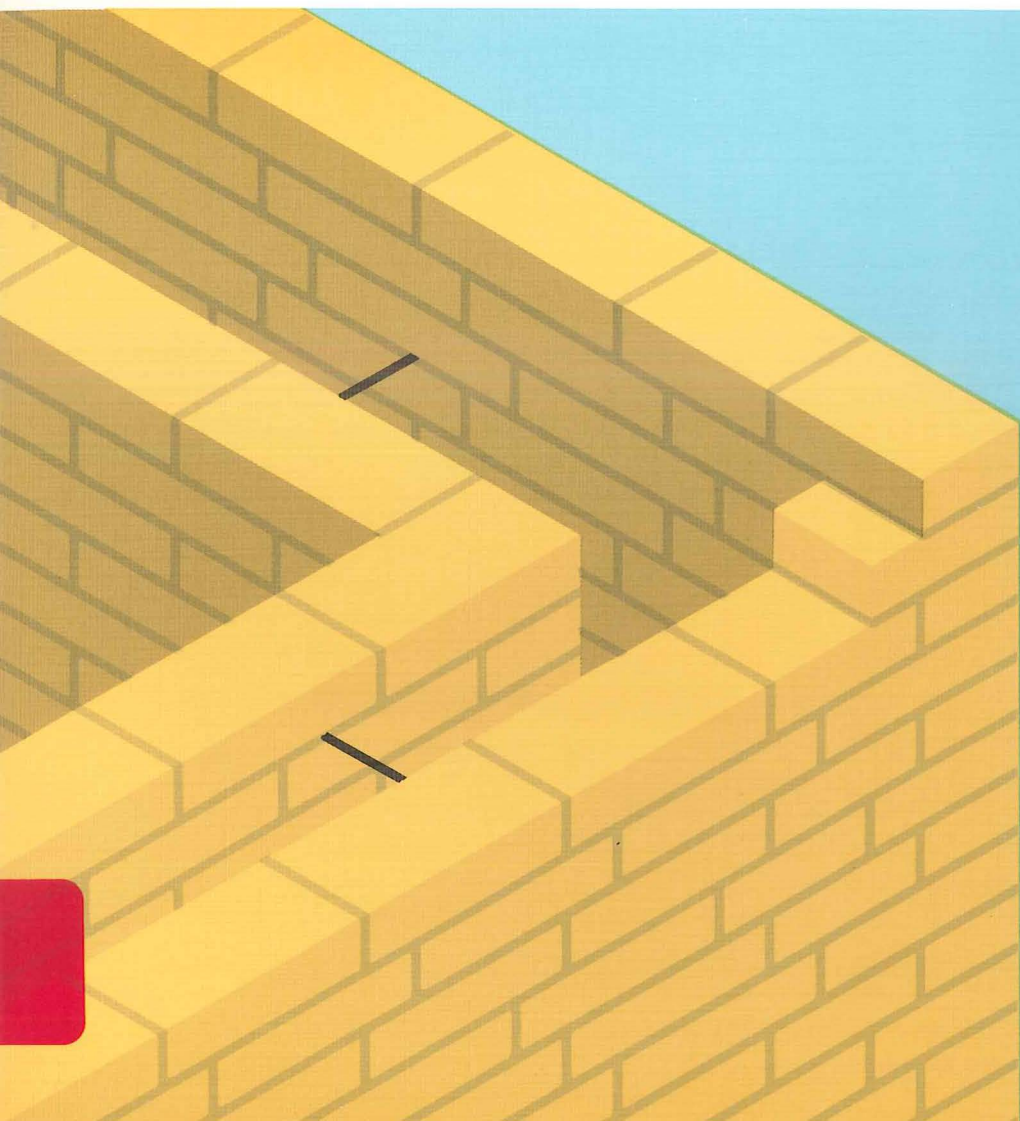


MURVÆRK



Materialer og egenskaber

SBI-RAPPORT 223 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1992



MURVÆRK

MATERIALER OG EGENSKABER

HENRY HØFFDING KNUTSSON

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

EX. 3
26 AUG. 1992

00 122 P



SBI-RAPPORT 223 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1992

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 og publikationskatalog 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 87-563-0814-0.

ISSN 0573-9985.

Pris: Kr. 110,00 inkl. 25 pct. moms.

Oplag: 1500.

Renskrivning: Inge Thoudahl Lundqvist.

Tegninger: Børge Holmen, Henning Holmsted, Annette Juul Muusfeldt, Dennis Brandbyge Pedersen og Thomas Pedersen.

Omslag: Henning Holmsted.

Tryk: Bjørvig Offset, Hvidovre.

Statens Byggeforskningsinstitut,
Postboks 119, 2970 Hørsholm.
Telefon: 42 86 55 33.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:
SBI-rapport 223: Murværk. Materialer og egenskaber. 1992.

Indhold

Forord	4
Indledning	5
Myndighedskrav	5
Dansk Ingeniørforenings normer for murværk	9
Byggesten	12
Materialer	12
Styrke	13
Formater	15
Frostfasthed	20
Densiteter	20
Vandoptagelse og minutsugning	20
Mørtel	22
Bindemidler	22
Tilslagsmateriale	24
Vand	26
Tilsætningsstoffer	26
Mørtelfremstilling	27
Mørtels egenskaber	32
Murværk	34
Murværks forbandt	34
Murværks længdeændringer	34
Murværks holdbarhed	38
Byggestenenes indflydelse på murværkets styrke	40
Mørtelfugernes indflydelse på murværket	41
Murværks styrkeegenskaber	43
Basisstyrker	44
Arbejdslinien for tryk	53
Forskydningsstyrke	63
Litteratur	67
Stikordsregister	70
Summary	72

Forord

Denne SBI-rapport indeholder en beskrivelse af murstens, blokkes, mørtels og murværks vigtigste egenskaber.

Rapporten er blandt andet baseret på de forsøg, der blev udført i forbindelse med udarbejdelsen af 3. udgave af den danske norm for murværkskonstruktioner, Dansk Standard 414. Alle disse forsøg blev udført på Kalk- og Teglværkslaboratoriet, nu Murværkscentret, DTI, Hasselager. Det viste sig, at murværkets basale styrkeegenskaber kan fastlægges ud fra styrken af små, murede prøvelegemer, hvis størrelse nu er standardiserede. Indførelsen af sådanne små prøvelegemer har gjort det mere økonomisk og tidsmæssigt overkommeligt at gennemføre forsøg. Således har nyere forsøg givet et bedre kendskab til murværks egenskaber, og rapporten indeholder nogle af disse resultater.

Som noget nyt indeholder rapporten en analyse af arbejdslinierne for murværk. Der er herved skabt et grundlag for en bedre forståelse af virkemåden af såvel armeret som uarmeret murværk.

Nedennævnte personer har drøftet manuskriptet til rapporten med forfatteren og har derved bidraget med værdifulde kommentarer til indholdet.

Akademiingeniør Mogens Buhelt, SBI,

Civilingeniør Poul Ebbesen, Ingeniørskolen Københavns Teknikum,

Akademiingeniør Vilhelm Trier Frederiksen, DIAB,

Civilingeniør Svend Ole Jensen, Rambøll, Hannemann & Højlund A/S,

Akademiingeniør Erik Kjær, Murværkscentret, DTI,

Ingeniør Jens Østergaard, Murværkscentret, DTI.

SBI vil gerne takke dem for den udviste interesse.

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

Afdelingen for Materialer og Konstruktioner, juni 1992.

Georg Christensen, forskningschef.

Indledning

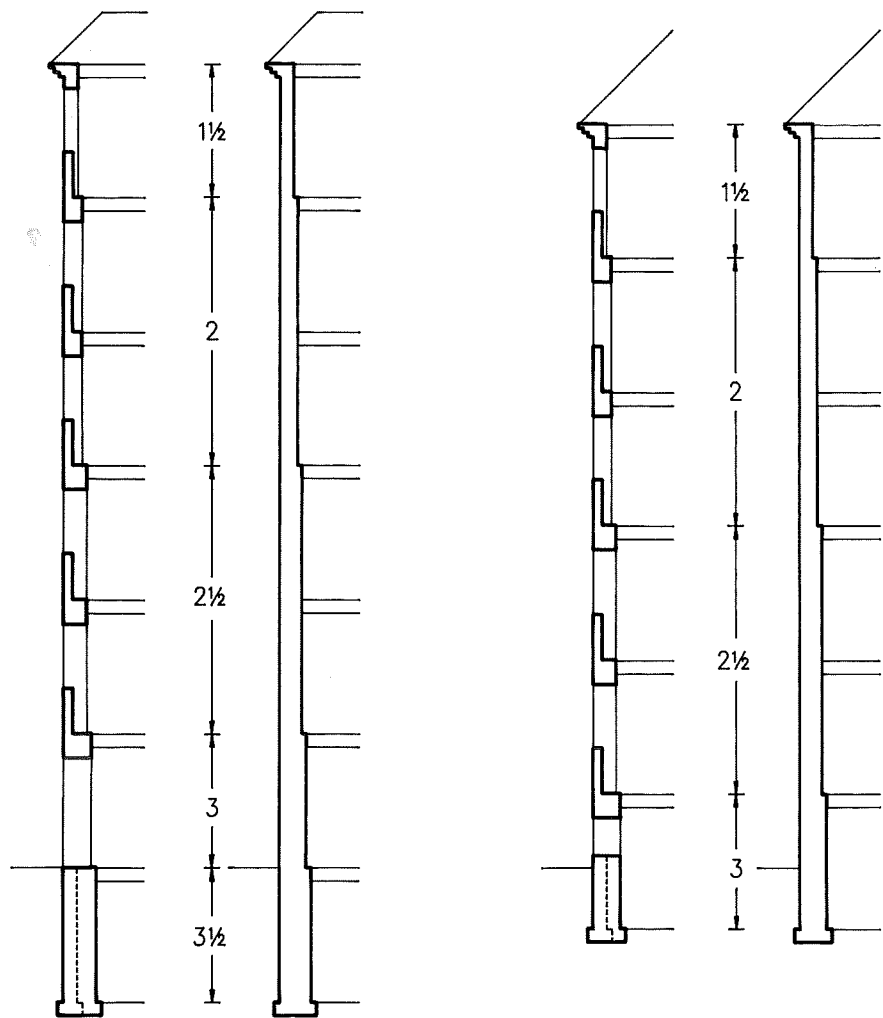
Ved dimensionering er det hovedformålet at få kendskab til de parametre, der kan medføre, at konstruktionen ophører med at opfylde sin funktion - og dernæst fastsætte en passende sikkerhed mod at komme i denne situation.

Myndighedskrav

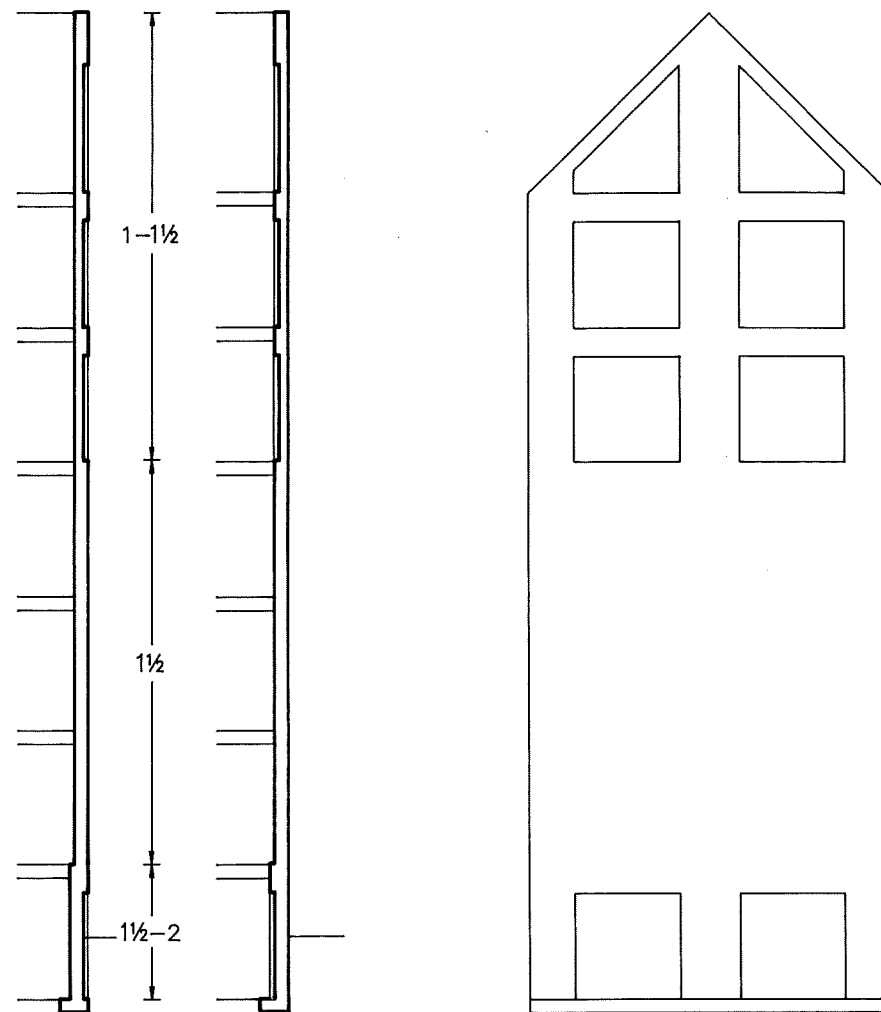
Murværk har her i landet været kendt i over 800 år. Det blev oprindeligt kun brugt til kirker, klostre og slotte, medens de øvrige huse i det middelalderlige Danmark har været opført som træhuse. I 1500-tallet ændredes dette forhold af brandmæssige årsager, idet facader af bindingsværk med udmuring begyndte at forekomme. Det var således trækonstruktioner, der udgjorde de bærende dele, medens murværket kun blev anvendt som udfyldning. I København medførte den store brand i 1728 et krav om brug af grundmurede ydervægge (det vil sige vægge af massivt murværk uden bindingsværk), men først med den anden store brand i 1795 blev kravet håndhævet konsekvent. De indvendige vægge blev i mange tilfælde stadigvæk udført som bindingsværk. Først med Københavns Byggeslov af 1889 blev det også umuligt at anvende bindingsværk indvendigt. Denne udvikling er ikke enestående for københavnske forhold, tilsvarende forhold har gjort sig gældende i den øvrige del af landet.

