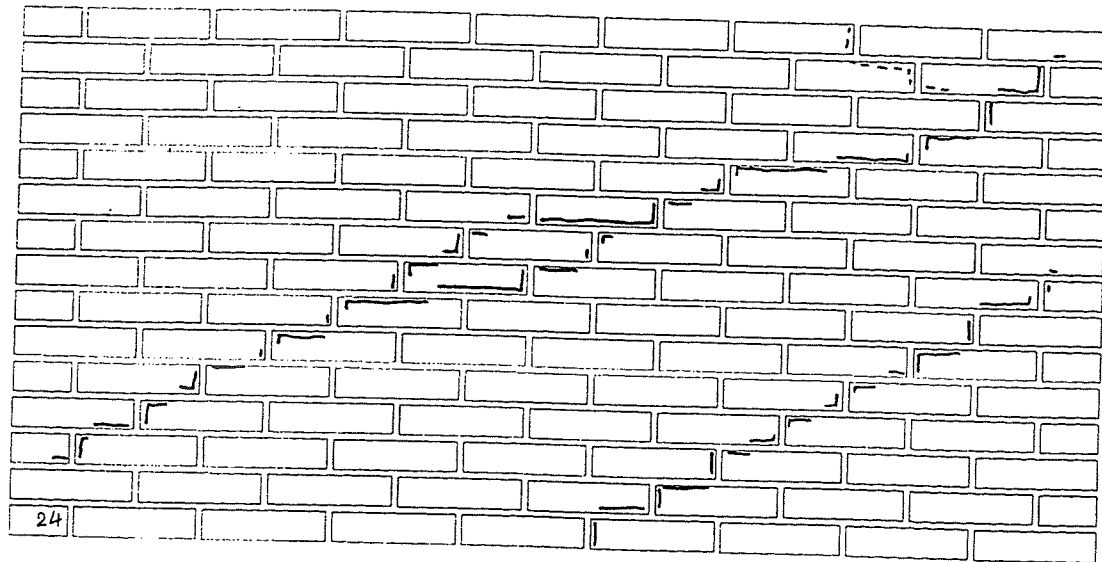


Mur 24
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L1
 Armering i liggefugen

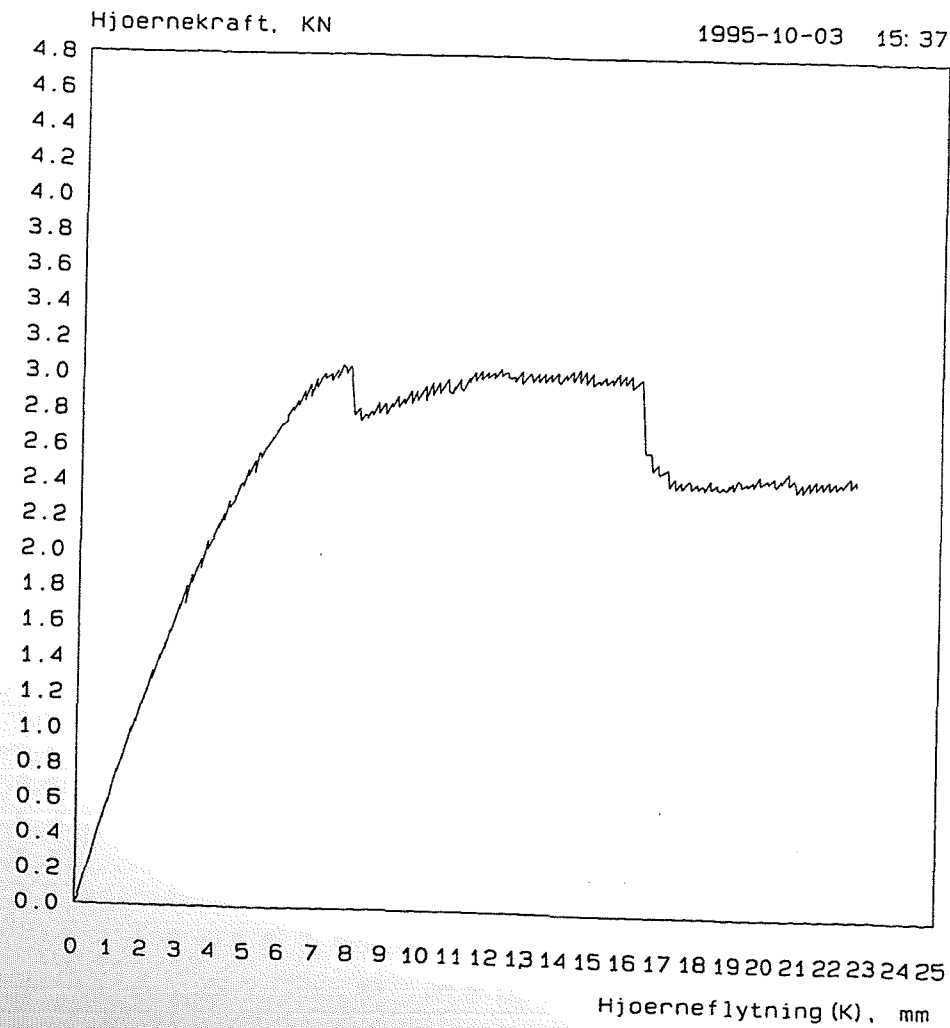
Kurvesignaturer



Brudbillede

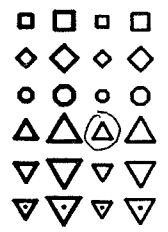


Arbejdslinie.

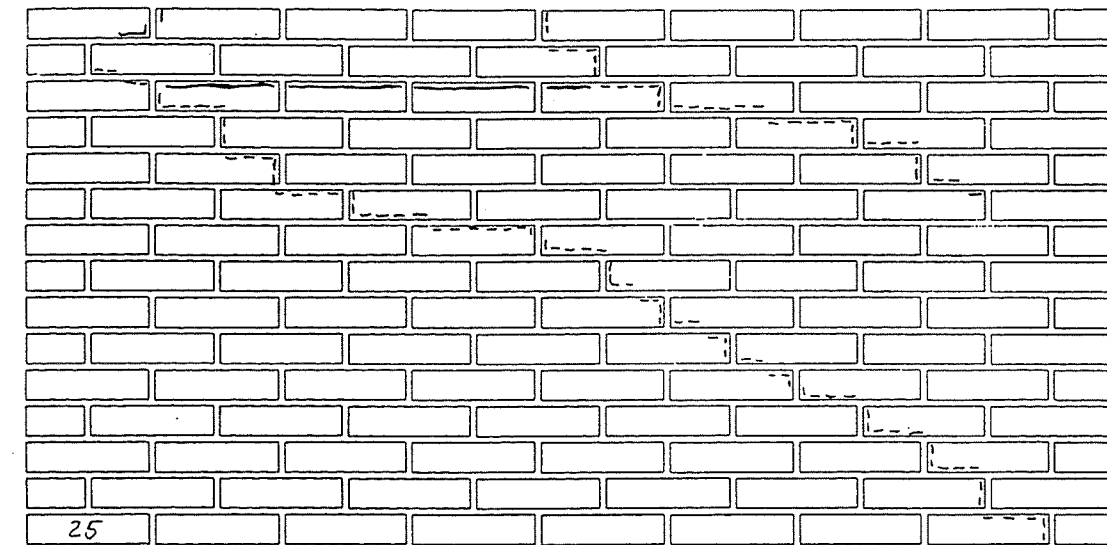


Mur 25
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L1

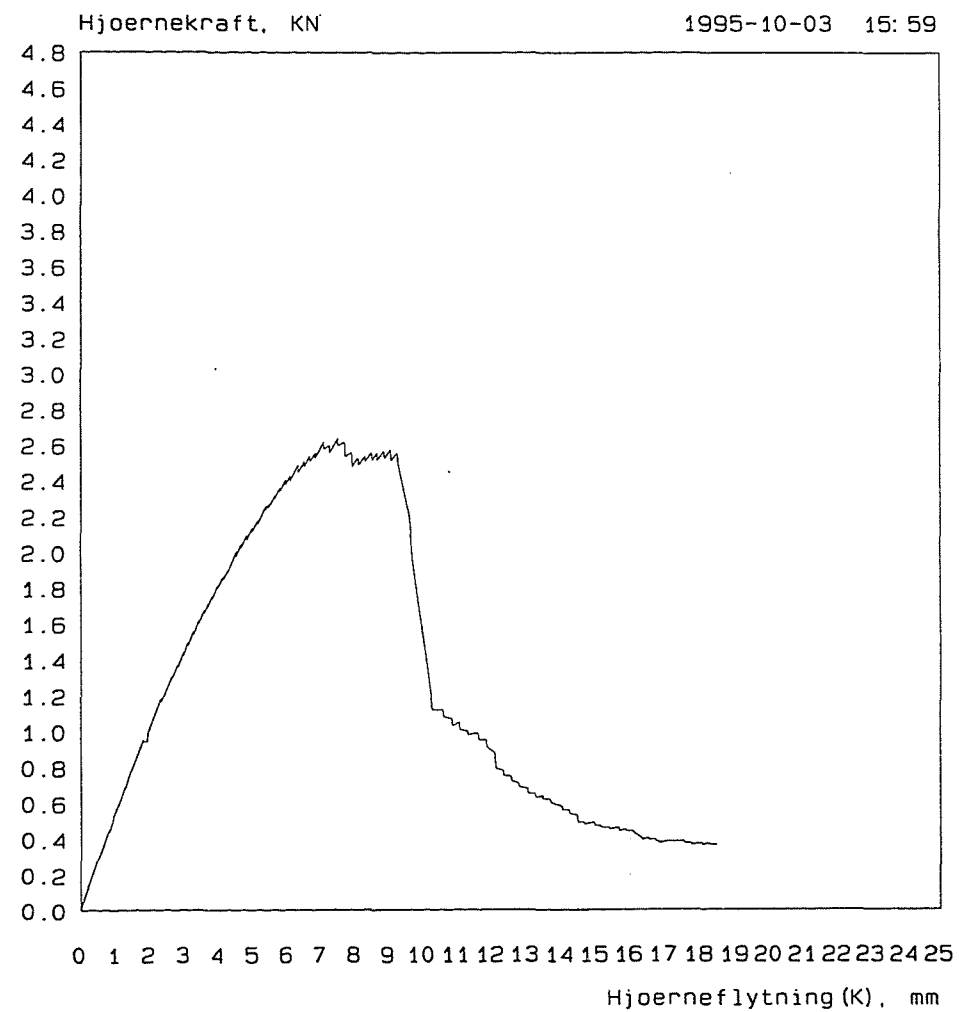
Kurvesignaturer



Brudbillede

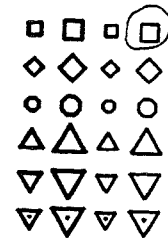


Arbejdslinie.