Med "Bygningslov for Staden Kjøbenhavn og dens Forstæder" fik byen sin første samlede bygningslov i 1856. Bestemmelserne om de konstruktive og materialemæssige forhold var udformet efter tidens nyvundne viden i teknisk henseende og formuleret sådan, at de uændret blev gældende for boligbyggeriet i mere end 100 år. Samtidig udgjorde de også grundlaget for byggeslovgivningen i resten af landet.

De konstruktive bestemmelser omhandlede blandt andet dimensionerne af murede ydervægge. Dimensionerne af bærende ydermure med åbninger blev angivet ovenfra og nedefter. I den øverste etage skulle muren være 1½ sten tyk og i de to næste 2 sten tyk. I de følgende to etager 2½ sten tyk og derefter ½ sten tykkere for hver etage, se figur 1. Ved revision af loven i



Figur 1. Tykkelsen af bærende murværk med vinduer og døre blev angivet i stenslængder (à ca. 240 mm) ifølge byggelovene af 1856 og senere. Murtykkelsen i brystningerne under vinduerne var 1 sten [1].



Figur 2. Tykkelsen af bærende murværk uden åbninger, og endemure (gavle) blev angivet i stenslængder (à ca. 240 mm) [1].

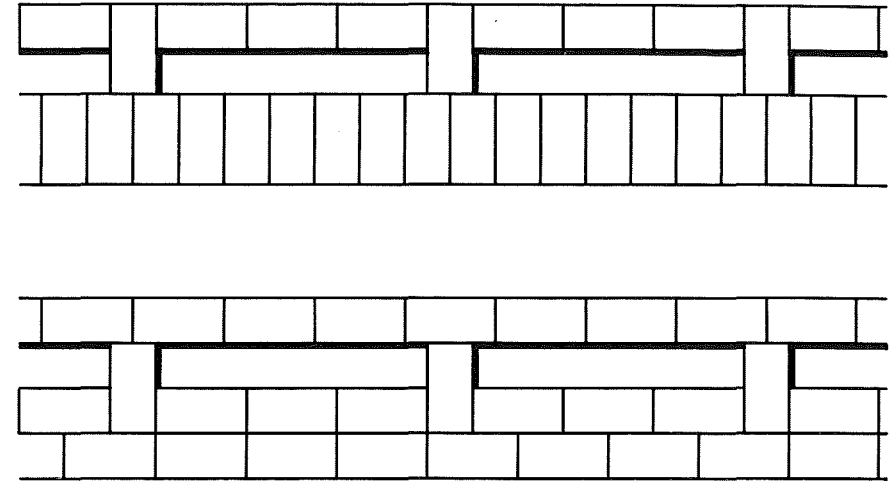
1871 og 1889 blev der gennemført en tydeliggørelse af teksten, således at der ved etagehøjder større end 6 alen (3,6 m) krævedes $\frac{1}{2}$ stens tillæg til de angivne tykkelser. Tilsvarende regler var givet for bærende ydermure uden åbninger og endemure (ikke-bærende gavle), se figur 2.

For vindues- og dørhuller var det krævet, at den samlede bredde ikke måtte overstige $\frac{2}{3}$ af murens vandrette udstrækning. Det blev senere præciseret, at pillebredden mellem vinduerne skulle være mindst $\frac{2}{2}$ sten.

Det var en forudsætning for de angivne regler, at der anvendtes massive mure udført af massive sten. Hulmurskonstruktioner var imidlertid kendt, se figur 3, og der findes eksempler på, at der blev givet dispensation til at anvende hule mure, men kun for øverste etage i endemure (gavle), hvor der sjældent forekom vinduer. Ifølge et cirkulære fra 1918 fremgår det, at der som der gives tilladelse til at anvende hule mure, må binderkolonnerne ikke anbringes med over 47 cm indbyrdes afstand. I 1921 blev det indskærpet, at bygningens hjørner skulle udmures fuldt, ligesom der skulle udmures fuldt i mindst 1 stens bredde ved dør- og vinduesåbninger, ud for etageadskillelser samt i de fire afsluttende skifter foroven. I Københavns seneste bygningsvedtægt fra 1939 angives det, at for bygninger med ikke over 3 etager kan den øverste etages facademur udføres som 35 cm hul mur med stenbindere.

Uden for København fandtes ingen selvstændig lovgivning før "Bygningslov for Købstæderne i Kongeriget Danmark" af 1858. Efter denne lov krævedes mindst 1 sten tykke ydervægge i øverste etage, og denne tykkelse skulle øges med $\frac{1}{2}$ sten i hver neden for liggende etage. Tykkelseskravet gjaldt generelt for ydervægge, det vil sige uanset om væggene var bærende eller ej og uanset om de var gennembrudte af vinduer/døre eller ej.

"Bygningsreglement for Købstæderne og Landet" af 1961 blev den første egentlige byggelovgivning for alle byerne og landet. Dette reglement indeholdt de ovennævnte regler for dimensionerne af murværk stort set uændret. Reglerne findes også i 1966-udgaven, men i "Bygningsreglement" af 1972, der også kom til at gælde for København, er reglerne kun gældende som eksempler på konstruktioner i beboelsesbygninger med indtil 2 etager. Dette skyldes navnlig, at der, med udgivelsen af den første egentlige norm for murværk, var etableret regler for beregning af murværks bæreevne. Bygningsreglementet har i alle udgaverne krævet, at Dansk Ingeniørforenings konstruktionsnormer skal være overholdt.

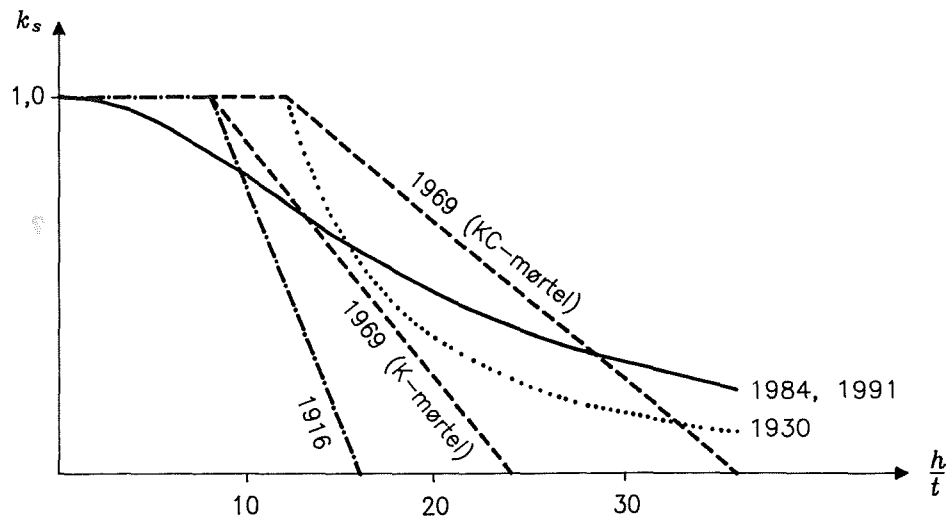


Figur 3. "Hule Mure ere saadanne, i hvilke der ved Muringen udspares Hulheder. De bestaa af en tynd Mur eller Skal paa hver Side, oftest $\frac{1}{2}$ eller 1 Sten tyk, med den fornødne Forbindelse tværs over Mellemrummet, som hyppigst er $\frac{1}{2}$ Sten bredt, men ogsaa kan være bredere. Undertiden tilvejebringer man Forbindelsen ved blot hist og her at lægge en Binder tværs over, med Enderne ind i de to Mure, men dette giver ikke noget godt Sammenhold. Hvor man ønsker, at Mellemrummet skal danne Isolering mod Fugtighed, kan man bruge glasserede Bindere, som da kunne gøres noget længere end de almindelige Sten for at give bedre Forbindelse, eller man kan indmure forzinkede Jærnankere. Den solideste Forbindelse opnaar man ved gennemgaaende lodrette Tunger, som mures i Forbandt og dele Mellemrummet i en Række Kanaler." Lærebog i Husbygning, 1888 [2].

Dansk Ingeniørforenings normer for murværk

For at medvirke til at skabe et ensartet dimensioneringsgrundlag for beregning af bygningskonstruktioner har DIF, Dansk Ingeniørforening, fra omkring år 1900 udarbejdet normer. Normerne havde til opgave at udgøre et frivilligt aftalegrundlag mellem en bygherre og hans rådgivere og samtidig forhindre, at ingeniørerne konkurrerede på sikkerheden. Det vil sige, at en konstruktionsnorm er et sæt minimumskrav, der skal være opfyldt for at tilfredsstille det vedtagne sikkerheds- og kvalitetsniveau.

Den første norm for "Beregning af Husbygningkonstruktioner" udkom i 1916, og den indeholdt på 22 sider både lastangivelser og dimensioneringsregler for stål, træ, murværk og fundering. I et tillæg til normen er bygge-lovgivningens regler for murtykkelser og træbjælkelag gengivet.



Figur 4. Reduktionsfaktoren for søjlevirkning k_s for centralt belastede søjler/vægge er blevet ændret i de forskellige normer for murværk. h og t er henholdsvis søjlelængden (etagehøjden) og søjletykkelsen.

Normen fra 1916 var baseret på tilladelige spændinger, angivet for fuldbrændte mursten, molersten og kalksandsten samt klinkbrændte mursten opmuret i kalkmørtel, bastarmørtel eller cementmørtel. Beregningsreglerne var simple og baseret på, at lasten udelukkende var lodret og centraltvirkende, idet der dog var angivet en reduktionsfaktor for søjlevirkning i murværk med et relativt slankhedsforhold $h/t > 8$, se figur 4.

Normen blev revideret i 1930, hvor der nu blev skelnet imellem fuldbrændte mursten, molersten og kalksandsten med en middelstyrke på 150 kg/cm^2 (15 MPa), hårdtbrændte mursten på 225 kg/cm^2 (22 MPa) samt klinkbrændte mursten på 300 kg/cm^2 (30 MPa). Beregningsreglerne var også i denne udgave simple og baseret på centralt virkende lodret last og uden tværpåvirkninger, men reduktionsfaktoren var blevet ændret således, at den nu medførte en reduktion af bæreevnen for murværk med et relativt slankhedsforhold $h/t > 12$. Det blev præciseret, at murværkets egenlast skulle medregnes ved spændingsundersøgelsen.

I 1940 besluttede man i DIF, at der skulle foretages en revision og en supplerung af de hidtil udgivne konstruktionsnormer i et sæt af "Normer for Bygningskonstruktioner". I dette sæt af syv planlagte normer indgik også en norm for murværk, hvis 1. udgave dog først kom i 1969.

I denne første murværksnorm skelnedes mellem mursten af tegl, beton, kalksandsten, letklinkerbeton samt moler, og stenenes styrke blev angivet i stenklasser. Mørteltyperne blev indført med de betegnelser, som bruges i dag. Normens sikkerhedsmetode var baseret på den partialkoefficientmetode, der kaldes 64-metoden, fordi den oprindeligt blev publiceret i 1964. Normen angav en forenklet beregningsmetode for murede vægge, baseret på, at den største lodrette last, der fra en af siderne (en etageadskillelse) kom ind på et murafsnit, multipliceredes med 4. Dertil lagdes al øvrig lodret last, og den samlede last betragtedes som centralt og lodret virkende. Normen indeholdt ingen regler for vandret belastet murværk. Reduktionsfaktoren for slankhedsforholdet $h/t > 12$ medførte for KC-mørtel ikke så kraftig en reduktion af bæreevnen som 1930-normen.

Normens 2. udgave kom i 1977, og den var identisk med 69-udgaven bortset fra ændrede bogstavsymboler og indførelsen af SI-enheder. Den første norm for blokmurværk kom i 1981, men den er nu indarbejdet i de senere udgaver af murværksnormen.

I begyndelsen af 80'erne blev alle DIF's konstruktionsnormer revideret samtidigt med indførelsen af den partialkoefficientmetode, som var udarbejdet under Nordisk komité for bygningsbestemmelser.

3. udgave af DIF's norm for murværkskonstruktioner kom i 1984 og 4. udgave i 1991. Grundlaget for disse normers krav til materialer og dimensioneringsregler er beskrevet i det følgende.

Byggesten

Byggesten er en fællesbetegnelse for mursten og blokke. Forskellen mellem mursten og blokke er principielt kun formatet. Mursten er således karakteriseret ved normalt at være en-hånds-format, det vil sige, at stenene har en passende lille bredde samtidig med, at de vejer mindre end 2-3 kg. Sten i dansk normalformat opfylder disse betingelser, se tabel 1, side 17. Sten i bredstensformat er lidt for brede og lidt for tunge til at opfylde kravene til en-hånds-formatet, men betragtes alligevel som mursten. Blokke er sædvanligvis karakteriseret ved, at deres bredde svarer til den færdige murs bredde. De vil næsten altid være så store, at de må betegnes som to-hånds-format.

Materialer

Størsteparten af de mursten, som anvendes her i landet, er af tegl. I mindre omfang anvendes også mursten af kalciumsilikat (kalksandsten), almindelig beton, letklinkerbeton, porebeton og moler.

For mursten af tegl kan der skelnes efter fremstillingsmetoden mellem håndstrøgne, blødstrøgne og strengpressede sten. Håndstrøgne sten formes med håndkraft ved at anbringe æltet ler i en træform. Blødstrøgne sten fremstilles på en lignende måde, men formningen sker her maskinelt, idet æltet ler anbringes i en stålform. Strengpressede sten fremstilles ved at presse det æltede ler igennem et mundstykke med en åbning, som svarer til stenenes længde og bredde. Den lerstreng, der presses ud af maskinen skæres i skiver, hvis tykkelse svarer til stenenes højde. De strengpressede sten har sædvanligvis en tættere struktur end de håndstrøgne og blødstrøgne sten.

De almindeligst anvendte blokke er af letklinkerbeton eller porebeton, men der forekommer også blokke af kalciumsilikat og moler. Her i landet er blokke sjældent af tegl eller almindelig beton. Specielle fundamentsblokke af beton anvendes i nogen udstrækning til fundamenter for småhuse, men ikke til egentligt murværk.

Der skelnes mellem massive byggesten og hulsten, dvs. byggesten med huller vinkelret på liggefladen. Byggesten med huller parallelle med liggefladen (horisontal perforering) anvendes normalt ikke her i landet.

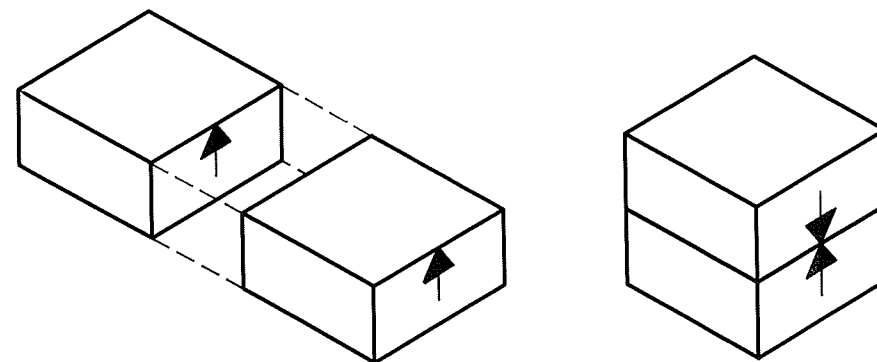
Styrke

Murstens styrke og stenklasse

Murstens styrke er en væsentlig faktor ved vurdering af murværks bæreevne, idet en større stenstyrke - alt andet lige - giver stærkere murværk. Der er dog ikke nogen simpel sammenhæng mellem styrken af stenene og styrken af murværket, fordi også andre forhold spiller ind.

Ved murstens styrke forstås sædvanligvis stenenes trykstyrke, men det betyder ikke, at stenenes trækstyrke og forskydningsstyrke er af underordnet betydning, de er blot vanskeligere at bestemme. Man foretrækker derfor normalt at beskrive stenstyrken alene ved hjælp af trykstyrken.

Murstens trykstyrke bestemmes normalt ved tryk i samme retning som murstenene bærer i almindeligt murværk, det vil sige vinkelret på liggefladen. Fordi prøvelegemets form har indflydelse på prøvningsresultatet - prøvelegemet skal have en højde, der er lige så stor eller større end bredden, for at der kan optræde trykbrud - bestemmes trykstyrken ikke på en hel mursten. Her i landet er trykstyrken i mange år blevet bestemt på det næsten terningformede prøvelegeme, som fremkommer ved at halvere en mursten med et snit parallel med kopenderne, dreje den ene halvdel 180°, se figur 5, og derefter samle de to halvdele med en tynd fuger af cementpasta (for at udligne ujævnheder) og afrette top og bund af prøvelegemet med cementpasta.



Figur 5. Murstens trykstyrke bestemmes på terningsformede prøvelegemer, der fremstilles ved at halvere stenene. Dernæst drejes den ene halvdel 180° og de to halvdele limes sammen med en tynd fuger af cementpasta. Inden trykprøvningen afrettes prøvelegemet med cementmørtel.

Trykstyrken bestemmes regelmæssigt som et led i driftskontrollen. For mursten af tegl er styrken afhængig af brændingstemperaturen, idet en højere brændingstemperatur vil medføre en stærkere sten. Styrken er også afhængig af lerarten, fx om leret er rødt- eller gultbrændende, fedt eller magert, og endvidere af lerets formgivning, fx om stenene er blødstrognede eller strengpressede. Trykstyrken angives i MPa, bestemt som brudlasten divideret med prøvelegemets mindste tværsnitsareal, idet der ikke regnes med fradrag for eventuelle huller. Mursten er så små, at det sædvanligvis er middelværdien af trykstyrken, som bedst karakteriserer murværkets bæreevne.

Stenklassen er et udtryk for stenenes trykstyrke, der angives i producentens varedeklaration. Hvis spredningen på prøvningsresultaterne er lille, kan stenklassen deklarerer med en værdi, som svarer til middeltallet af trykstyrkerne. En større spredning på resultaterne medfører, at stenklassen må deklarerer med en værdi, som er mindre end middeltallet. En stor spredning kan umuliggøre en fastsættelse af stenklassen. Den nøjagtige beskrivelse af prøvningsmetoden og regler for stenklassebestemmelsen er angivet i Dansk Standard DS 438.11. Dansk Ingeniørforenings norm for murværkskonstruktioner, i det følgende kun omtalt som DS 414, foreskriver i 4. udgaven, at stenklassen skal angives i hele MPa.

Trækstyrke, forskydningsstyrke og elasticitetsmodul bliver sædvanligvis ikke bestemt på mursten alene, og der er ikke standardiseret prøvningsmetoder herfor.

Blokkes styrke og blokklasse

Ved blokkes styrke forstås sædvanligvis trykstyrken. Blokkene har en så stor højde i forhold til bredden, at det er fundet unødvendigt at skære blokkene i stykker for at bestemme trykstyrken.

Blokkes trykstyrke bestemmes derfor normalt på hele blokke ved tryk vinkelret på liggerfladen, således som beskrevet i Dansk Standard DS 438.1. Trykstyrken bestemmes regelmæssigt som et led i driftskontrollen og angives i MPa, bestemt som brudlasten divideret med prøvelegemets tværsnitsareal. Blokke er så store, at en lav værdi for styrken af en enkelt eller nogle få blokke kan være afgørende for murværkets bæreevne. Dette afspejles i blokklassen.

Blokklassen er et udtryk for blokkenes karakteristiske trykstyrke, og deklarerer med en værdi, som højst er lig med den nedre karakteristiske værdi (10 pct.-fraktilen). DS 414 foreskriver, at blokklassen skal angives i halve eller hele MPa indtil 5,0 MPa og derefter i hele MPa.

Blokkes trækstyrke, forskydningsstyrke og elasticitetsmodul bestemmes normalt ikke, og der er ikke standardiseret prøvningsmetoder herfor.

Formater

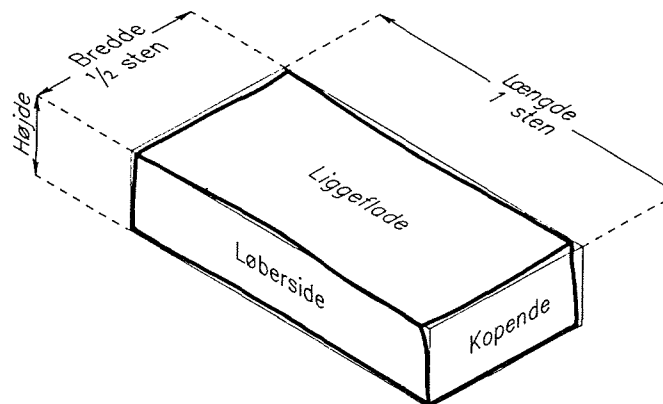
Murstens format

Det grundlæggende format for mursten er et retvinklet prisme, hvis dimensioner angives for længde, bredde og højde, defineret som vist på figur 6. Stenene leveres i dimensioner, som kun afviger fra de tilstræbte basismål med små, tilladte afvigelser.

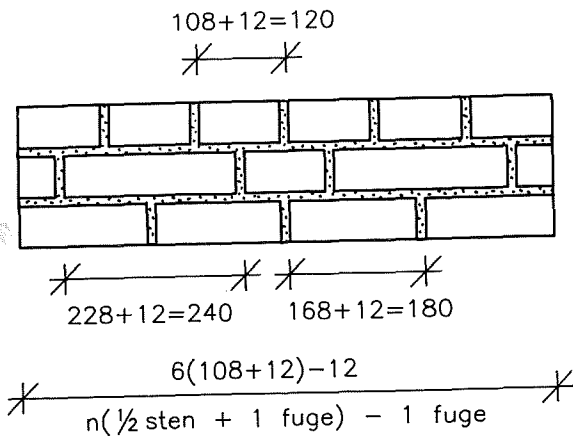
I murværk skal stenene lægges i forbandt (fletværk). Forbandt med størst mulig overlappning forudsætter, at målene for normale mursten må være fastlagt således, at stenslængden (1/1 sten) = to stenbredder (2 x 1/2 sten) + en fuge. Med mursten i normalformat er det muligt at opføre vægge med længden og tykkelsen lig

$$n(\frac{1}{2} \text{ sten} + 1 \text{ fuge}) - 1 \text{ (fuge)}, \quad n \text{ er et helt tal}$$

samtidig med, at stenene i tykkere mure kan lægges i forbandt både på langs og på tværs i murene, se figur 7.



Figur 6. En murstens længde, bredde og højde bestemmes som målene på den mindste kasse, der kan omslutte murstenen.



Figur 7. Længden af en mur vil normalt være $n(\frac{1}{2} \text{ sten} + 1 \text{ fuge}) - 1 \text{ fuge}$. Da bredden af dansk normalformat er 108 mm og tykkelsen af en fuge er 12 mm vil længden af en mur således blive $n(120) - 12 \text{ mm}$, hvor n er et helt tal.

Længden af en muråbning vil tilsvarende være $n(\frac{1}{2} \text{ sten} + 1 \text{ fuge}) + 1 \text{ fuge}$ eller $n(120) + 12 \text{ mm}$.

Murstensformaterne har tidligere varieret fra teglværk til teglværk, men da det er af stor betydning for tilrettelæggelse af byggeprocessen, at formatet er uafhængigt af producenten, er stenformaterne nu standardiserede. Herved er basismålene for stenenes længde, bredde og højde blevet fastlagt med tilhørende tolerancer, sådan at fugernes tykkelse hverken bliver for lille eller for stor. Her i landet anvendes hovedsageligt dansk normalformat med målene 228 mm · 108 mm · 55 mm og bredstensformat med målene 228 mm · 168 mm · 55 mm, se tabel 1. Bredstenene anvendes især til vægge, der har samme tykkelse som stenenes bredde. Fugerne mellem stenene forudsættes at have en nominel tykkelse på 12 mm. Det medfører, at stenenes bruttomål inklusive fugeandele bliver 240 mm · 120 mm · 67 mm - henholdsvis 240 mm · 180 mm · 67 mm. Disse længdemål og breddemål er alle delelige med 60 mm = $\frac{1}{4}$ sten, som således er murværkets vandrette grundmodul. I byggeriet anvendes ofte et vandret planlægningsmodul på 3M = 300 mm = 5 · murværkets grundmodul. I højderetningen anvendes ofte et planlægningsmodul på 2M = 200 mm = 3 · murstens bruttohøjde = 3 skifter.

I praksis forskydes stenene ofte $\frac{1}{4}$ stenslængde eller 60 mm indbyrdes, se figur 8. Herved kan det blive nødvendigt at anvende delformater, som er sten, der er delt enten på tværs eller på langs. Delformater, der er $\frac{1}{2}$ sten lang og har en bredde på 48 mm kaldes petringer. Delformater, der er 1

Tabel 1. Basismål i mm for mursten i danske standardformater.

	Længde	Bredde	Højde
Normalformat	228	108	55
Bredstensformat	228	168	55

Tabel 2. Målkraav vedrørende afvigelser i mm fra basismål for danske standardformater.

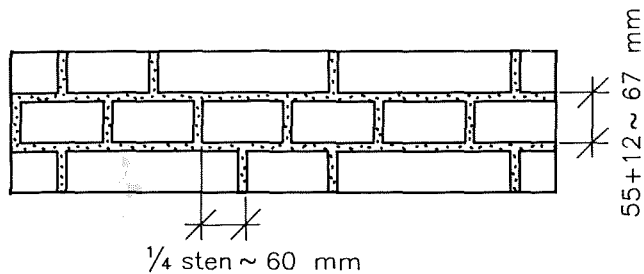
	Middelværdi af 50 enkeltmål skal ligge i intervallet	Højst 3 af enkeltmålene må ligge uden for intervallet
Længde	225-231	219-237
Bredde, normalformat	105-111	99-117
Bredde, bredstensformat	165-171	159-177
Højde	53-57	50-60

Tabel 3. Målkraav vedrørende afvigelser fra basismål for danske blokke.

Basismål for fugetykkelse	Middelværdi af 10 enkeltmål skal ligge i intervallet	Højst 2 af enkeltmålene må ligge uden for intervallet
< 3 mm	Basismål ± 1 mm	Basismål ± 2 mm
3-7 mm	Basismål ± 2 mm	Basismål ± 3 mm
< 7 mm	Basismål ± 3 mm	Basismål ± 4 mm

sten lang og har en bredde på 48 mm kaldes mesterpetringer. Delformaterne fremstilles enten i de færdige mål eller ved at skære eller klippe i almindelige mursten. Stenene kan også deles ved hugning, men da det ofte medfører, at stenene revner, er det ikke tilladt for murværk underkastet skærpet kontrol.

Stenenes højde spiller ingen rolle for forbandtet. Det kan nævnes, at det norske normalformat har samme længde og bredde som det danske, men basismålet for højden er 68 mm, dvs. at 3 skifter har en højde, som svarer til stenslængden.



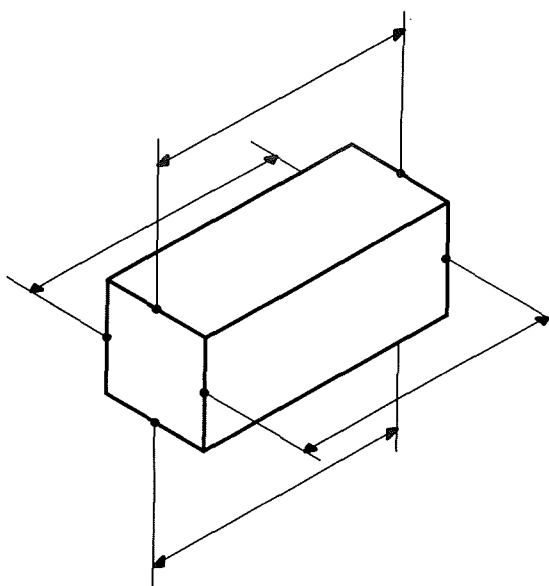
Figur 8. I praksis forskydes stenene ofte $\frac{1}{4}$ stenslængde eller 60 mm indbyrdes. Derved bliver murede længdemål et multiplum af 60 mm, der derfor er murværkets vandrette grundmodul. 5 grundmoduler = 300 mm giver et vandret planlægningsmodul på 3M. I højden vil 3 skifter = 200 mm give et lodret planlægningsmodul på 2M.

Murstens format bestemmes for længde, bredde og højde som minimumsafstanden mellem to plane, parallelle flader, der omslutter stenen. Det vil sige, at formatet bestemmes som målene på den kasse, som omskriver stenen. Afvigelserne fra basismålene må ikke være større, end at de til formatet hørende fugetykkelse kan overholdes i praksis både på stenenes forside og stenenes bagside. Tilladte målafvigelser for standardformaterne er givet i DS 414, se tabel 2. For delformaterne gælder tilsvarende krav til nøjagtigheden af målene. Det er imidlertid nødvendigt, at der ved flere leverancer af sten til samme byggeri ikke er væsentlig forskel på målafvigelserne mellem de enkelte leverancer. Hvis den første leverance indeholder sten fx med middellængde i nærheden af 231 mm, må den næste leverance således ikke indeholde sten med middellængden i nærheden af 225 mm, selv om begge leverancer formelt tilfredsstillende målkraevne. Dette skyldes, at en forskel på stensmålene må udlignes i fugetykkelsen, og at større spring i fugetykkelsen foruden at være æstetisk uacceptabelt også påvirker murværkets bæreevne.