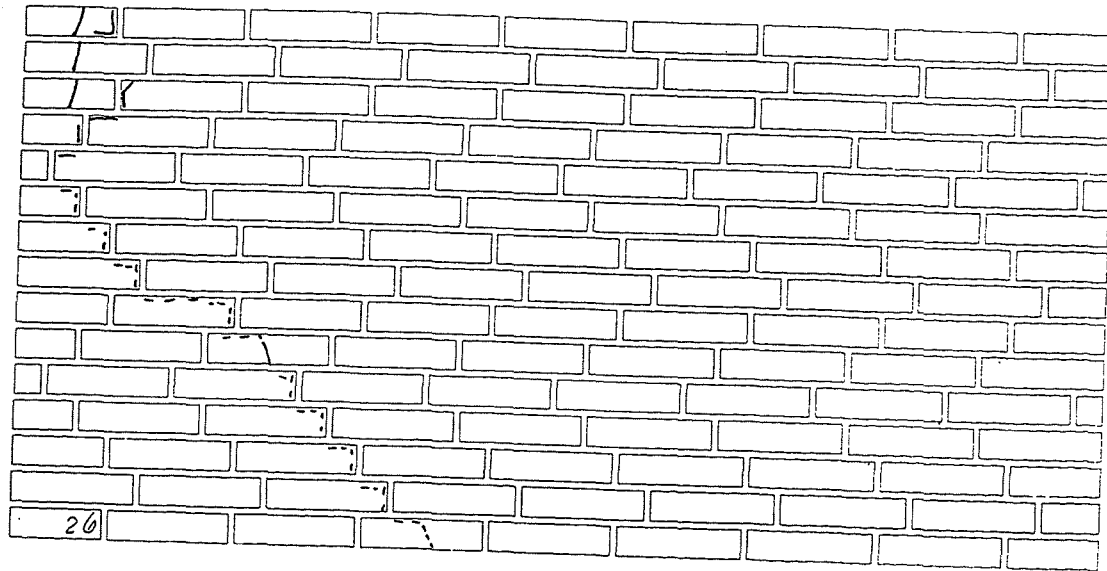


Mur 26
 Stentype A
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L4

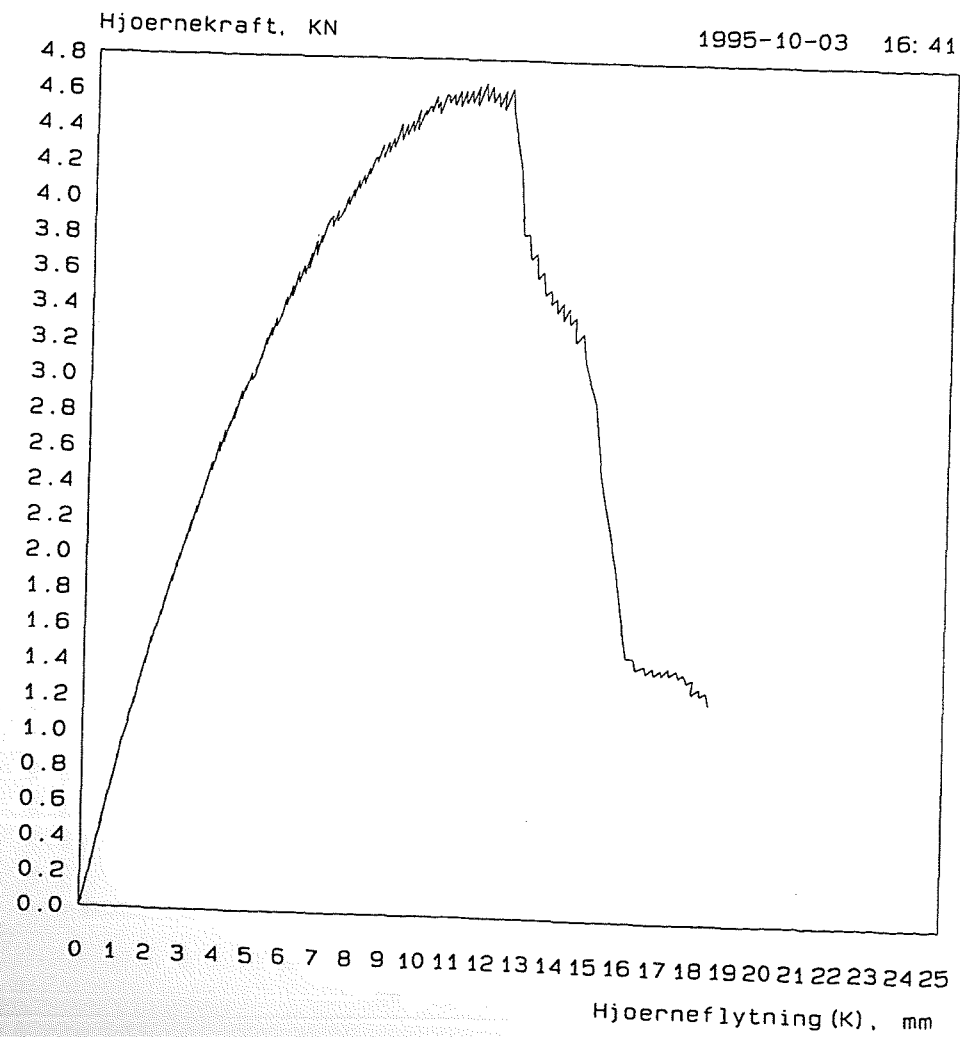
Kurvesignaturer



Brudbillede

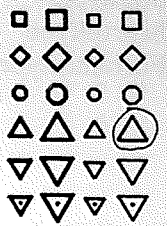


Arbejdslinie.

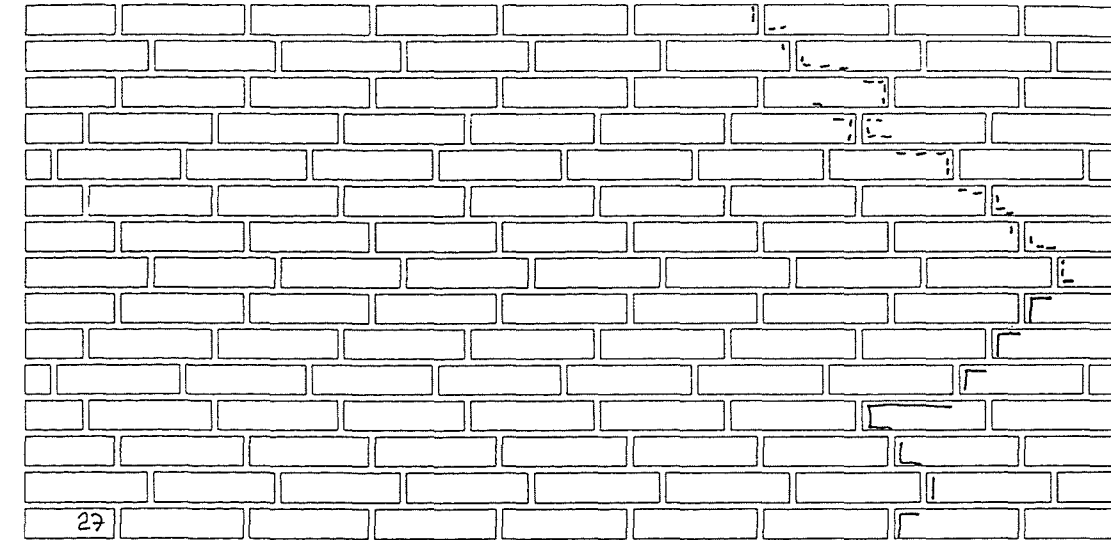


Mur 27
 Stentype D
 Mørteltype KC 35/65/650
 Forbandttype L4

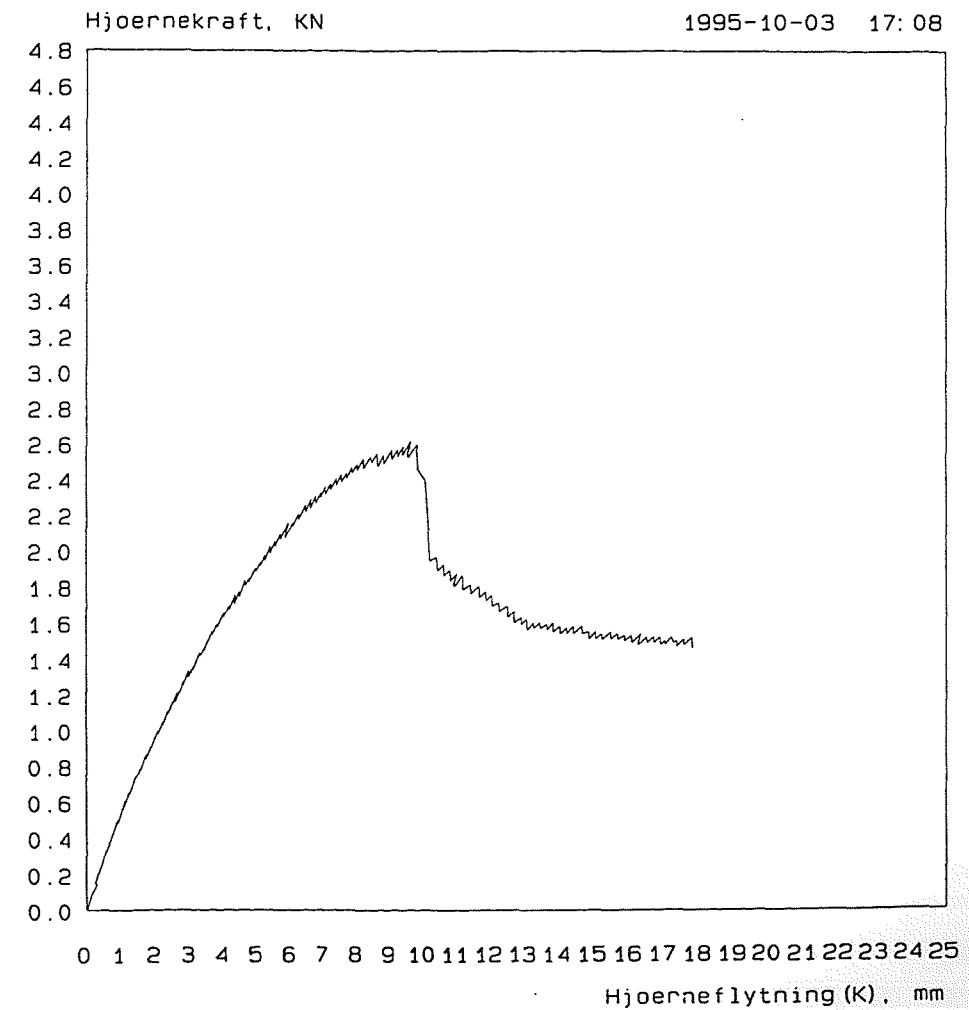
Kurvesignaturer



Brudbillede

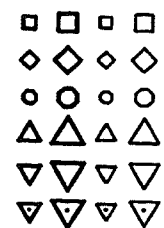


Arbejdslinie.

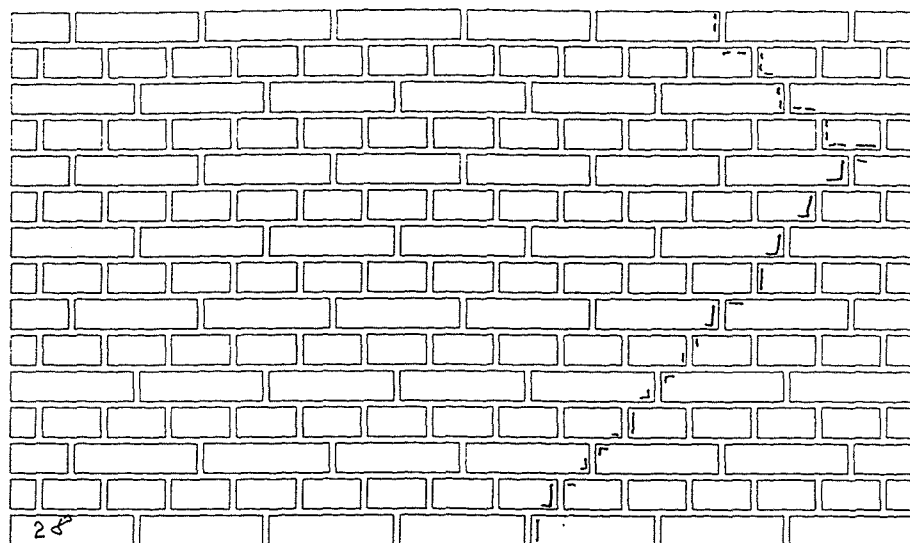


Mur 28
 Stentype B
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype Krydsforbandt

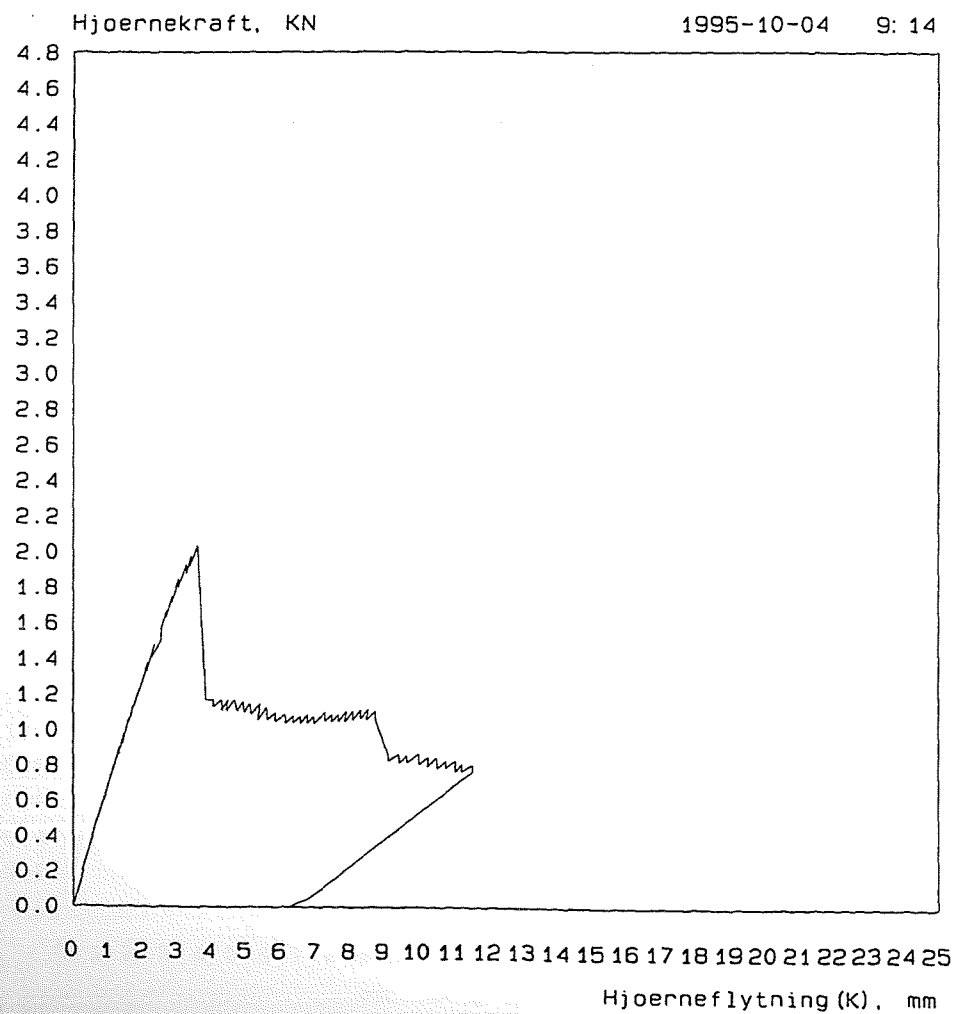
Kurvesignaturer



Brudbillede

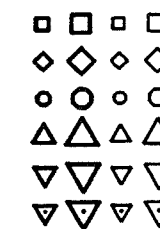


Arbejdslinie.