Kravene til stenformater og de tilhørende tolerancer er angivet i DS 414, se tabel 1 og 2, medens prøvningsmetoden til bestemmelse af formatet er beskrevet i DS 438.12.

Blokkes format

Blokkes format angives, ligesom murstens format, ved basismålene for længde, bredde og højde. Blokkes formater er ikke standardiserede som murstens. Bloklængden afpasses normalt enten efter det almindelige planlæg-



Figur 9. Blokkes længde bestemmes som middeltal af de fire mål midt på hver side. Blokkes bredde og højde bestemmes på tilsvarende måde.

ningsmodul (fx 588 mm svarende til 6M) eller efter murstensmodul (fx 468 mm svarende til to murstenslængder). Blokbredde og murtykkelse er sædvanligvis sammenfaldende således, at blokke kun lægges i forbandt i murens længderetning. Blokhøjden vælges for de fleste danske blokke sådan, at højdemodul bliver 2M svarende til 3 skifter mursten (fx 188 mm).

I de nævnte eksempler er det forudsat, at basismålet for fugetykkelsen er 12 mm ligesom ved mursten, men nogle blokprodukter forudsætter en nominal tykkelse på 10 mm medens andre forudsætter en meget mindre fugetykkelse, fx 1 mm-3 mm. I disse tilfælde benævnes bindemidlet ikke mørtel, men lim. Blokformatet afhænger af den forudsatte fugetykkelse, og kravene til blokkes nøjagtighed skærpes når fugerne bliver tyndere. DS 414 opdeler fuger i tre grupper efter tykkelsen, og de tilhørende tolerancekrav fremgår af tabel 3.

Blokkes dimensioner bestemmes som middeltallet af de fire mål på midten af hver sideflade, se figur 9. Prøvningsmetoden er beskrevet i DS 438.1.

Frostfasthed

Byggesten, som skal anvendes i udendørs klima eller i indendørs fugtige, uopvarmede lokaler, skal være egnet hertil. Det vil blandt andet sige, at de skal være frostfaste.

Der er på nuværende tidspunkt udviklet flere prøvningsmetoder, men ikke nogen som entydigt kan vise, hvorvidt en given sten er frostfast. Selv for tilsyneladende egnede prøvningsmetoder har det vist sig, at sten, som har bestået prøvningen, ikke har kunnet holde i konstruktionerne. Omvendt har sten, som har kunnet holde i konstruktionerne, ikke bestået prøvningen. Forklaringen er sandsynligvis, at de udviklede prøvningsmetoder har været knyttet til bestemte stentyper, og disse er så forskellige, at der ikke kan anvendes samme metode ved dokumentationen. I de danske normer stilles der derfor på nuværende tidspunkt ikke krav til, at stenenes frostfasthed dokumenteres på grundlag af en prøvning, men deklARATIONEN baseres udelukkende på den enkelte producents erfaring med den pågældende byggesten.

Densiteter

Der skelnes mellem bruttodensitet og nettodensitet.

Bruttodensiteten er defineret som stenens tørre masse divideret med totalrumfanget uden fradrag for eventuelle huller, men med fradrag for eventuelle udsparinger. Udsparinger kan fx være riller til fremføring af elledninger.

Nettodensiteten er stenmassens densitet. For sten med huller bestemmes rumfanget med fradrag for hullerne.

Voluminet bestemmes ved nedsænkning i vand. Da byggestenene er vandsugende benyttes en lidt speciel metode: stenen lægges i vand i 2 døgn, hvorved den vandmættes. Derefter vejes den, dels i vand og dels i luft. Den tilsyneladende masseforskel i kg angiver opdriften fra det fortrængte vand. Stenens volumen findes herefter ved at dividere den tilsyneladende masseforskel med 1000 kg/m^3 .

Metoder og prøvningsbetingelser for bestemmelse af densitet er beskrevet i DS 438.13 for mursten (både brutto- og nettodensitet) og i DS 438.1 for blokke (kun bruttodensitet).

Vandoptagelse og minutsugning

Tegl og moler er porøse materialer, hvor de faste bestanddele er gennemskåret af kapillære hulrum og kanaler, der står i forbindelse med overfladen.

For alle byggesten har sugeevnen betydning ved anvendelsen, fordi det blandt andet betyder, at der kan opstå vedhæftning mellem sten og fuge-

mørtel. Stærkt sugende sten kan imidlertid ved placeringen i den friske mørtel suge så meget vand fra kontaktfladen, at der her ikke er tilstrækkeligt vand til at mørtlens cement kan hydratisere fuldstændig. Sådanne sten bør derfor forvandes inden opmuringen.

Sten med store porer kan opsuge vand hurtigt, men ikke i store mængder. Omvendt vil sten med små porer opsuge vand langsomt, medens mængden af det optagne vand kan være stor. Stenenes sugeevne angives derfor ved to værdier, vandoptagelse og minutsugning, idet vandoptagelsen er et udtryk for, hvor stor vandmængde en sten kan optage, medens minutsugningen er et udtryk for den hastighed, hvormed opsugningen foregår.

Vandoptagelsen angives i procent af stenmassens volumen, og bestemmes som den vandmængde, en tør sten kan optage på to døgn, idet stenen i det første døgn er halvt nedsænket og i det andet døgn helt nedsænket i vand.

Minutsugningen angives i masse per arealenhed (kg/m^2), og bestemmes som den vandmængde, en tør sten kan opsuge på et minut, idet stenens ene liggeflade er neddykket 10 mm under en vandoverflade, der holdes i konstant niveau under prøvningen. Minutsugningen varierer mellem 1 kg/m^2 for klinkbrændte sten og 6 kg/m^2 for stærkt sugende sten.

Der er normalt ingen relation mellem vandoptagelse og minutsugning. Der er heller ingen relation mellem disse værdier og stenenes frostfasthed.

For byggesten af tegl, moler og kalciumsilikat bestemmes vandoptagelse og minutsugning ved de prøvningsmetoder, der er angivet i DS 438.13.

For byggesten af andre materialer bestemmes disse egenskaber normalt ikke.

Mørtel

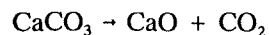
Mørtel er en blanding af bindemidler, tilslagsmateriale og vand, eventuelt med tilsætningsstoffer. Der skelnes mellem luftmørtler, som kun kan hærde i luft, og vandmørtler eller hydrauliske mørtler, som kan hærde både i luft og i vand.

Bindemidler

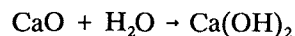
Bindemidlet i mørtel har til opgave at sammenkitte tilslagsmaterialerne. De bindemidler, som hyppigst anvendes er almindelig kalk, hydraulisk kalk og cement.

Almindelig kalk

Råmaterialet er kalksten, som består af calciumkarbonat. Ved brænding på kalkværket dannes der brændt kalk, samtidig med at der frigøres kuldioxid:



Brændt kalk, kalciumilte, er et tæt, porøst materiale, der har stor affinitet til vand. Brændt kalk læskes ved tilsætning af vand, som det forbinder sig med under dannelse af kalkhydrat, der er ren kalciumhydroxid:



Læskningen på mørtelværket sker under volumenforøgelse og stærk varmeudvikling, der medfører, at overskydende vand i dampform sprænger kalken. Læskes kalken med overskud af vand opnås såkaldt kulekalk, som er en sej, dejagtig masse. Brændt kalk, som netop er læsket med den nødvendige mængde vand kaldes hydratkalk, der er et tørt pulver egnet til transport.

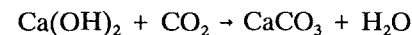
Dersom læskningen med vand ikke sker relativt hurtigt efter brændingen, skal kalken opbevares tørt i sække uden adgang af luft. I modsat fald vil den brændte kalk opsuge fugtighed fra luften og samtidig hermed også kuldioxid. Forbindelse med kuldioxid vil ødelægge den brændte kalk som bindemiddel.

Inden kalken skal anvendes til mørtel, er det vigtigt, at der ikke er ulæskede korn til stede, hvorfor kalk sædvanligvis læskes med overskud af vand.

Af eventuelle korn af kalkhydrat må, ifølge DS 414, højst 10 pct. være større end 0,25 mm, og ingen korn må være større end 1 mm.

Ved anvendelsen blandes kalkhydraten med sand og så meget vand, at der opnås en konsistens, som passer til brugen.

Ved hærkning i murværk, der også kaldes karbonatisering, vil kalkhydratet gå i forbindelse med luftens kuldioxid under dannelse af det oprindelige calciumkarbonat og vand:



Det kræves således, at der er fri tilgang af luft, og den almindelige kalk kaldes derfor luftkalk. Under hærningen skal mørtelvandets damptryk være mindre end luftens vanddamptryk, men først når vandindholdet er mindre end 6 pct. tager karbonatiseringen fart. Herved dannes yderligere vand, som også skal fordampe.

Hydraulisk kalk

Kalk, som har hydrauliske egenskaber, betegnes hydraulisk kalk. Hydraulisk kalk fremstilles ved brændingen af lerholdige kalksten. Herved opnås, at den brændte kalk kan hærde uden tilgang af luft ligesom tilfældet er for cement. Dette skyldes, at den kiselure, som er frigjort ved forbrænding af leret, kan forbinde sig med kalkhydratet, blot der er fugt til stede. Den brændte kalk må kun tørrelæses med den korrekte mængde vand, fordi kalken ellers vil afbinde. Afbindingstiden er lidt langsommere end for portlandcement. Hydraulisk kalk produceres for tiden ikke her i landet.

Cement

Den cementtype, som anvendes til mørtel, vil næsten altid være enten portlandcement eller portlandflyveaskecement (også kaldet standardcement).

Cement er et hydraulisk bindemiddel, der kan afbinde og hærde under vand, idet cement kun forbruger vand under hærningen.

Portlandflyveaskecement er portlandcement, hvortil der er sat flyveaske, her i landet maksimalt 35 pct. Herved sker der normalt ingen reduktion af styrken, men flyveaskens reaktionstid er langsommere end cementens. Samtidig er der en tendens til en langsommere varmeudvikling i de første døgn.

Andre bindemidler

Andre bindemidler kan anvendes til mørtel. I følge DS 414 skal deres egnethed dog være dokumenteret. Der produceres fx murcement, som består af finmalet portlandcement tilsat finmalede natursten af kalk eller kvarts samt

et poredannende middel, der giver mørtlen et højt luftindhold. Dette luftindhold varierer normalt inden for ret vide grænser - mellem 12 pct. og 18 pct. - der giver en god bearbejdelighed, men medfører en reduktion af mørtlens vedhæftning til mange stentyper (se fx figur 11, side 27).

Tilslagsmateriale

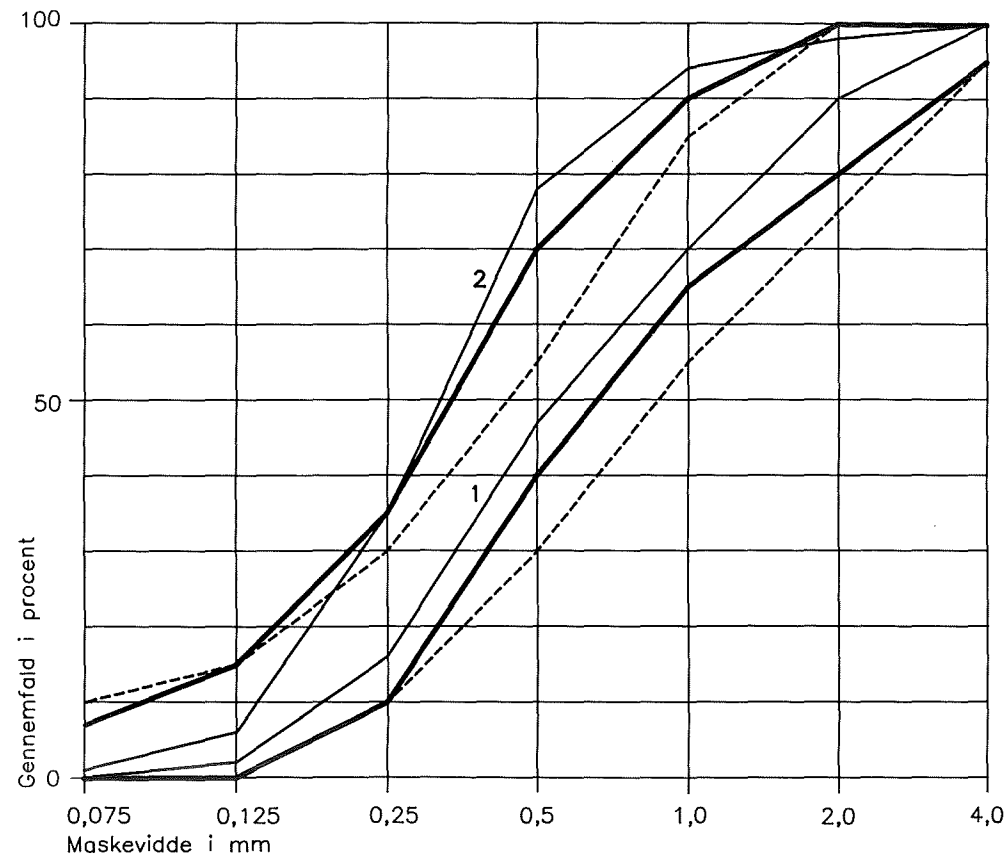
Tilslagsmateriale til mørtel vil sædvanligvis være natursand, som her i landet enten vil være bakkesand (skarpkantet) hentet i grusgrave, eller strandsand (afrundet) hentet i eller ved havet.

Sand til mørtel bør have sådanne egenskaber, at den færdige mørtel kan opnå tilstrækkelig styrke og tæthed, samtidig med at mørtlen har en god bearbejdelighed. Da bindemidlet i reglen er svagere end sandet, vil mørtlen opnå den bedst mulige styrke og tæthed når bindemidlet netop udfylder hullrummene mellem sandkornene. Det betyder, at et godt mørtelsand bør have en rimelig fordeling af alle kornstørrelser fra de mindste til de største, og at kornene bør have en passende form.

Sandet må ikke indeholde ret mange korn større end 4 mm, da de besværliggør anvendelsen - både til muring og pudsning. Det er nødvendigt, at sandet indeholder en vis mængde filler - det vil sige korn med tværmål mindre end 0,075 mm - blandt andet fordi det øger mørtlens smidighed. Filler-mængden må ikke være for stor, fordi filler-kornene har en relativt stor overflade, og det øger mørtlens vandbehov med deraf følgende større svind i mørtlen.

Der er foretaget flere undersøgelser med henblik på at fastlægge, hvorledes sandets kornfordeling bør være for at opnå de bedst mulige egenskaber. Det har vist sig, at dersom et sands kornkurve er beliggende i et område begrænset af de to grænsekurver, der er vist med fed streg i figur 10, vil sandet være godt at mure med, og samtidig give murværket god styrke. Grænsekurverne er angivet i DS 414. Man har tidligere anvendt de grænsekurver, der er vist punkteret, men de nugældende grænsekurver giver bedre sammenhæng i murværket, det vil sige bedre vedhæftning mellem mørtel og sten.

Sand til mørtel skal selvfølgelig være fri for skadelige stoffer, som fx humus, organisk materiale eller opløselige salte. Humus, der kan forekomme pletvis i grusgravene, vil forsinke mørtlens hærdning og nedsætte dens styrke.



Figur 10. Kornkurver for mørtelsand. Erfaringen har vist, at hvis sandets kornkurve ligger inden for de fede grænsekurver, vil sandet være egnet til mørtel, både med hensyn til styrkeforhold og med hensyn til bearbejdelighed. Sandprøve nr. 1 er beliggende inden for grænsekurverne. Sandprøve nr. 2 er fra et mere ensartet, fint sand, som giver god vedhæftning til mursten, men er knap så let at arbejde med. De nu fastlagte (fede) grænsekurver er angivet i DS 414. De oprindelige grænsekurver er vist punkteret.

Andre tilslagsmaterialer

Til mørtel kan anvendes andre tilslagsmaterialer, når deres egentlighed er dokumenteret. For eksempel kan der anvendes lette, porøse korn af opblærede mineraler, fx vermiculit eller perlit, hvilket giver en mørtel med bedre varmeisolerende egenskaber.

Vand

Det vand, som anvendes til mørtelfremstilling, skal være rent og uden skadelige stoffer, såvel af hensyn til de kemiske processer ved hærkning af bindemidlerne som af hensyn til egenskaberne af den hærdnede mørtel.

Tilsætningsstoffer

Tilsætningsstoffer er stoffer, som kan tilsættes med henblik på at forbedre en eller nogle få af mørtlens egenskaber, fx afbindingstiden.

Det gælder for alle tilsætningsstoffer at mængden skal doseres korrekt, og det skal sikres, at stoffets anvendelse ikke medfører uacceptable bivirkninger.

Frysepunktssænkende midler forlænger den periode, hvor det er muligt at mure i vinterhalvåret. Hertil kan anvendes ethanol (sprit eller denatureret sprit).

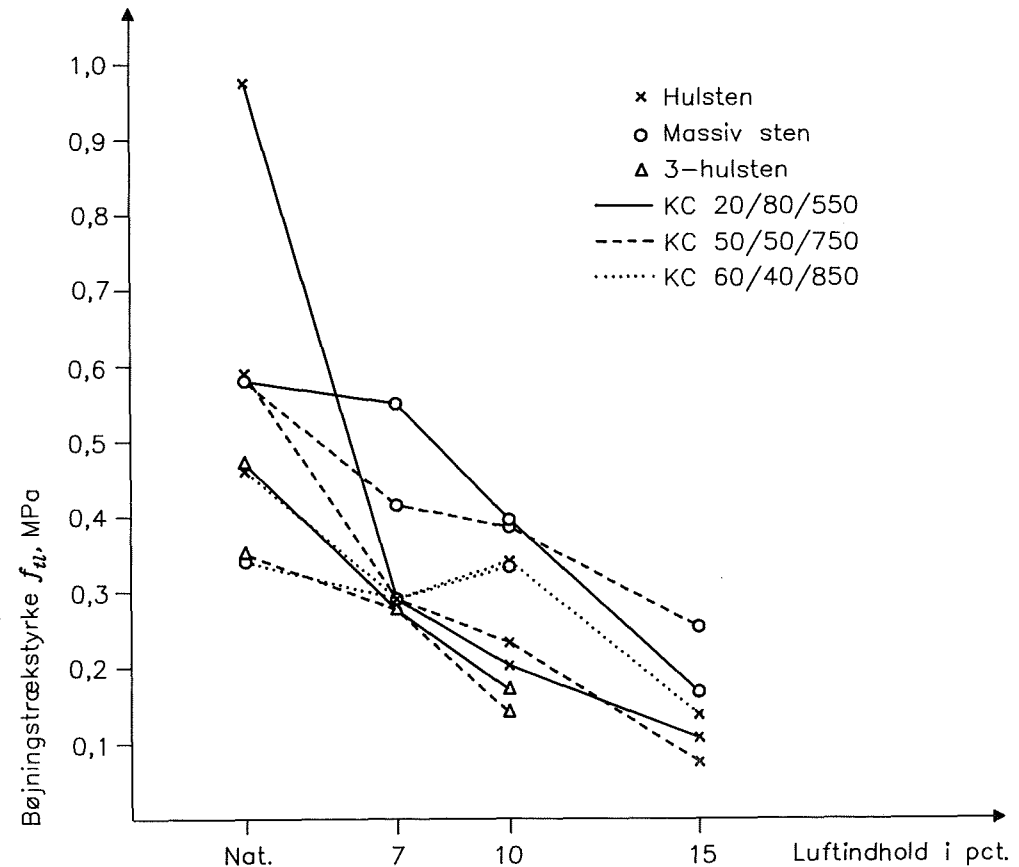
Ifølge DS 414 er det forbudt at anvende frysepunktssænkende midler, der indeholder opløselige salte, fx klorider. Disse stoffer sænker frysepunktet nogle grader, men har de uheldige bivirkninger, at mørtlen får ringere styrke, at der kommer saltudblomstringer, som kan medføre forvitring af murværket, og endelig at der opstår risiko for korrosion af indmurede metaldele.

Luftindblandingsmidler kan forøge den friske mørtels smidighed, således at mørtlen bliver lettere at anvende. Luftindblanding kan i nogen grad øge mørtlens modstandsdygtighed mod frost. Voksene luftindhold reducerer imidlertid mange tilfælde mørtlens vedhæftning til stenene. Luftindblandingsmiddel i mørtel må kun anvendes, når der er taget hensyn til de reducerede styrkeforhold, se figur 11.

Retarderende stoffer har til formål at forsinke afbinding og hærkning. Dette er der navnlig behov for, når anvendelsestiden ønskes forlænget for cementholdige mørtler, som ellers vil afbinde få timer efter vandtilsætningen.

Farvestoffer

Farvestoffer i mørtel anvendes undertiden af arkitektoniske grunde. Farvestoffet tilsættes sædvanligvis mørtlen som et finkornet pulver, der ikke reagerer med mørtlens øvrige bestanddele. Farvestoffer, som ikke indeholder opløselige salte, og derfor er inaktive med de øvrige mørtelmateriale, betragtes som ligestillet med sandet. I andre tilfælde må farvestoffet betragtes som et tilsætningsstof, det vil sige, at mørtlen skal undersøges for eventuelle uønskede bivirkninger.

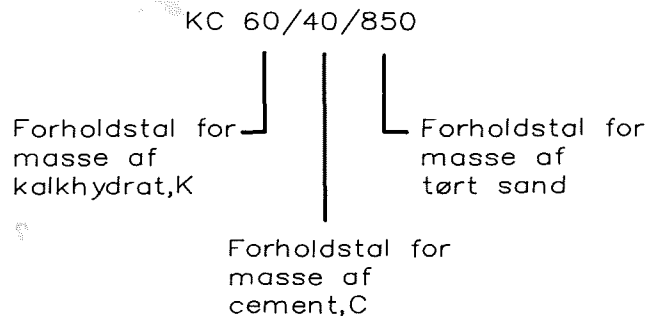


Figur 11. Luftindblanding smidiggør frisk mørtel således, at den bliver lettere at mure med. Bøjningsforsøg med murværk af teglsten har imidlertid vist, at styrken falder med voksende luftindhold, idet vedhæftningen til stenene forringes. Det naturlige luftindhold i mørtel - på figuren angivet ved Nat. - ligger mellem 2 pct. og 5 pct., afhængig af sandets kornkurve og blandemåden.

Mørtelfremstilling

Blandingsforhold

Mørtel betegnes ved arten af bindemiddel: K for kalkhydrat, C for cement, KC for både kalkhydrat og cement, K_h for hydraulisk kalk samt M for murcement. Mørtlen beskrives yderligere ved blandingsforholdet mellem tørmaserne af bindemiddel og den tilhørende masse af tørt sand, se figur 12, idet forholdstallet for den samlede masse af bindemidler altid angives som 100.



Figur 12. Mørtel betegnes ved arten (arterne) af bindemiddel, K for kalkhydrat og C for cement. Mængderne angives i forhold til massen af tørt sand. Massen af bindemiddel (eller summen, hvis der er flere) angives altid til 100.

Ud fra disse retningslinier kan der fremstilles uendelig mange forskellige kalkcement-mørtler. Her i landet anvendes normalt følgende KC-mørtler: KC 60/40/850, KC 50/50/700, KC 35/65/650 og KC 20/80/550. Disse mørtler betegnes i DS 414 som referencemørtler.

Mørtelbetegnelserne indeholder ikke nogen angivelse af vandmængden, fordi denne bestemmes af mureren, således at mørtlen bliver passende smidig. Forsøg har vist, at der opnås maksimal vedhæftning mellem mørtel og sten når der anvendes mest muligt vand - dog ikke mere end at mørtlen stadig er bearbejdelig.

For KC-mørtler gælder, at styrken øges med cementindholdet, men smidigheden aftager med øget cementmængde. Det er således lettere at mure med en cementfattig mørtel. Cementmængden skal dog mindst udgøre 35 pct. af den samlede mængde bindemiddel, dels fordi en lille cementmængde ikke bidrager til en øget mørtelstyrke, dels fordi cementen virker hæmmende på kalkens hærdning.

Mængden af de indgåede materialer i en mørtel skal bestemmes nøjagtigt. I DS 414 kræves, at den tørre masse af de enkelte bestanddele i den færdige mørtel højst må afvige 3,5 pct. fra den krævede eller deklarerede masse.

Vådmørtel

Ved mørtelfremstillingen skelnes der mellem vådmørtel og tørmørtel. Vådmørtel er baseret på kalkmørtel fremstillet af vådlæsket kalk. Kalkmørtlen

Tabel 4. Kalkindhold bestemt som kalkhydrat i kalktilpasset mørtel. De angivne blandingsforhold er baseret på vægtprocent af tørre materialer.

Mørteltype	Kalkhydratindhold i kalktilpasset mørtel, pct.	Min. - max. kalkhydratindhold, pct.
K 100/1200	7,7	7,2-8,2
KC 60/40/850	6,6	6,1-7,1
KC 50/50/700 ¹⁾	6,6	6,1-7,1
KC 35/65/650	5,1	4,8-5,5
KC 20/80/550	3,5	3,3-3,8

¹⁾ Denne mørteltype er blevet indført som referencetype i DS 414, 4. udgave 1991. Tidligere anvendtes mørteltypen KC 50/50/750, som indeholder lidt mere sand. Mange af de forsøgsresultater, der senere refereres til, er med denne mørteltype. Mørtlerne KC 50/50/700 og KC 60/40/850 kan fremstilles ud fra den samme kalktilpassede mørtel.

leveres sædvanligvis fra et mørtelværk som kalktilpasset mørtel, det vil sige fugtig mørtel, der indeholder kalkhydrat og sand i det korrekte forhold, men uden cement.

Til en KC-mørtel med blandingsforhold $k/c/s$ skal kalkindholdet i den kalktilpassede mørtel være

$$\frac{k}{k+s} 100 \text{ pct.}$$

Kalkindholdet i den kalktilpassede mørtel er angivet i tabel 4, idet blandingsforholdene angives for tørre materialer.

De enkelte delmaterialer skal indgå i den færdige mørtel med en nøjagtighed på 3,5 pct. I tabel 4 er det angivet inden for hvilke grænser, indholdet af kalkhydrat skal holdes i den kalktilpassede mørtel, idet der er taget hensyn til, at der kan være unøjagtighed på dosering af såvel kalkhydrat som af sand.

I kalkmørtel er det kalkhydratet, der er bindemidlet, eller den virksomme del af kalken. Herudover kan der findes andre faste stoffer som fx flint eller hårdtbrændt kalk. Ved dosering er det således nødvendigt at have kendskab til indholdet af kalkhydrat i den læskede kalk. Findes kalkhydratindholdet at være 91 pct., skal der for at få fx 50 kg kalkhydrat anvendes $50 : 0,91 = 55$ kg kalk. De øvrige 5 kg af kalken, som ikke er virksomt bindemiddel, skal

forudsættes at være tilslagsmateriale. Det er endvidere nødvendigt at kende vandindholdet i sandet, da vådt sand fylder og vejer mere end tørt.

På et mørtelværk kontrolleres jævnligt, at kalkhydratindholdet i den leverede kalkmørtel befinder sig inden for de tilladte grænser i forhold til mængden af tilslagsmateriale (sand og uirksom kalk). Ved leveringen vil en K-mørtel være færdig til brug, medens der til en KC-mørtel skal iblandes cement.

Ved cementblandingen på byggepladsen er det nødvendigt at kende vandindholdet i den kalktilpassede mørtel. Dersom vandindholdet ikke er angivet ved leveringen fra mørtelværket, må det bestemmes på en prøve ved vejning før og efter udtørring:

$$\text{Vandindhold i pct.} = \frac{V\ddot{a}dv\ddot{a}egt - T\ddot{o}rv\ddot{a}egt}{T\ddot{o}rv\ddot{a}egt} \cdot 100$$

Ud fra kendskab til vandindholdet kan tørmassen af delmaterialerne beregnes, og derefter kan det fastsættes, hvilken cementmængde der skal tilsættes en given mængde kalktilpasset mørtel - under hensyntagen til vandindholdet. For hver kg cement skal anvendes $1 k/c$ kg kalkhydrat og $1 s/c$ kg tørt sand. Idet der skal tages hensyn til vandindholdet ω pct, skal der til 1 kg cement anvendes

$$\frac{k + s}{c} \cdot \frac{100 + \omega}{100} \text{ kg kalktilpasset mørtel}$$

Eksempel

For KC 60/40/850 indeholder den kalktilpassede mørtel

$$\frac{k}{k + s} = \frac{60}{60 + 850} = 6,6 \text{ pct. kalkhydrat}$$

eller

$$\frac{k + s}{k} = \frac{910}{60} = 15,2 \text{ kg mørtel indeholder 1 kg kalkhydrat.}$$

Med 12 pct. vand vil

$$\frac{k + s}{k} \cdot \frac{100 + 12}{100} = 17,0 \text{ kg mørtel indeholder 1 kg kalkhydrat.}$$

For hvert kg cement skal der anvendes

$$\frac{k}{c} \text{ kg kalkhydrat eller}$$

$$\frac{k}{c} \cdot \frac{k + c}{k} \cdot \frac{100 + 12}{100} = 25,5 \text{ kg kalktilpasset mørtel (med 12 pct. vand).}$$

For andet fugtindhold og andre KC-mørtler se [14].