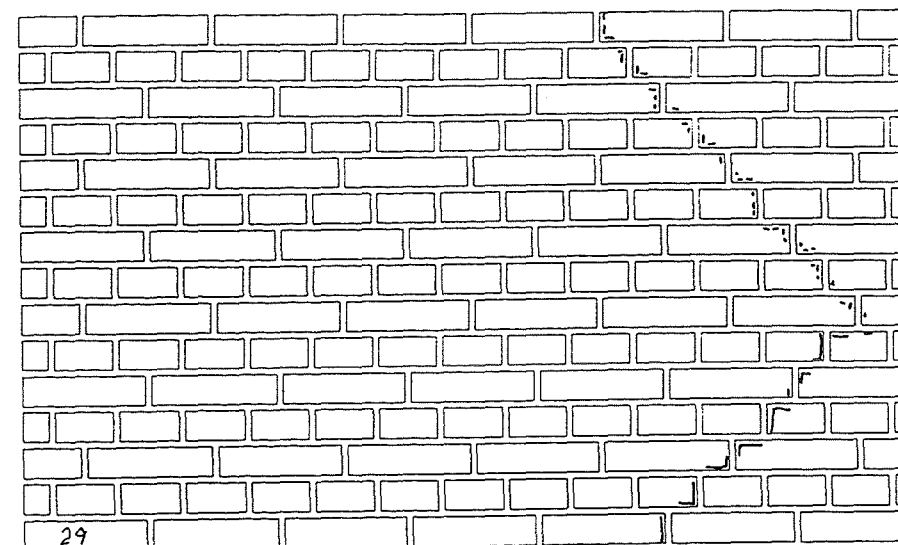


Mur 29
 Stentype A
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype Krydsforbandt

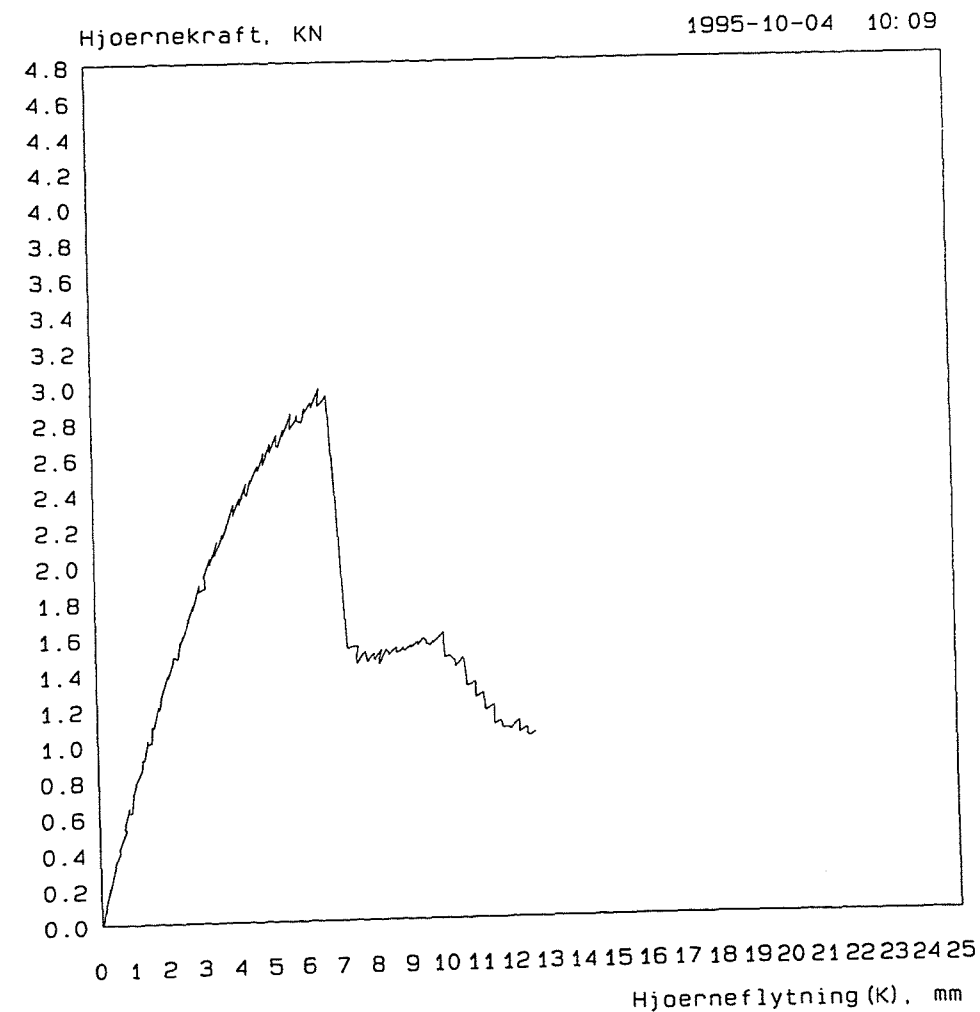
Kurvesignaturer



Brudbillede

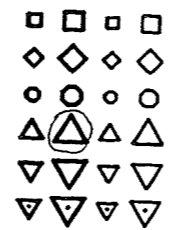


Arbejdslinie.

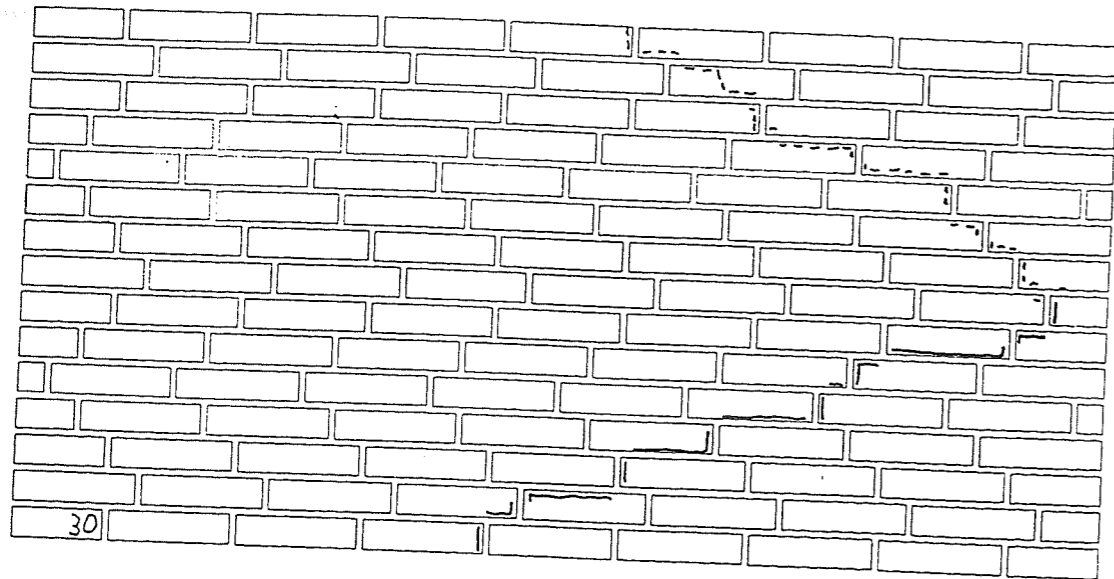


Mur 30
 Stentype D
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L4

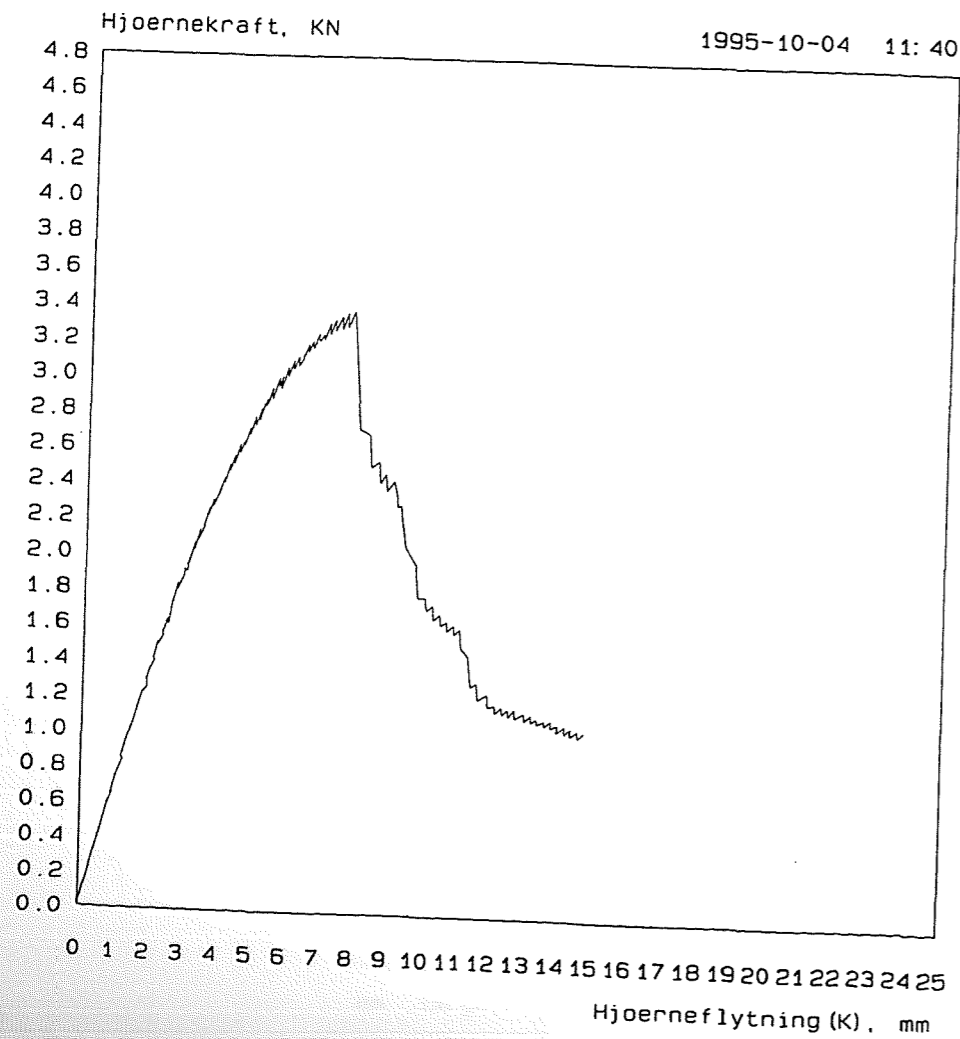
Kurvesignaturer



Brudbillede

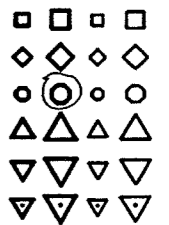


Arbejdslinie.