Tørmørtel

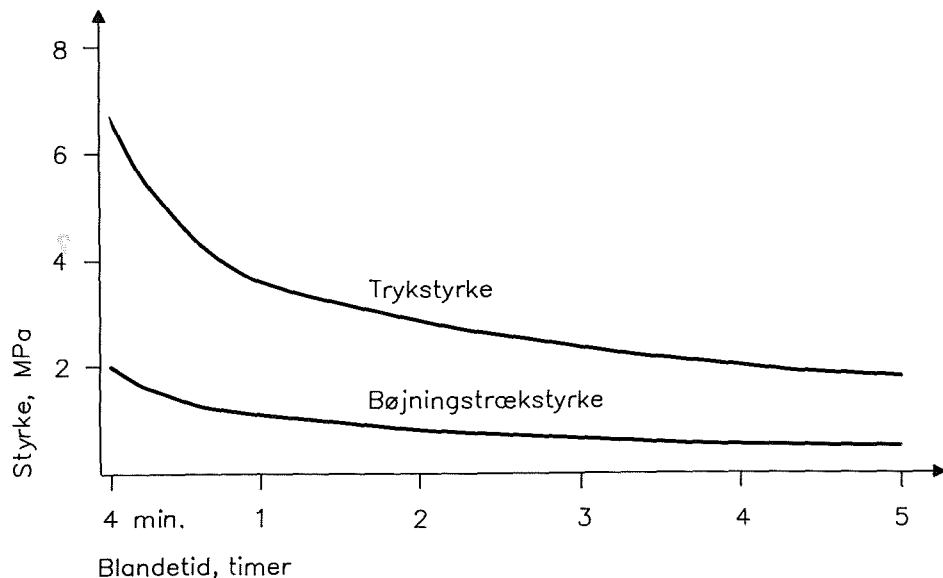
Tørmørtel er en blanding af alle de tørstoffer - bindemidler, sand og eventuelle tilsætningsstoffer - som indgår i mørtlen.

Det er nødvendigt ved fremstilling af tørmørtel at tørre det indgåede sand - ikke alene af hensyn til udmåling af sandmængden, men også fordi fugt vil ødelægge bindemidlerne. Indgår kalk i bindemidlet vil det være i form af hydratkalk (brændt kalk, som netop er læsket med den nødvendige mængde vand). Der anvendes ofte tilsætningsstoffer i tørmørtel, fx for at smidiggøre mørtlen. Styrken af sådan mørtel skal dokumenteres.

Tørmørtler sammensættes og blandes på fabrik, således at der kun skal tilsættes vand inden anvendelsen. Der må aldrig sættes tilsætningsstoffer til færdige tørmørtler, uden at virkningen er kendt, men der kan godt tilsættes ethanol som frysepunktssænkende middel.

Blanding af mørtel

For at opnå en god mørtel skal den foruden at være korrekt sammensat også være ensartet. Derfor skal mørtlen blandes på maskine i passende tid. Blandetiden afhænger af maskinens udformning, men der regnes normalt med en blandetid på mindst 4 minutter. Forsøg har vist, at hvis blandetiden forøges væsentligt, så falder mørtlens styrke; således vil en blandetid på 1 time medføre, at mørtelstyrken halveres, se figur 13. Dette skyldes, dels at bindemidlerne begynder at afbinde i blandemaskinen, dels at der blandes luft ind i mørtlen. I DS 414 angives derfor, at blandetiden ikke bør være længere end 15 minutter.



Figur 13. Mørtelstyrker som funktion af blandetiden.

Mørtels egenskaber

Frisk mørtel

Den friske mørtel skal af hensyn til anvendelsen være smidig. Smidigheden er foruden til tilslagsmaterialets kornkurve også knyttet til bindemidlerne, fordi de virker som smøremiddel mellem tilslagsmaterialets korn. Smidigheden tiltager med mængden af bindemiddel, idet der dog er forskel på de forskellige bindemidlers smøreevne, fx er kalkrig mørtel mere smidig end cementrig mørtel. Der er således i cementmørtel en ringe indre kohæsion, og det betyder, at mørtlen ikke hænger sammen, når den skifter form ved at blive udlagt under muringen. En sådan mørtel betegnes af mureren som "kort".

To andre vigtige egenskaber hos den friske mørtel er tendensen til vandudskillelse og forringet vandholdeevne. En lille vandudskillelse er et udtryk for, at mørtlen har en god evne til at stå i baljen uden at sætte vand op, hvilket normalt er tilfældet for de smidigste mørtler. Vandholdeevnen er et udtryk for mørtlens evne til at holde på vandet, fx når den kommer i kontakt med sugende mursten. Mørtel med et stort cementindhold har lille vandholdeevne. Der er normalt ingen forbindelse mellem vandudskillelsen og vand-

holdeevnen. Hvis mørtlen begynder at blive stiv inden bindemidlerne begynder at afbinde kan det skyldes, at vandet fordamper fra baljen, men det kan også skyldes, at tilslagsmaterialet indeholder tørre og sugende korn. En tredje mulighed er falsk afbinding af cementen, der i visse tilfælde skyldes cementens indhold af gips. Den falske afbinding sker hurtigt, men ophæves ved genblanding, hvorefter afbindingen foregår normalt. I ingen af tilfældene må der tilsættes yderligere vand, da det forringer mørtlen. Mørtlens brugstid er ikke afhængig af, om den bliver stiv, men af hvornår bindemidlerne begynder at afbinde.

Kalkmørtel kan opbevares i lang tid efter blandingen, hvis den holdes godt fugtig, idet mørtlen først afbinde, når luften får adgang til kalkhydrat. Hydrauliske mørtler, som er tilsat vand, skal være anvendt inden for kort tid, fordi bindemidlet straks begynder at afbinde efter blandingen.

Hærdnet mørtel

I den hærdnede mørtel skal bindemidlerne virke som en lim, der skaber sammenhæng mellem de enkelte korn i tilslagsmaterialet og mellem mørtel og sten. Styrken og rumfangsbestandigheden af denne lim er i de fleste tilfælde mindre end for tilslagsmaterialet. Derfor bør der ikke anvendes mere bindemiddel i en mørtel end foreskrevet. Hvis det eventuelt er nødvendigt af hensyn til bearbejdigheden, kan man i stedet for overskud af bindemiddel overveje at anvende et egnet tilsætningsstof.

Mørtels styrke, elasticitetsmodul og densitet

Mørtelstyrken bestemmes ved bøjning af små stænger, med målene 25 mm · 25 mm · 170 mm (eventuelt 20 mm · 20 mm · 120 mm). Efter bestemmelsen af mørtelstængernes bøjningstrækstyrke findes trykstyrken ved at bestemme brudlasten under kvadratiske lejeplader med sidelinie på 25 mm (20 mm). Mørtlens styrke bestemt på denne måde anvendes som kontrol af mørtlen i laboratoriet, men har kun lille relation til styrken af det murværk, hvortil mørtlen anvendes.

Elasticitetsmodulen vokser sædvanligvis med trykstyrken. K-mørtel har en E -modul på ca. 3.000 MPa medens C-mørtel har $E \sim 20\text{-}30.000$ MPa. Elasticitetsmodulen for en KC-mørtel ligger mellem disse værdier. For referencemørtlerne kan der ikke forudsættes en brudtøjning på mere end 0,2 pct.-0,4 pct.

For de traditionelle mørtler varierer densiteten fra 1700 kg/m³ for kalkmørtel til 2200 kg/m³ for ren cementmørtel. Densiteten for en KC-mørtel ligger mellem disse to grænser.

Murværk

Murværk kan betragtes som et konstruktionsmateriale, som består af byggesten placeret i forbandt med mørtel mellem de enkelte sten.

Som følge af mørtelfugernes forløb - gennemgående vandrette fuger og afbrudte lodrette fuger - er murværk et anisotrop materiale. Anisotropien forstærkes af fugeforskelle, idet de vandrette fuger - liggefugerne - under opmuringen bliver komprimeret af de ovenliggende sten, medens de lodrette fuger - studsfugerne - kun bliver komprimeret med håndkraft.

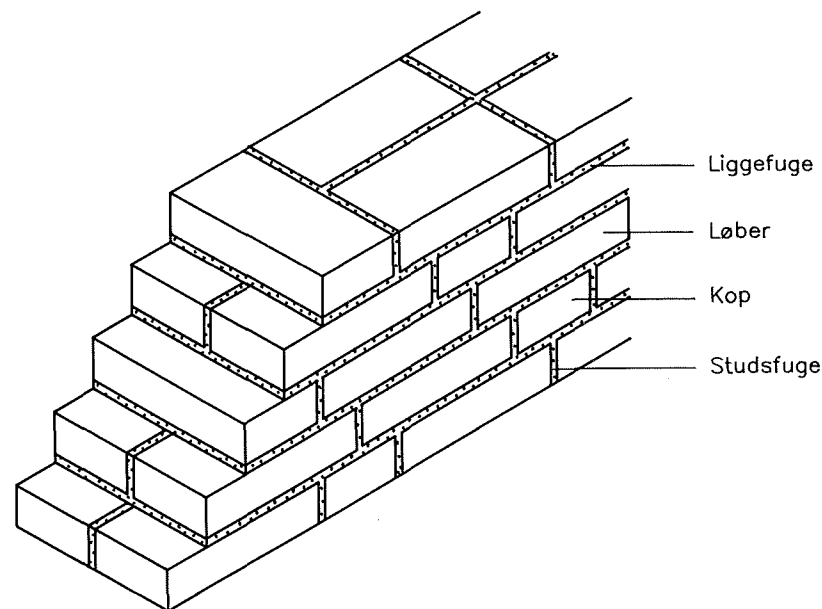
Murværks forbandt

Forbandtet er det "system", hvorefter stenene placeres. Forbandtet vælges ofte på grund af udseendet, men skal samtidig udformes sådan, at der bliver sammenhæng i murværket. Normalt kræves det derfor, at studsfugerne i to på hinanden følgende skifter ikke ligger lige over hinanden, men er indbyrdes forskudt mindst $\frac{1}{4}$ sten - eller $\frac{1}{4}$ blok. Herved opnås samtidig en større styrke over for revnedannelse, fordi eventuelle revner enten må følge den længere vej gennem svage fuger eller gå gennem stenene.

Sten, der lægges i murens længderetning, kaldes løbere. I massive mure af mursten med tykkelse af 1 sten eller mere skabes der normalt effektiv forbindelse på tværs af muren med kopper eller stenbindere, som er sten, der er placeret vinkelret på murens længderetning. På figur 14 er vist et eksempel med såkaldt munkeforbandt, hvor der er 25 stenbindere per m^2 . I DS 414 forudsættes, at der i massive mure anvendes et forbandt med mindst 20 stenbindere per m^2 . Anvendes et forbandt med et mindre antal bindere skal der udføres forsøg, som kan dokumentere at murværkets styrke vil være tilstrækkelig.

Murværks længdeændringer

I det følgende behandles især de længdeændringer, der skyldes fugt- og temperaturvariationer. Derimod ses der bort fra svind og sætninger, der sker under og umiddelbart efter opmuringen, og som normalt ikke giver anledning til problemer.



Figur 14. Eksempel på forbandt af 1-stens mur (munkeforbandt). Kopperne virker som bindere, der giver sammenhæng i murværket på tværs. Studsfugerne er forskudt mindst $\frac{1}{4}$ sten indbyrdes, hvilket giver sammenhæng på langs.

Fugtvariationer

For murværk af tegl medfører forskellen mellem tør og vandmættet tilstand en længdeændring mellem 0,07 mm per m og 0,2 mm per m, afhængig af murstenenes porøsitet og udtøringsforholdene.

For nogle teglarter foregår desuden en fugtbinding, der medfører en længdeudvidelse, som fortsætter i mange år efter opmuringen. Dette fænomen er afhængig af lerarten og er kun i mindre omfang konstateret for danske teglsten.

Alle cementbundne byggematerialer svinder ved udtørring efter produktionen. Disse permanente længdeændringer, der skyldes carbonatisering, fortsætter i mange år, medmindre materialet er meget tørt eller vandmættet.

De reversible længdeændringer, der skyldes almindelige fugtændringer, er størst for porebeton, mindre for letbeton med porøse tilslag og mindst for beton med almindelige tilslag. Højere cementindhold medfører større længdeændringer. Længdeændringerne vil typisk være for porebeton: 0,8 mm-2,0 mm per m, for letbeton med porøse tilslag: 0,4 mm-0,8 mm per m og for almindelig beton: 0,2 mm-0,5 mm per m [5].

Murværk bliver opført med frisk mørtel, og svindet heri vil påvirke konstruktionen. I murværket vil stenene søge at hindre længdeændringer i fugerne, og omvendt vil fugerne søge at hindre længdeændringer i stenene.

Temperaturvariationer

Varmeudvidelse er for murværk af tegl eller moler: 0,005 mm-0,007 mm per m per °C og for murværk af cementbundne materialer: 0,006 mm-0,013 mm per m per °C.

Det er almindeligt antaget, at de termiske bevægelser i murværk svarer til længdeændringerne i stenene, det vil sige, at de regnes uafhængige af fugematerialet, og at længdeændringerne er ens horisontalt og vertikalt.

Horisontale termiske sammentrækninger i stenene medfører ikke nødvendigvis, at murværket sammentrækkes, idet der kan opstå revner mellem sten og fuger. Vertikalt medfører temperaturændringer altid længdeændringer.

I skalmure vil længdeændringerne følge de gennemsnitlige temperaturvariationer i hele murværksnittet, medens lokale temperaturvariationer i murens overflade ved vekslende solbestråling ikke direkte afspejler sig i murens bevægelser. Mørke sten vil selvfølgelig suge mere varme til sig end lyse, og derfor opnå højere temperaturer i murens midte - med deraf følgende større længdeændringer.