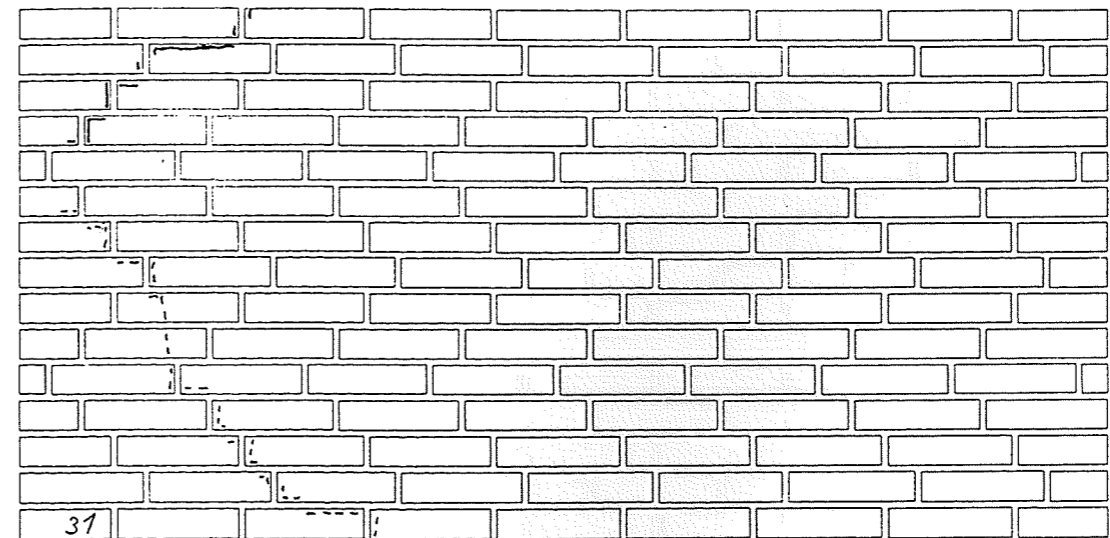


Mur 31
 Stentype C
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L4

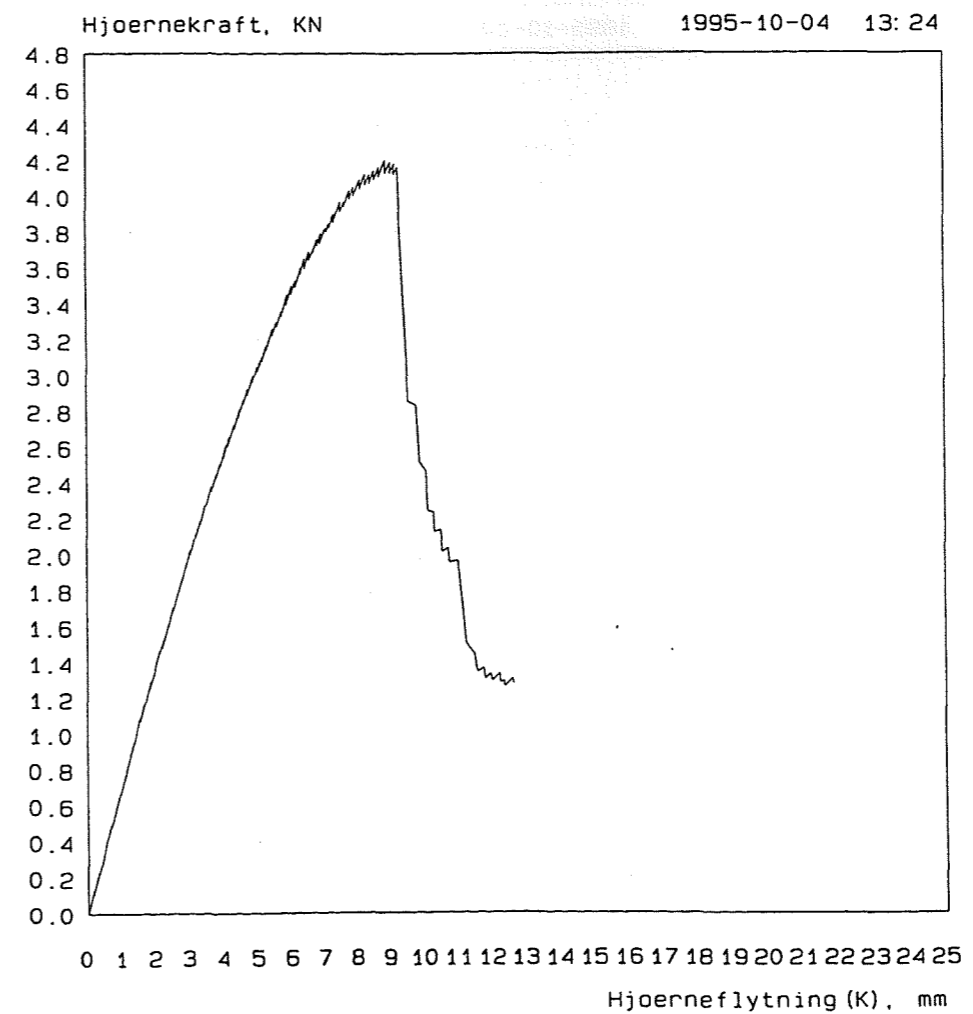
Kurvesignaturer



Brudbillede

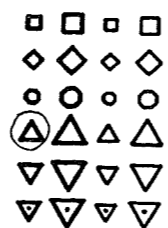


Arbejdslinie.

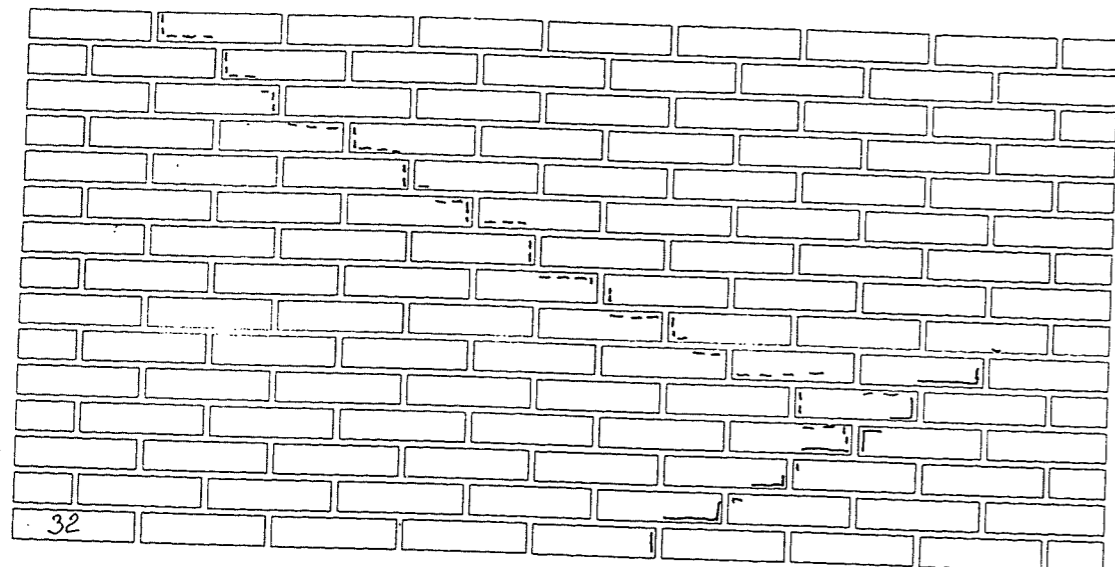


Mur 32
 Stentype D
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L1

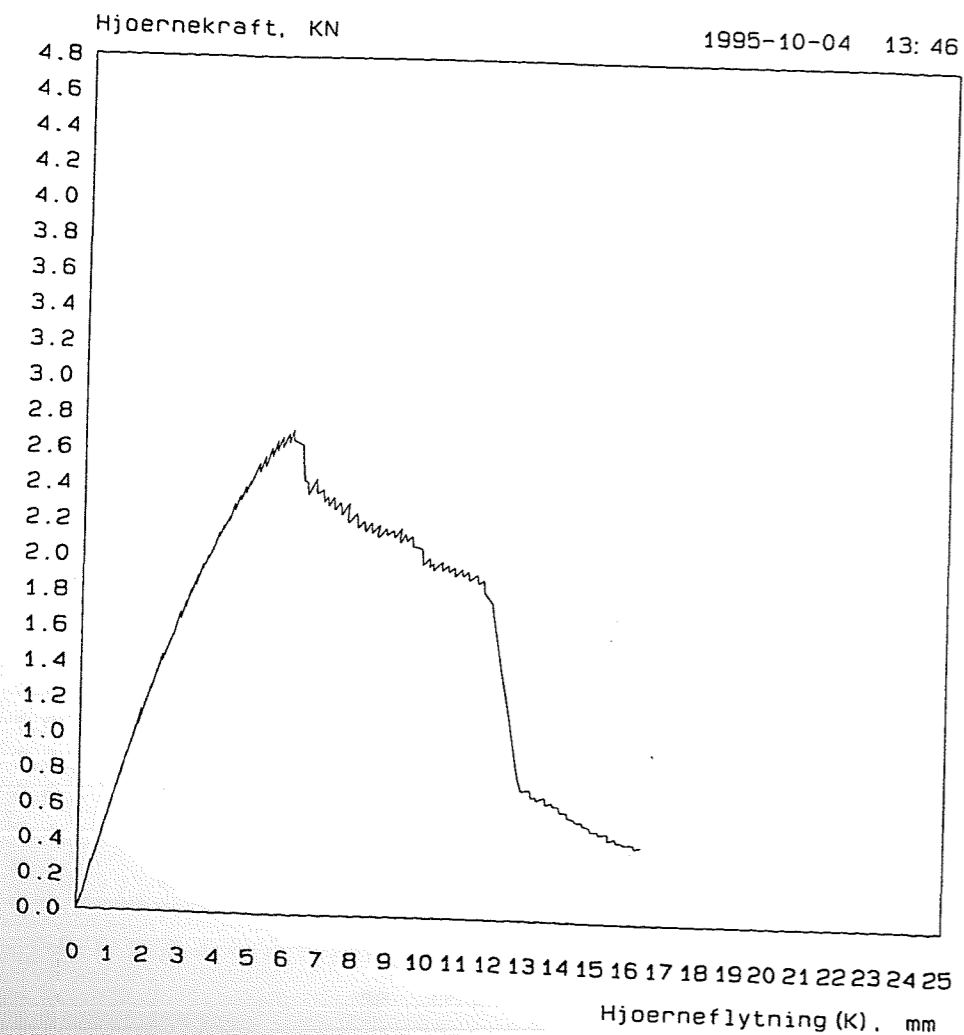
Kurvesignaturer



Brudbillede

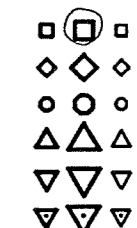


Arbejdslinie.

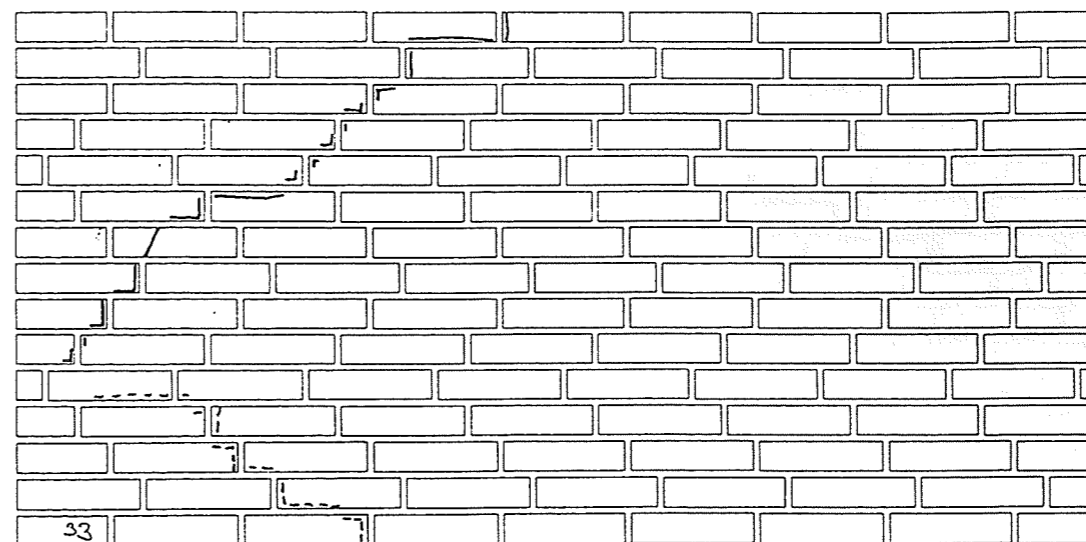


Mur 33
 Stentype A
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L4

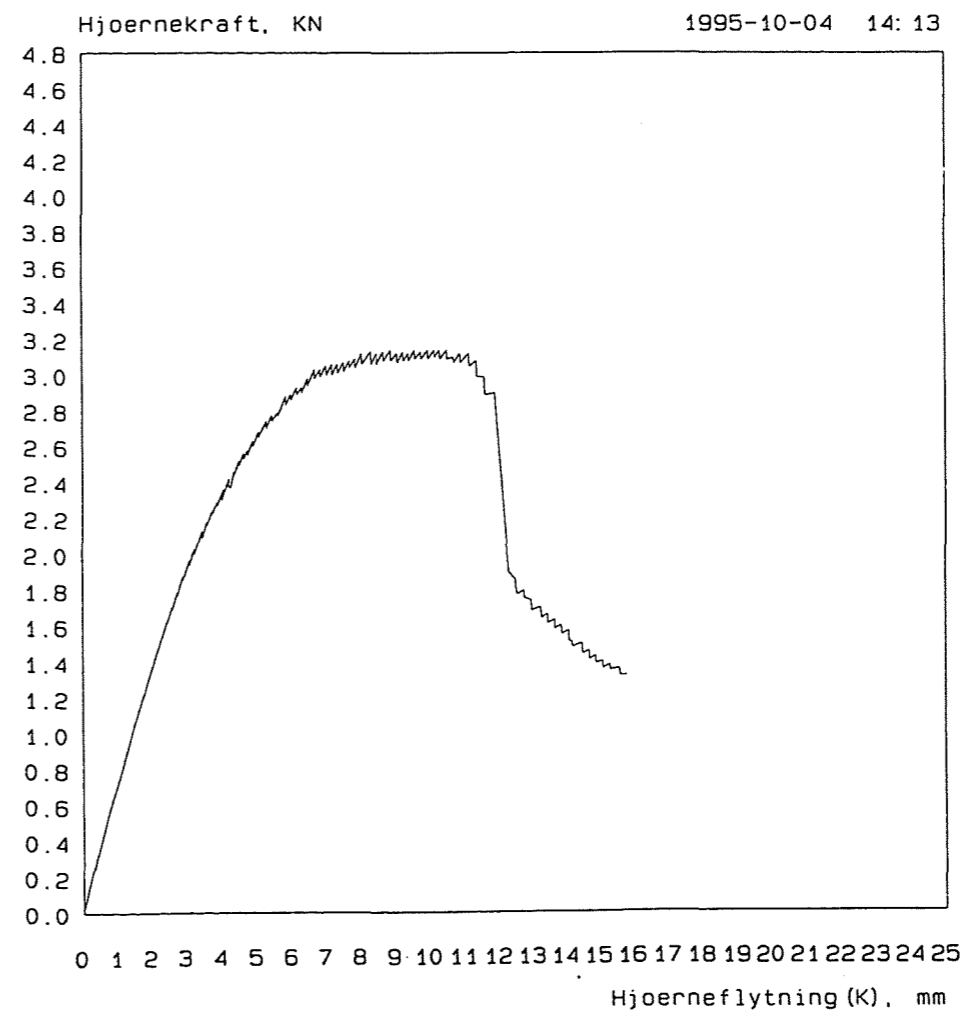
Kurvesignaturer



Brudbillede

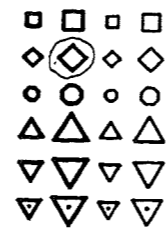


Arbejdslinie.

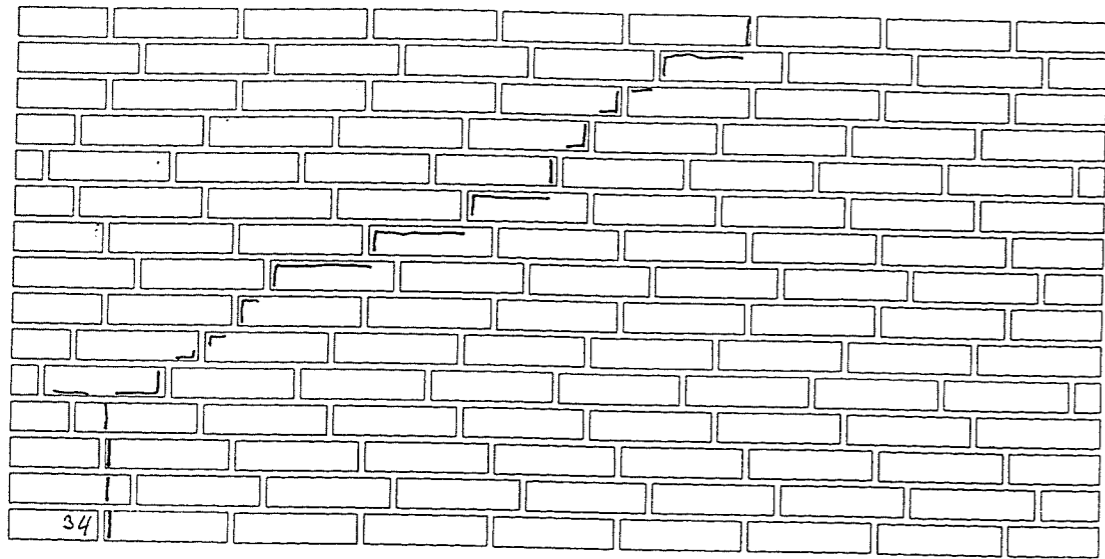


Mur 34
 Stentype B
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L4

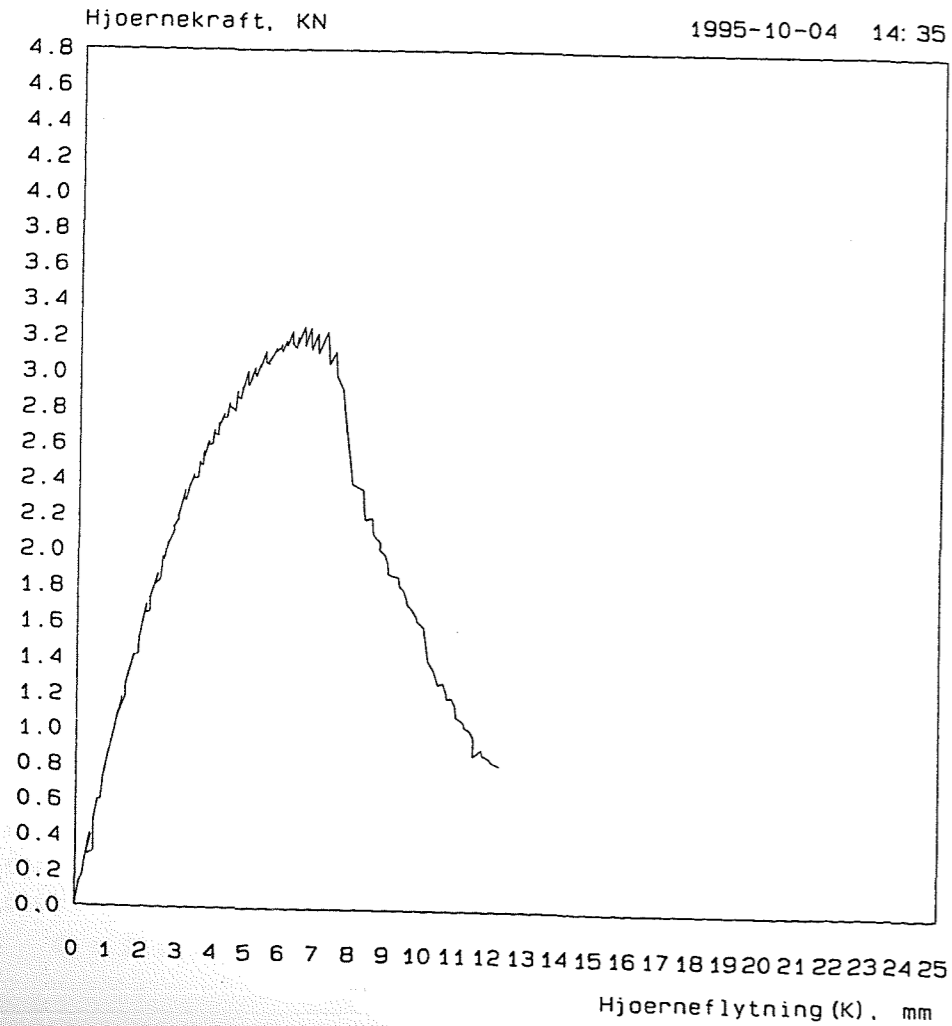
Kurvesignaturer



Brudbillede

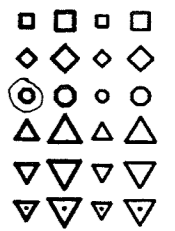


Arbejdslinie.

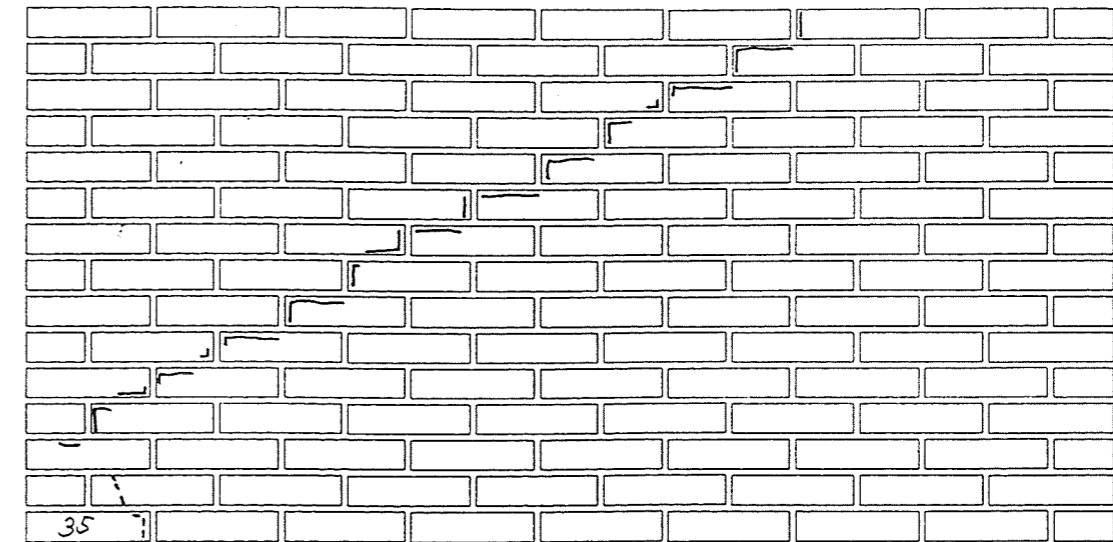


Mur 35
 Stentype C
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L1

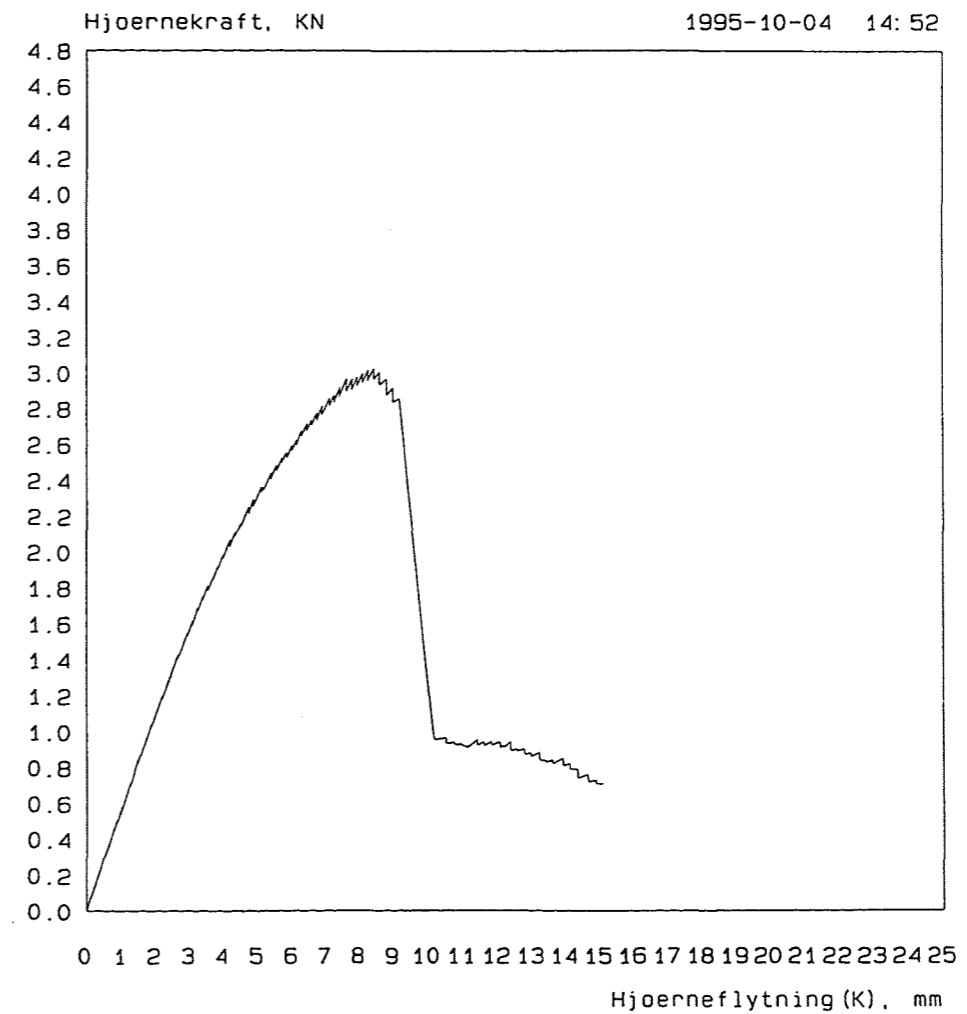
Kurvesignaturer



Brudbillede

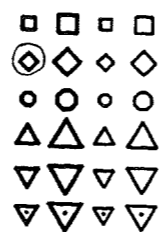


Arbejdslinie.