Krybning

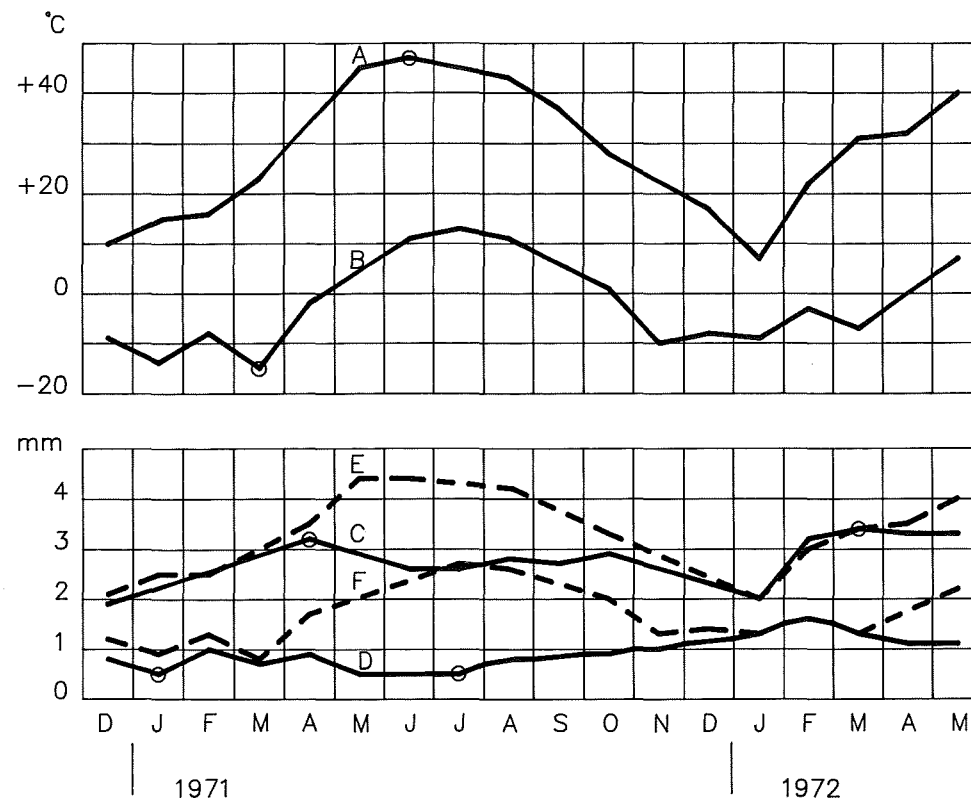
Krybning i murværk er et forholdsvis upåagtet fænomen. Krybning i cementholdige mørtler, cementbundne byggesten og almindelig beton skyldes en kombination af fugttransport og ændringer i den afbundne cement under lastpåvirkning. Krybning i teglprodukter ligner krybning i de cementbundne materialer, selv om strukturen i de brændte teglsten afviger fra strukturen i cementmaterialerne.

Størrelsesordenen, af den endelige krybning for murværk af letbeton, er bestemt til 0,5 mm-0,6 mm per m ved et spændingsniveau på $0,4 \cdot f_c$ [5].

Sammensatte længdeændringer

Den største temperaturvariation i selve murværket i løbet af et døgn bliver ofte 30 °C eller mere (august). For en skalmur med en højde på 11 m svarer dette til en lodret længdeændring på ca. $11000 \cdot 30 \cdot 6 \cdot 10^{-6} = \text{ca. } 2 \text{ mm}$.

Den største årlige temperaturvariation er en del større, og blev et år i følge figur 15 fx fundet til 62 °C (-16 °C i marts og +46 °C i juni). Denne



Figur 15. Målte temperaturer og længdeændringer på en sydvestvendt 11 m høj skalmur af røde teglsten. A og B angiver henholdsvis største og mindste temperatur målt i vægmidten den pågældende måned. E & F angiver tilsvarende højeste og laveste højdeniveauer for skalmurstoppen bestemt ved beregning. De målte niveauer C og D blev imidlertid fundet noget lavere, fordi luftens relative fugtighed delvis modvirker temperaturvariationernes indflydelse [6].

temperaturvariation kunne have medført en længdeændring på ca. 4 mm, men skalmuren bevægede sig en del mindre. Forskellen forklares ved, at den relative fugtighed udendørs er størst om efteråret og vinteren, men aftager i løbet af foråret således, at den laveste værdi optræder i maj og juni. Det lavere fugtindhold betyder en reduktion af murens forlængelse i den varme periode. Samtidig er den relative fugtighed indendørs lav om vinteren og høj om sommeren. Dette medfører normalt, at bagmurens fugtbevægelser delvis

følges med skalmurens årstidsbetingede temperaturbevægelser, således at de indbyrdes bevægelser mellem skalmur og bagvæg yderligere reduceres.

Længdeændringer, der stammer fra det relative fugtindhold i den omgivende luft, modvirker således delvis længdeændringerne fra temperaturvariationerne over årtiderne. I praksis kan det være vanskeligt at skelne, om længdeændringerne hidrører fra temperatur- eller fugtvariationer, og de angives derfor normalt under ét som temperaturbetingede ændringer. I DS 414 er temperaturdifferensen mellem ydervangen og den bagved liggende vange i en dobbeltmurskonstruktion fastsat til mindst 35 °C, idet denne værdi inkluderer ydervangens relative fugtbevægelser. De tilsvarende længdeudvidelseskoefficienter er i DS 414 angivet for murværk opført med de traditionelle mørtler, se tabel 5. Tabellen er baseret på normale fugt- og temperaturbevægelser.

Tabel 5. Længdeudvidelseskoefficienter i °C⁻¹ for murværk.

Sten- eller blokmateriale	Længdeudvidelse
Beton	12 · 10 ⁻⁶
Kalksandsten	10 · 10 ⁻⁶
Letklinkerbeton	12 · 10 ⁻⁶
Moler	6 · 10 ⁻⁶
Porebeton	12 · 10 ⁻⁶
Tegl	6 · 10 ⁻⁶

Murværks holdbarhed

Murværks holdbarhed er betinget af det omgivende miljø, hvor de væsentligste faktorer er temperatur- og fugtforhold samt tilstedeværelsen af eventuelle aggressive stoffer.

Temperatur- og fugtpåvirkninger giver længdeændringer, der kan medføre revnedannelser i murværket. I svag mørtel, fx kalkmørtel (som normalt ikke mere anvendes udendørs), vil revnedannelsen medføre mange, små revner, der sædvanligvis ikke betragtes som skadelige. For murværk med cementholdig mørtel vil revnerne derimod udløses på svage steder, og her normalt blive så store, at de bliver skadelige både for udseendet og for murværkets holdbarhed. De skadelige virkninger kan reduceres ved en hensigts-

mæssig udformning af konstruktionen, men for murværk med cementholdig mørtel er det altid nødvendigt at overveje placering af dilatationsfuger.

Murværks frosthæthed vurderes normalt på grundlag af stenenes og mørtlens egenskaber. Murværk betragtes som et holdbart materiale, men der findes mursten, som ikke er frosthæde. Da der ikke findes pålidelige prøvningsmetoder til vurdering af frosthætheden, må brugeren basere sig på erfaringer med anvendelse af byggestenene, se side 20. Kravene til frosthætheden bliver større når stenene er særlig udsat for fugtbelastning, fx i rullskifter.

Fuger af de traditionelle referencemørtler betragtes som vejrfaste under normale forhold - forudsat at de er korrekt udført, det vil sige, at fugerne foruden at være helt fyldte også skal være så komprimerede i muroverfladen, at de har en tæt struktur. I modsat fald vil fugen være porøs, således at den kan suge så meget vand, at den kan fryse i stykker. I områder med megen slagregn, fx nær kyster, vil de cementrige mørtler ofte være de bedst egnede. Det samme gælder også i syreholdig atmosfære, der vil være skadelig for mørtlens kalkindhold.

Murværkets holdbarhed er afhængig af fugtbelastningen, og holdbarheden forøges når konstruktionerne er udformet således, at fugtoptagelsen reduceres mest muligt. Blandt andet derfor er der i DS 414 foreskrevet, at der skal indlægges en fugtstandsende membran overalt, hvor der er mulighed for, at murværket kan opsuge vand. Således skal der altid lægges en membran ved oversiden af fundamentet. Endvidere er ydermure ikke altid vandtætte over for slagregn. Specielt i dobbeltmure (fx i skalmure) er det derfor vigtigt, at vand som trænger ind gennem formuren atter bliver ledt ud. Det vil sige, at overalt hvor hulrummet afbrydes, fx ved vinduers overside, skal der indlægges en fugtstandsende membran. Vandet kan ledes ud til facaden ved at udelade mørtel i enkelte studs-fuger ved oversiden af membranen. Membranen ved fundamentets overside får således en dobbelt funktion.

Fugtbelastningen på ydermure kan reduceres ved anvendelse af store tagudhæng, der derfor altid anbefales.

Murværks holdbarhed kan blive truet af opløselige salte. Når murværket bliver opfugtet, vil de opløselige salte blive transporteret frem mod murværkets overflade, hvor de bliver aflejret når vandet fordamper. Saltene kan blive aflejret i porerne umiddelbart bag overfladen, hvor salttrykket efterhånden kan blive så stort, at det sprænger murstenenes overflade, og dermed forårsager, at murværket ødelægges. I andre tilfælde kan saltene aflejres på overfladen, hvorfra de letopløselige salte senere kan blive skyllet væk af slag-

regn, medens de tungtopløselige salte forbliver på overfladen, hvor de skæmmer udseendet. Salte kan være ført ind i murværket af overfladevand ved opugning. Det gælder fx klorider (fx kogsalt), der har været anvendt ved afisning fx af altangange. Salte i mørtlen kan stamme fra uegnede tilsætningsstoffer, men er oftest sulfater (fx gips), som stammer fra mørtlens cement. Salte i teglsten kan også stamme fra råleret, idet de pågældende salte ikke er gået i forbindelse med de øvrige bestanddele under brændingen.

Byggestenenes indflydelse på murværkets styrke

Sædvanligvis vil murværks styrke vokse med stenenes styrke, således at murværk opført med sten af højere stenklasse/blokkasse opnår større trykstyrke og stivhed med samme mørteltype. Dette gælder imidlertid kun, når det drejer sig om sten med i øvrigt uændrede egenskaber. Det kan således forekomme, at forskellige stensorteringer, som er karakteriseret ved at være af samme klasse, giver murværk af forskellig trykstyrke. Dette kan have flere årsager, fx at stenenes trækstyrker er forskellige, fordi huludformningen ikke er den samme, eller at stenene har forskellige sugeevner.

Stenenes porøsitet har indflydelse på murværkets styrke, især på trækstyrken (vedhæftningen), idet stenene under opmuringen vil suge noget vand til sig fra kontaktfladen med mørtlen. Samtidig vil lidt bindemiddel og filler fra tilslagsmaterialet trækkes med, således at der skabes sammenhæng mellem sten og fuger. Når mørtlen derefter mister sin smidighed ved at være sugt mere eller mindre død, må stenen ikke røres, før mørtlen er afbundet, og dermed har opnået en vis styrke. I modsat fald vil der ikke blive etableret nogen sammenhæng i murværket. Hvis stenenes minutsugning er stor, og mørtlens vandholdeevne er lille, kan mørtlen miste sin smidighed så hurtigt, at stenene ikke kan flyttes blot få sekunder efter placeringen. Andre forhold kan medføre, at sammenhængen mellem sten og fuger ikke etableres. Stærkt sugende sten kan suge så meget vand fra mørtlen, at der ikke er tilstrækkelig vand i kontaktfladen til cementens afbinding, hvorved adhæsionen mellem sten og fuger ikke bliver etableret, og murværkets styrke bliver mindre end forudsat. Tilsvarende kan det for mere moderat sugende sten på en varm sommerdag ske, at de ophedede sten ikke alene suger vand fra mørtlen, men også får det til at fordampe så hurtigt, at adhæsionen til fugen ikke etableres. For at modvirke, at stenene suger for meget vand fra mørtlen, kan stenene forvandes inden muringen. En sådan forvanding foreskrives altid for blokke af porebeton, som er stærkt sugende. Forvanding har også tidligere været sædvane for stærkt sugende mursten af tegl [2]. I dag bruges forvan-

ding kun, når der ønskes en stor vedhæftning mellem sten og fuger, fx i armerede teglbjælker.

Sten med ringe sugeevne, fx klinkbrændte mursten, eller sten, som under ugunstige vejrforhold er blevet isbelagt, kan også være årsagen til ringe eller ingen sammenhæng i kontaktfladen. Ved muring i frostperioder skal stenenes sugeevne være så stor, at de er i stand til at suge mørtlen død for vand inden afbindingen indtræffer, fordi der ellers er risiko for, at vandet i den tynde mørtelfuger fryser, og derved ødelægger mørtlen og medfører manglende forbindelse mellem sten og fuger.

Stenenes sugeevne er i det foregående kun omtalt kvalitativt, idet der ofte er en relativt stor spredning på sugeevnen i de enkelte sten i en sortering. I virkeligheden er det vedhæftning mellem sten og fuger, som ønskes klarlagt og maksimeret.

Stenenes format har indflydelse på murværkets styrke, idet høje byggesten betyder relativt færre fuger. Når antallet af fuger er aftagende, vil murværkets trykstyrke nærme sig byggestenenes styrke. Dette er for eksempel tilfældet for murværk af blokke, hvor antallet af liggefuger kun er 1/3 i sammenligning med tilsvarende murværk af mursten i normalformat.

Mørtelfugernes indflydelse på murværket

Mørtelfugerne har flere funktioner i murværket. Fugerne skal udligne ujævnheder mellem de enkelte sten og skabe tæthed i den færdige konstruktion. Dertil kommer at fugerne skal skabe sammenhæng mellem de enkelte sten, således at murværket kan udgøre et hele. Fugetykkelsen bør ikke være for stor, idet murværkets styrke aftager med voksende fugetykkelse. Modsat må fugetykkelsen for mursten ikke være for lille af hensyn til fugefyldningen.

Sædvanligvis vil murværkets styrke vokse med mørtlens styrke, men kun under forudsætning af i øvrigt ensartede forhold. To forskellige mørtler med samme styrke kan medføre forskellig styrke af murværket, hvis den ene mørtel fx er iblandet et tilsætningsstof, som reducerer adhæsionen til stenene.