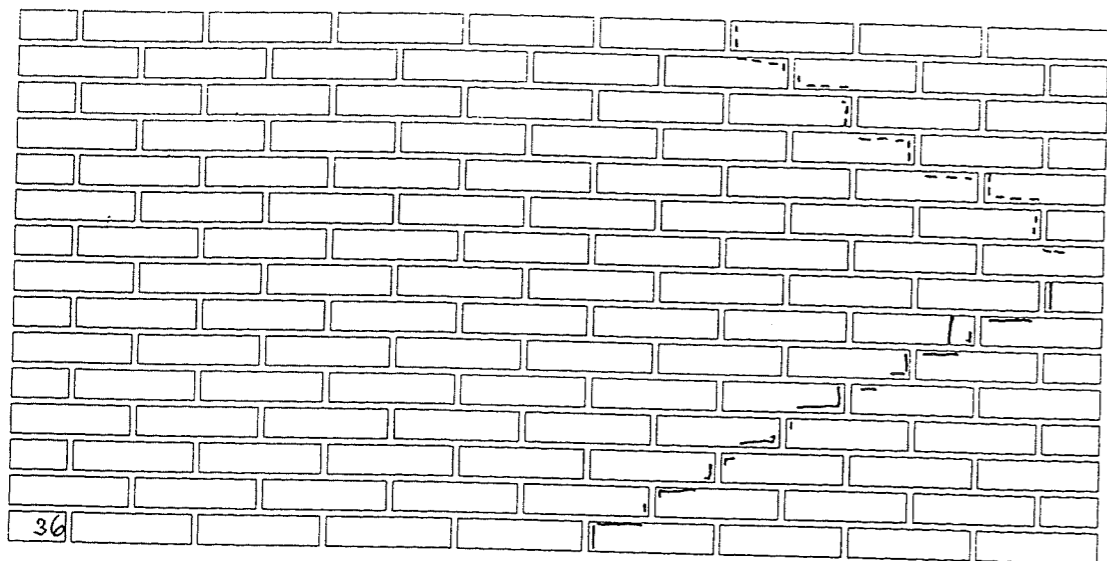


Mur 36
 Stentype B
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L1

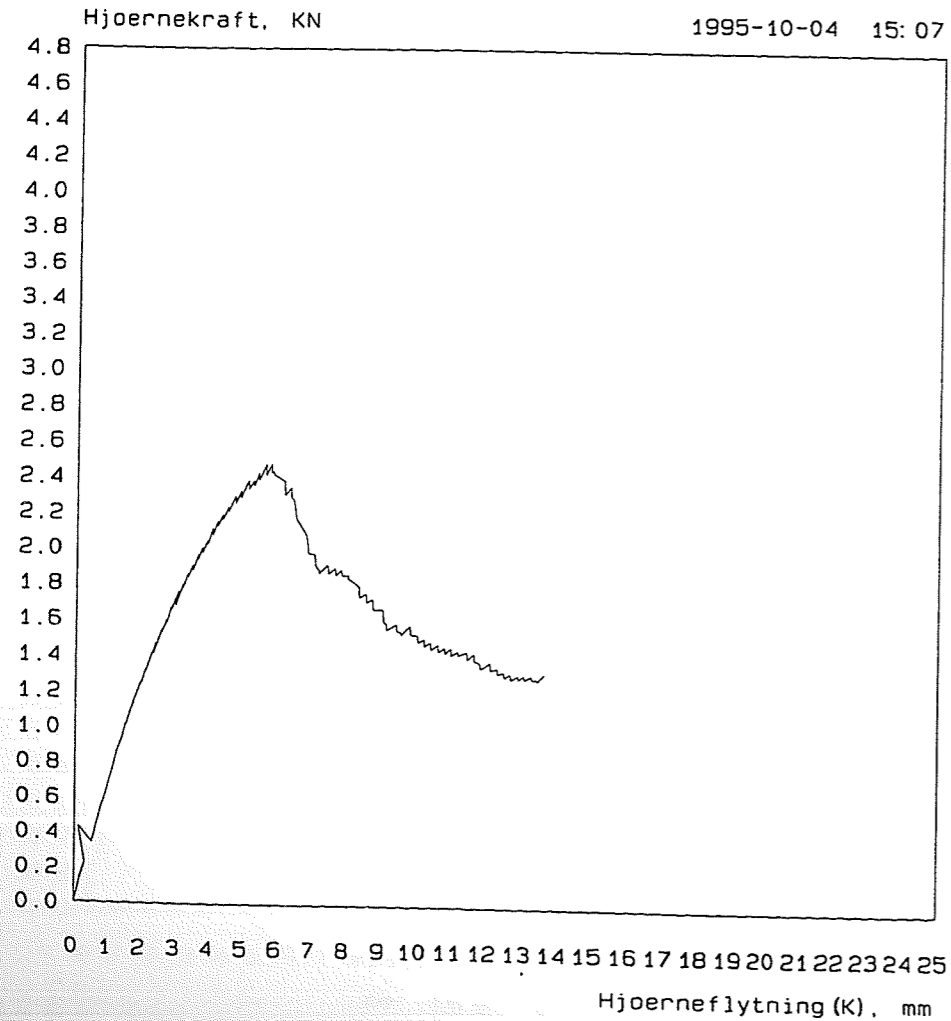
Kurvesignaturer



Brudbillede

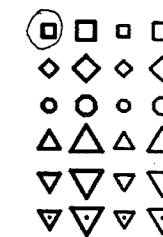


Arbejdslinie.

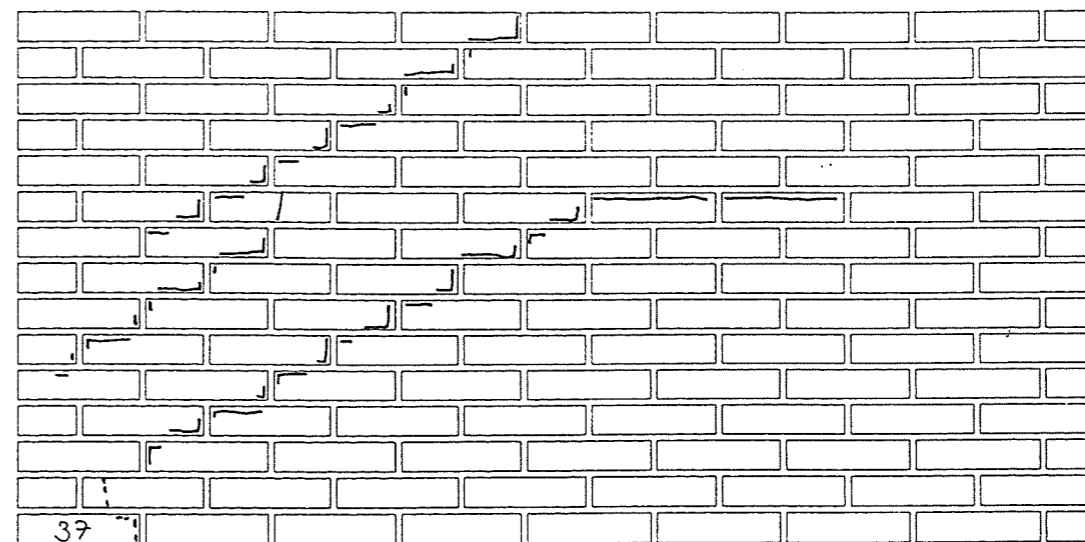


Mur 37
 Stentype A
 Mørteltype KC 60/40/850
 Forbandttype L1

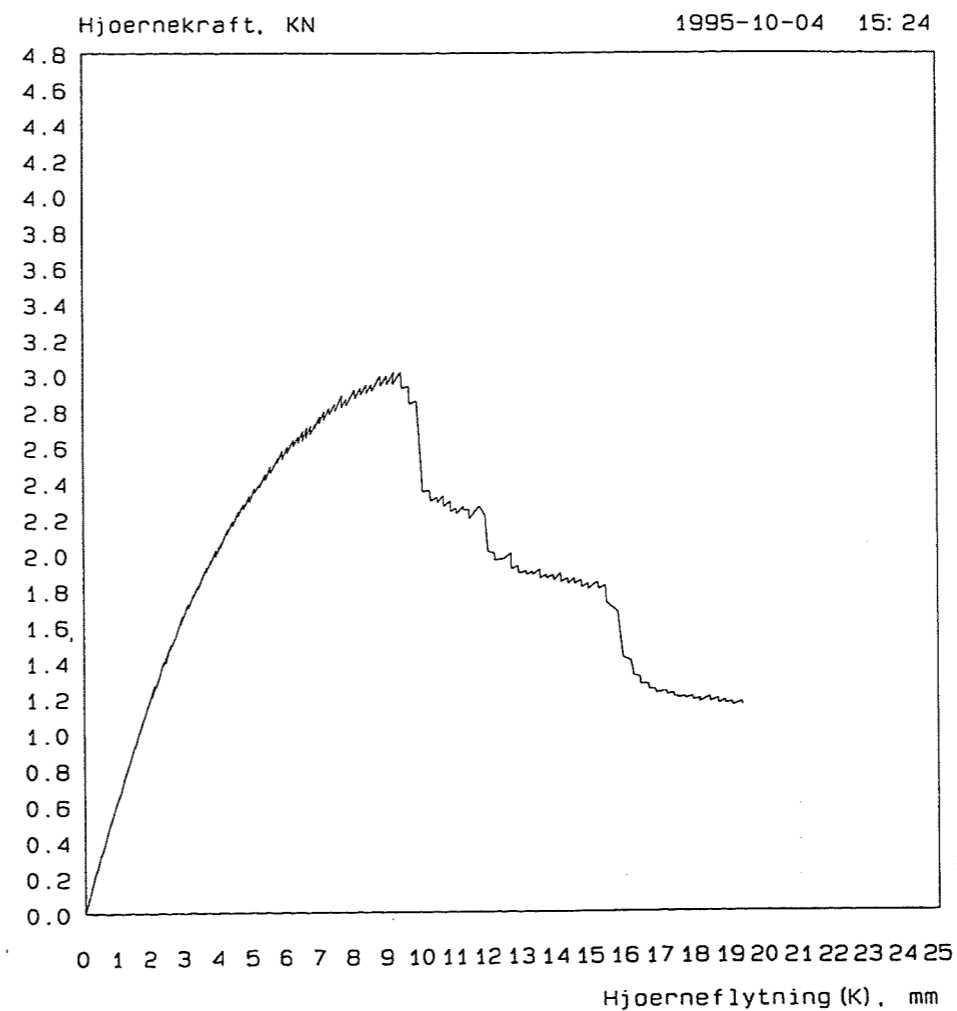
Kurvesignaturer



Brudbillede

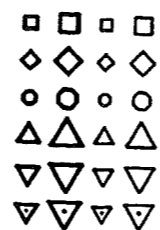


Arbejdslinie.

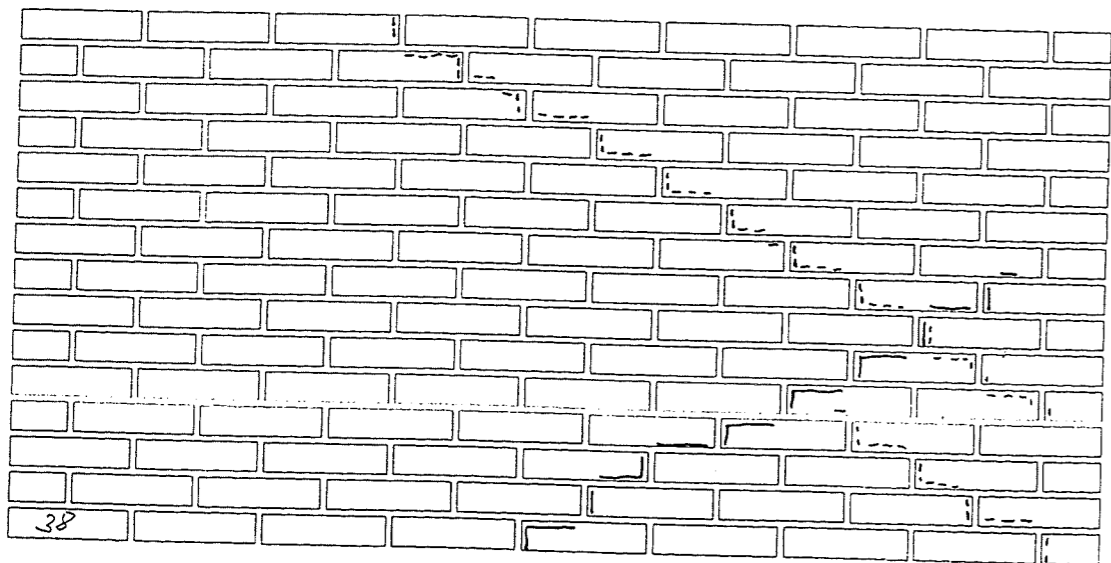


Mur 38
 Stentype D
 Mørteltype Kalkmørtel
 Forbandttype L1

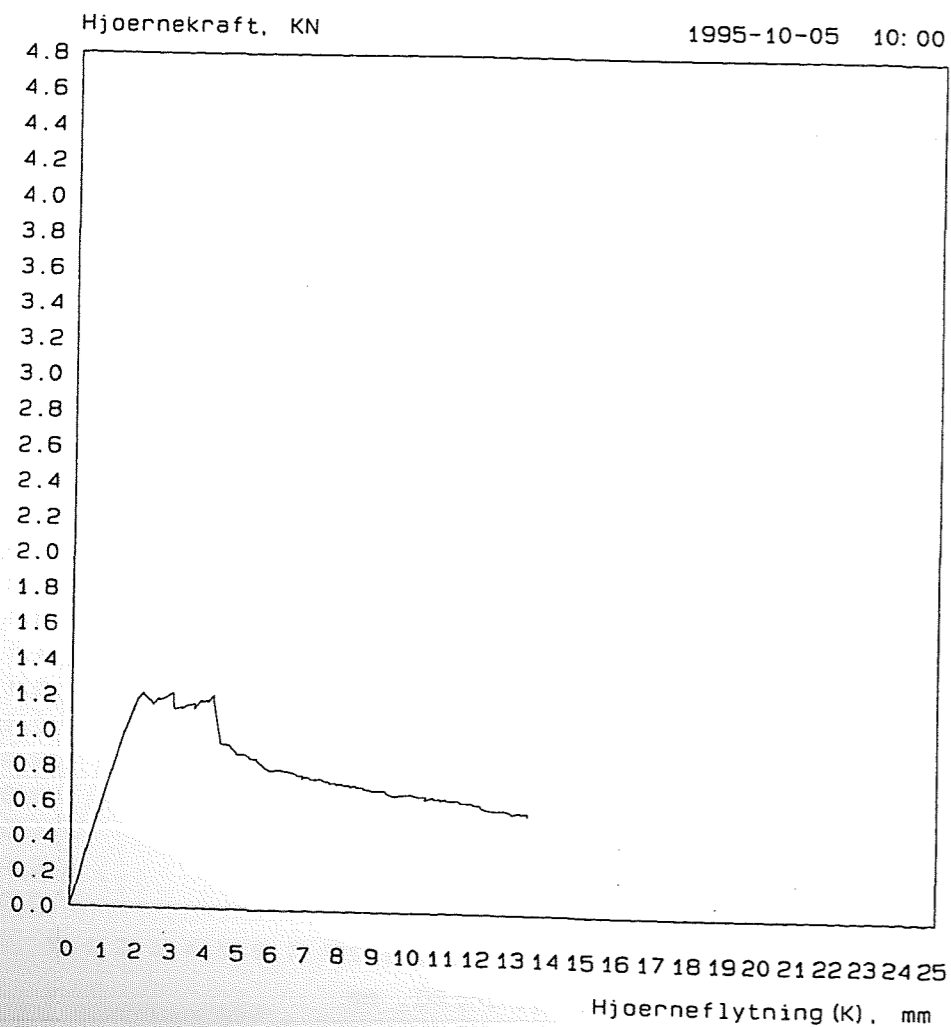
Kurvesignaturer



Brudbillede

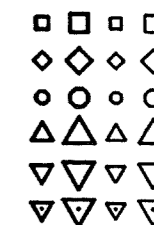


Arbejdslinie.

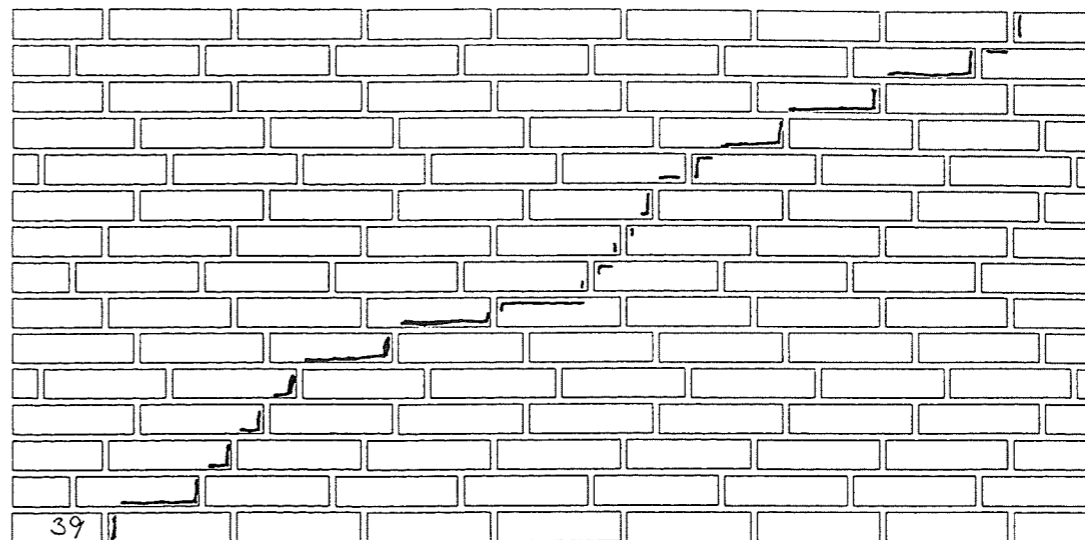


Mur 39
 Stentype D
 Mørteltype Kalkmørtel
 Forbandttype L4

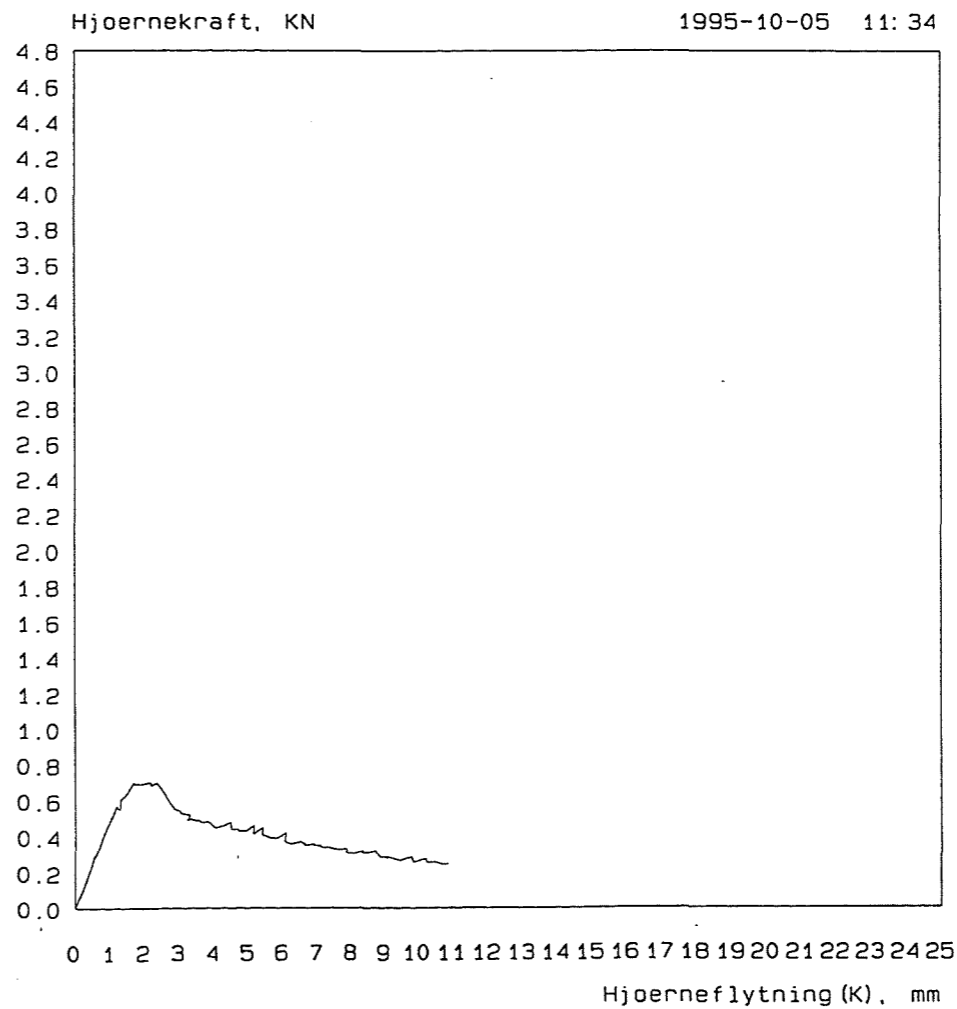
Kurvesignaturer



Brudbillede

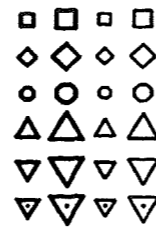


Arbejdslinie.

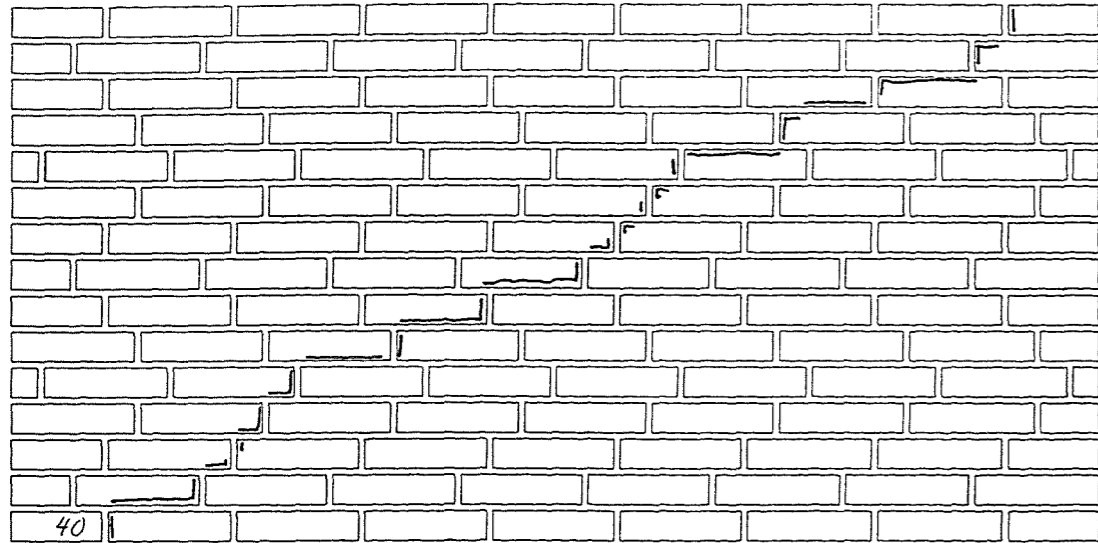


Mur 40
 Stentype D
 Mørteltype Kalkmørtel
 Forbandttype L4

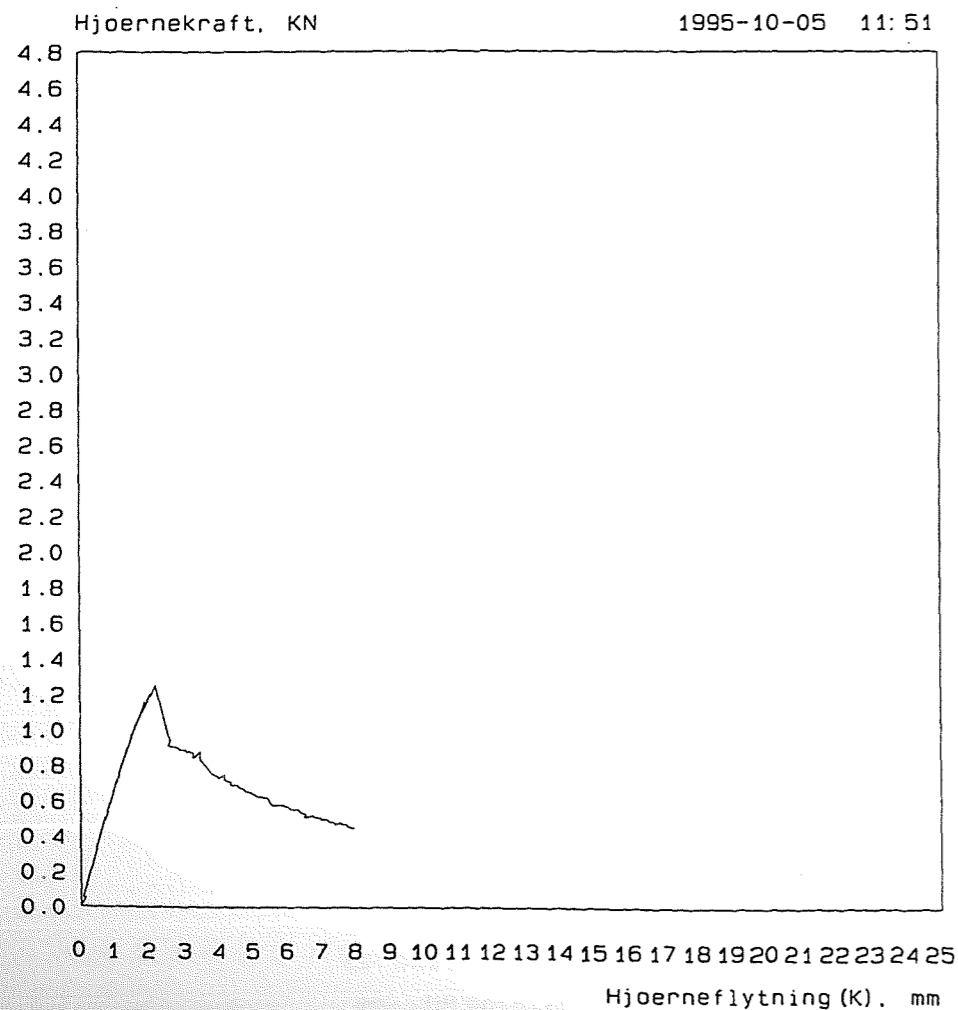
Kurvesignaturer



Brudbillede



Arbejdslinie.

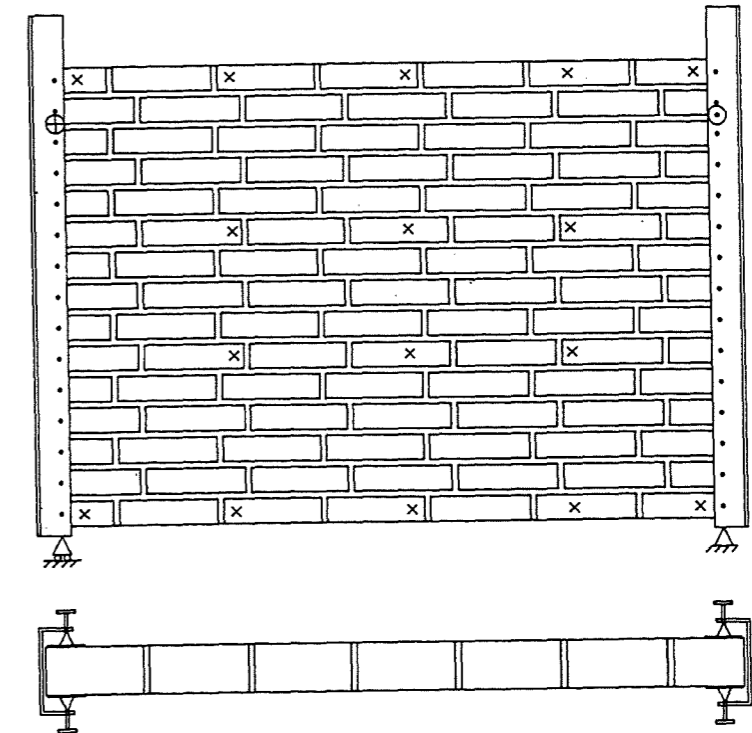


Summary

SBI Report 274: Strength and deformation capacity of laterally loaded masonry

The report describes an experimental investigation of the bending properties of masonry with bending around axes which are oblique in relation to the direction of the bed joints.

40 tests were carried out on vertical masonry walls with a dimension of approx. 1 x 2 sq.m. using a so-called 4-point plate bending. The test specimens were supported at three corners and the load was applied at the fourth one. On the two sides perpendicular to the bed joints the test specimens were provided with a reinforcement in the form of a u-profile to the effect that a failure in the test specimen was forced to occur from one free non-strengthened edge to another. The reinforcements ensure that the edges during the test remain straight and that tensile strains in the direction of the edge are kept at a minimum.



The tests were carried out under deformation control. The parameters investigated were as follows:

- the type of brick
- the type of mortar
- the type of bond (geometry of the bond)
- with and without bed joint reinforcement.

The 40 tests cover a relatively wide range of different type of masonry so that it is possible to get a picture of the factors of importance to the bending properties of masonry.

The tests include three different types of mortar, a pure lime mortar and two different lime-cement mortars KC 60/40/850 and KC 35/65/650. (K = lime, C = cement).

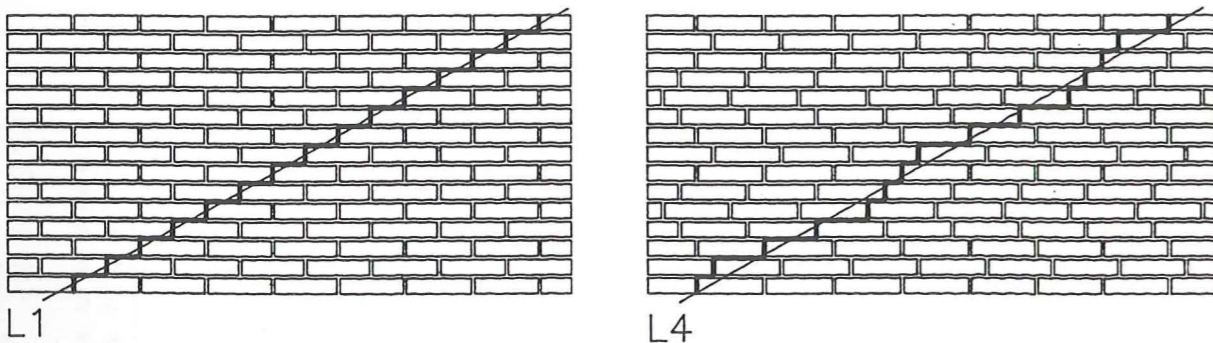
It is noteworthy that the two lime-cement mortars resulted in almost the same bending strength for the masonry, the pure mortar strength for KC 35/65/650 being 2,5 - 3 times higher than for KC 60/40/850. The lime mortar resulted in a considerably lower bending strength. Besides that the pure mortar strength is considerably lower, the result is due to the fact that the mortar in the joints had only been cured 1 - 3 cm into the joint at the time of the test. (Pure lime mortar joints are not cured thoroughly until after several years).

In the test specimens where KC 60/40/850 were used, the failure took place for the most part in the mortar or in the interface between the bricks and the mortar whereas the failure in the test specimens built with KC 35/65/650 produced more cracks in the bricks.

These facts lead to the conclusion that as far as walls built with ordinary Danish bricks are concerned, the optimal (balanced) mortar strength as to bending strength around oblique axes, is the one corresponding to KC 60/40/850 which results in a failure which takes place primarily as cracks in the mortar. Stronger mortar does not give substantially higher bending strengths, but causes more cracks in the bricks in the ultimate limit state.

The tests have been carried out with four different types of bricks, the strongest one having a compressive strength of 46 MPa and the weakest one a compressive strength of 26 MPa. It was therefore to be expected that the above conclusion could be modified depending on the type of brick. On the basis at hand, this is not possible because the number of tests is not sufficient, but more so because the brick compression strength is not a good indicator for the tensile strength of brick which is the relevant parameter in this context.

The main part of the test specimens is made with one of the bond types shown.



From a simple geometric consideration regarding the distance of the cracked joints to the rotational axes shown in the figure, it is to be expected that bond type L4 will result in the highest bending strength if the cracks occur in the mortar only. As far as the test specimens built with KC 35/65/650 are concerned the two bond types L1 and L4 resulted in the same bending strength, but as to the weak lime-cement mortar KC 60/40/850, all bending strengths for the test specimens built

with the L4 bond superseded all the bending strengths for the test specimens built with the L1 bond.

The previous conclusion can thus be modified as follows:

For walls built with ordinary Danish bricks the optimal mortar strength, as far as the bending strength around oblique axes is concerned, is the one which corresponds to KC 60/40/850. The use of KC 60/40/850 entails that the cracks in the failure state primarily take place in the mortar as the use of stronger mortar does not lead to higher bending strengths if a suitable bond has been selected, but leads only to the occurrence of more cracks in the brick. As to less favourable types of bonds, the strong mortar gives a 0 - 20% higher bending strength than does the weak one.

Tests with joint reinforcement show that this reinforcement has no effect on the bending strength, but that it has a favourable effect on the deformation capacity at maximum load.

The load versus deflection curve of the two test specimens with reinforcement in the bed joints shows plastic properties so favourable that full interaction between oblique and vertical yield lines in walls with bed joint reinforcement can be expected, whereas it is uncertain whether the horizontal yield lines can work together as their plasticity do not increase when reinforcement is built into the bed joints.

With regard to the bending strength of masonry bent around oblique axes, the conclusion is that the yield moments measured around oblique axes, on an average, were twice the yield moments around oblique axes which can be determined according to the Danish masonry code (DS 414) using the guiding values for the tensile strengths in bending for bending in the bed joints and in the vertical joints. The tests confirm that the yield moments around oblique axes, which the application of the failure line theory indirectly presumes, may occur.

As the tests are deformation controlled, load versus deflection curves have been found which cover the range also after maximum load has been reached. The shape of these load versus deflection curves shows that the failure when bent around oblique axes has a limited plasticity. At the moment, however, it is not possible to say anything definite about whether this is sufficient to make the oblique yield lines work together fully with horizontal and vertical yield lines, even if it is presumed that the latter hold the same limited plasticity.

Consequently, it can be stated that if one wants to be more confident that the yield line theory can be applied on Danish masonry, tests with walls with realistic support conditions are necessary where all three types of yield lines have a possibility of working together. Such tests, which should be deformation controlled and instrumented so that the crack development can be followed, should be accompanied by further development of the theoretical modelling of masonry as described in [7].

Litteratur

- [1]: Homogenization Techniques for Composite Media. (Redigeret af E. Sanchez - Palencia og A. Zaoui) 1985, Springer-Verlag, Berlin.
- [2]: G.N. Ponde, J. Middleton, J.S. Lee og B. Kvalj. "Numerical simulation of cracking and collapse of masonry panels subject to lateral loading". Proceedings at the 10th international Brick and Block Masonry Conference, Calgary, Canada 1994. 107-116.
- [3]: Paulo B. Lourenco og Jan G. Rots. "Understanding the Behaviour of Shear walls: A Numerical Review". Proc. of the 10th Int. Brick/Block Masonry Conference, Calgary 1994. 11-20.
- [4]: Hamid R, Lotti og P. Benson Shing. "Interface Model Applied to Fracture of Masonry Structures". J. Struct. Engrg. ASCE, Vol 120, no. 1, Januar 1994, 63-80.
- [5]: W. Samarasinghe og S.J. Lawrence. "Behaviour of Masonry under Combined Torsion and Compression". Proc. of the 10th Int. Brick/Block Masonry Conference, Calgary 1994, 1057-1067.
- [6]: Rune Brincker. "Murede vægges tværbæreevne". Afdelingen for Bærende konstruktioner. DTH. Rapport nr. 111, 1979.
- [7]: Finn R. Gottfredsen. "Laterally loaded Masonry", Ph.D. Thesis. Statens Byggeforskningsinstitut, 1996.
- [8]: Mogens Buhelt. "Tværbelastede murfelter". Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-rapport 158, 1984.
- [9]: B.P. Sinha og Chee Liang Ng. "Behaviour of Brickwork Panels under Lateral pressure". Proc. of the 10th int. Brick/Block Masonry Conference, Calgary 1994. 649-658.
- [10]: Poul Christiansen. "Bøjningstrækstyrker, Fase 3". DTI-Byggeri, Murværkscentret. 1995.
- [11]: Tegl 24. "Nye styrker for murværk". DTI-Byggeri. Murværkscentret. 1996.
- [12]: E. A. Lord og C. Wilson. "The Mathematical Description of Shape and Form". 1984. Ellis Harwood Limited. Chichester. 189-190.
- [13] C. Falk. "Murstens træk-, bøjningstræk- og spaltstyrke". Kalk- og Teglværkslaboratoriet. 1980.

I denne SBI-rapport beskrives en forsøgsrække til bestemmelse af murværks egenskaber ved bøjning om akser, som er skrå i forhold til liggefugernes retning. Forsøgene viser, at de antagelser, Murværksnormen DS 414 benytter vedrørende murværks styrke ved bøjning om skrå akser, er en del på den sikre side. Forsøgene viser også, at for mure opmuret af gængse danske mursten er den optimale mørteltype KC 60/40/850, når det gælder bøjningsstyrken om skrå akser. Revnerne opstår her primært i mørtelfugerne. Det vises i rapporten, at anvendelse af stærkere mørteltyper ikke medfører væsentlig større bøjningsstyrker, men kun bevirker, at der dannes flere stenrevner i brudtilstanden. – Rapporten henvender sig især til normforfattere og forskere inden for murværk.