Karbonatiseringen af kalkmørtel tager først fart, når vandindholdet er mindre end 7 pct. I rene kalkmørtler opnås dette først efter længere tids udtørring, men i KC-mørtler fremmes kalkens karbonatisering fordi cementen forbruger vand under afbinding og hærdning.

Murværkets styrke vokser alt andet lige med tiltagende cementindhold i mørtlen, både på grund af tiltagende fugestyrke og tiltagende adhæsion mellem sten og fuger [7]. Til gengæld er cementholdige mørtler ikke så smidige, og derfor tungere at mure med. Mørtlernes vandholdeevne aftager med vok-

sende cementindhold. Mørtler med stort cementindhold kan derfor være risikable at anvende i forbindelse med stærkt sugende sten, medmindre stenene bliver forvandet.

Fugearbejdet har ligesom mørtelkvaliteten en afgørende indflydelse på murværkets tæthed, styrke og holdbarhed, specielt skal fugerne være helt fyldte. Endvidere skal fugerne være komprimerede i overfladen, således at de er vejrfaste. Komprimeringen kan foregå under opmuringen, når fugerne trykkes med passende værktøj inden mørtlen har mistet sin plasticitet. Hvis fugernes trykning ikke sker før mørtlen er suget død, fx på grund af kraftig udtørring fra vejrliget eller ved kraftigt sugende sten, skal fugerne færdiggøres ved udkradsning og efterfølgende fugning. I DS 414 kræves, at udkradsningen skal være til mindst 13 mm dybde, og fugen skal rengøres og forvandes inden fugningen. Uanset hvilken metode der vælges, skal udførelsen afpasses efter vejrliget og materialernes egenskaber (dvs. stenenes sugsevne og mørtlens konsistens/vandholdeevne). Fugning må ikke udføres i frostperioder, fordi mørtlen i de små dimensioner fryser igennem for hurtigt og derfor bliver ødelagt.

Murværks styrkeegenskaber

Når murværk udsættes for lodret tryk vil der ske en sammentrykning i lastens retning samtidig med en udvidelse vinkelret herpå. Tøjningerne sker i både sten og mørtel, men når mørtlen er den mindst stive, vil den udvide sig mere i tværretningen end stenene, se figur 16. Det medfører, at fugerne under voksende lodret last vil påvirke stenene med trækkræfter i tværretningen, og hvis trækstyrken overskrides, vil der opstå lodrette revner i stenene. Den spænding, hvorved de første sten begynder at revne, kaldes revnespændingen. Den vil altid være mindre end brudstyrken, der først indtræffer når revnedannelserne har nået et vist omfang.

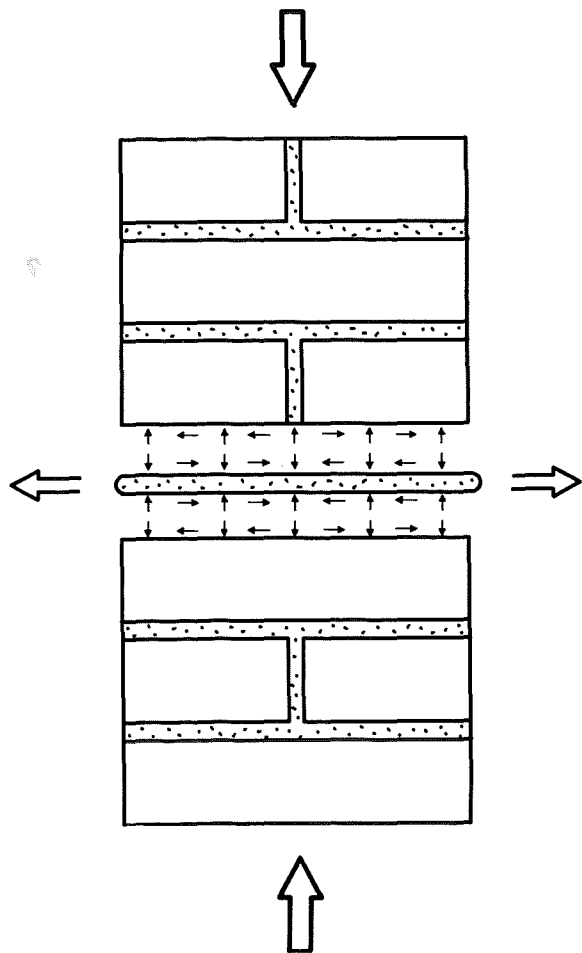
I tilfælde hvor mørtlen har en stor stivhed i forhold til stenene, kan mørtlen forhindre tværudvidelse af stenene og derved hæmme dannelsen af revner, indtil trykket fra studs-fugerne bliver så stort på de svagere sten, at de klippes over. Også i dette tilfælde vil murværkets brudstyrke være større end revnestyrken.

Murværks styrke er således foruden af stenenes og mørtlens trykstyrker afhængig af stenenes trækstyrke og af stenenes og mørtlens indbyrdes stivhedsforhold - og adhæsionen mellem mørtel og sten.

Det viser sig ved forsøg, at når stenenes styrke fastholdes, vil revnespændingen vokse med mørtlens styrke, og når mørtlens styrke fastholdes, vil revnespændingen vokse med stenenes styrke. Dette forhold medfører ofte, at murværks styrkeegenskaber fastlægges alene på grundlag af de to komponenters styrkeegenskaber. Denne fremgangsmåde kan imidlertid kun anvendes med stor usikkerhed, fordi der ud over styrkerne ikke bliver taget hensyn til de mange andre parametre, der indvirker på styrken.

Murværks egenskaber bør derfor fastlægges på murede prøvelegemer således, at man bestemmer de to komponenters samlede virkning som byggemateriale.

Murværks styrkeforhold blev tidligere fastsat ved prøvning af etagehøje mure, men sådanne store prøvelegemer er kostbare samtidig med, at prøvningen er tidsrøvende. Forsøg har imidlertid vist, at der er en god sammenhæng mellem bæreevnen af etagehøje vægge og den styrke, som findes på små, murede prøvelegemer. Murværks bæreevne kan således fastlægges ud fra de såkaldte basisstyrker, der defineres som styrken af standardiserede prøvelegemer opmuret af et mindre antal byggesten.



Figur 16. Snit i muret prøvelegeme, hvor en enkelt fuger er skåret fri. Når murværk udsættes for tryk vinkelret på liggefugerne vil fuger, som er mindre stive end stenene, udvide sig mere i tværretningen, og derfor påvirke stenene med trækkræfter på tværs. I sådanne tilfælde kan stenenes trækstyrke være afgørende for murværkets trykstyrke.

Basisstyrker

Basisstyrkerne omfatter trykstyrke og bøjningstrækstyrker, bestemt på snit henholdsvis parallelt med og vinkelret på liggefugerne. Prøvelegemernes størrelse er beskrevet i standardblade, og er forskellige for mursten og blokke, og de er forskellige for bestemmelse af trykstyrken og trækstyrkerne.

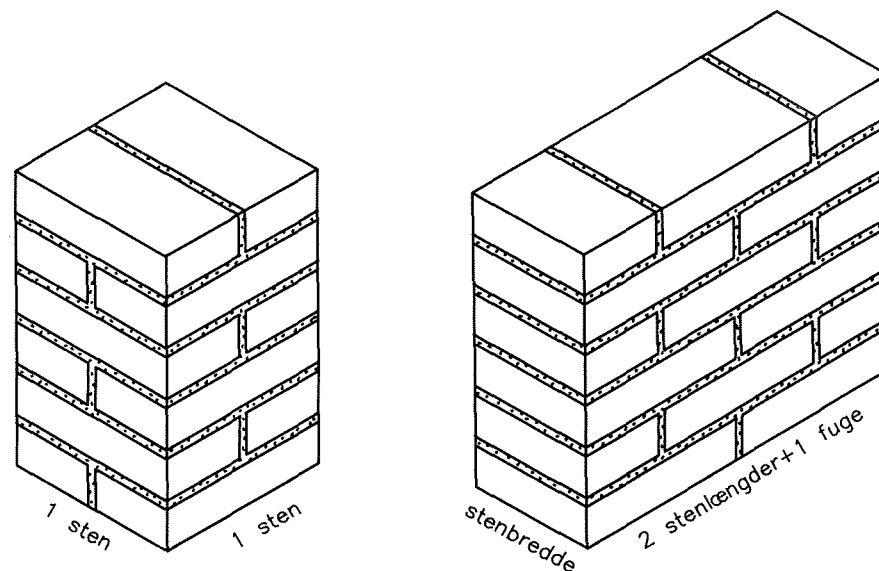
Foruden at give et ensartet grundlag til bestemmelse af murværks styrke medfører brugen af basisstyrker også, at det er økonomisk overkommeligt at undersøge virkningen af fx ændrede delmaterialer.

Basistrykstyrke

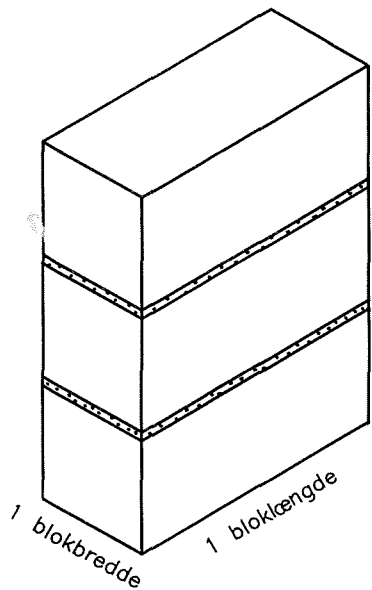
Basistrykstyrken bestemmes ved tryk vinkelret på liggefugerne.

For murværk af mursten bestemmes basistrykstyrken f_{cn} som 6-stensstyrken, f_{c6} , det vil sige styrken af 6 skifter høje prøvelegemer. For mursten, der kan mures i regelmæssigt forbandt i begge retninger, fx dansk normalformat, er prøvelegemet kvadratisk med sidelinen 1 sten, se figur 17, til venstre. For mursten, der ikke kan mures i regelmæssigt forbandt i begge retninger, fx bredstensformater, er prøvelegemets bredde den samme som murstenens, medens længden svarer til 2 stenslængder + 1 fuger, se figur 17, til højre. I begge tilfælde anvendes der 12 sten til et prøvelegeme. Prøvningsmetoden er beskrevet i DS 438.14.

For murværk af blokke bestemmes basistrykstyrken som 3-bloksstyrken, f_{c3} , det vil sige styrken af 3 skifter høje, murede prøvelegemer. Prøvelegemets længde og bredde er den samme som blokkens længde og bredde, se figur 18. Prøvningsmetoden er beskrevet i DS 438.2.



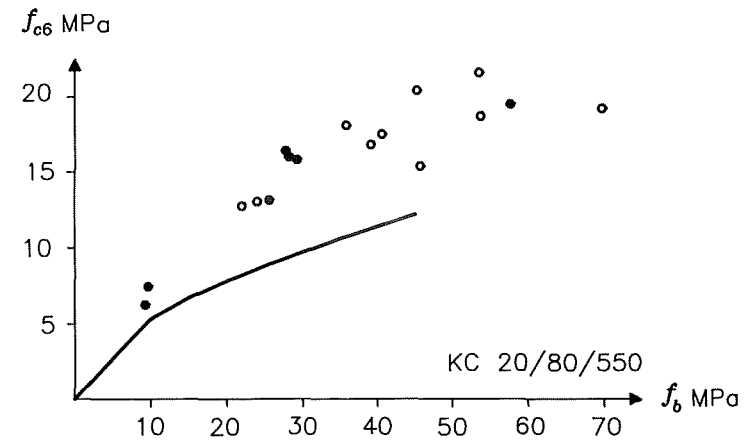
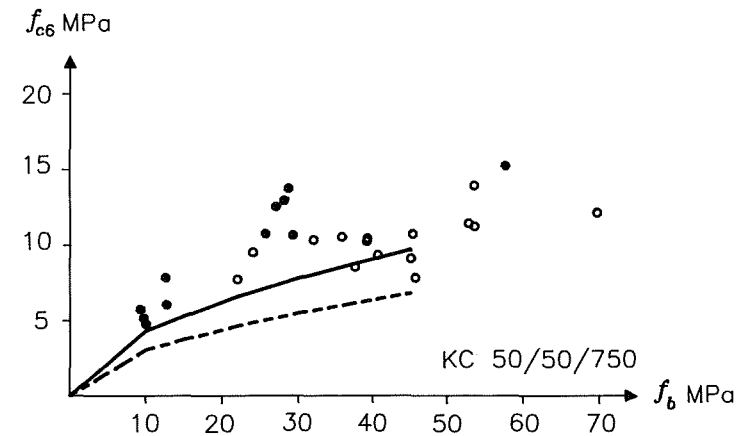
Figur 17. Murede prøvelegemer til bestemmelse af basistrykstyrken for murværk af mursten. For mursten, som kan mures i regelmæssigt forbandt i begge retninger - fx dansk normalformat - anvendes prøvelegemet til venstre. For andre mursten - fx bredstensformat - anvendes prøvelegemet til højre.



Figur 18. Prøvelegeme til bestemmelse af basistrykstyrken for murværk af blokke.

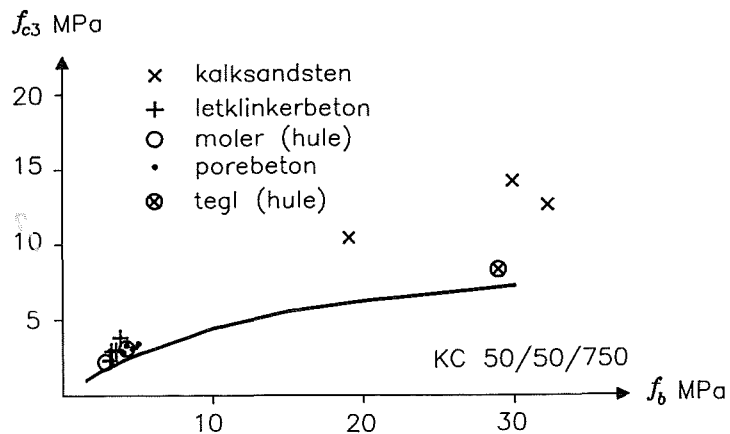
Trykstyrken parallel med liggefugerne antages at være mindre end trykstyrken vinkelret på liggefugerne, men den er sjældent af interesse, og der er på nuværende tidspunkt ikke udarbejdet en prøvningsmetode til bestemmelse heraf.

Basistrykstyrken er blevet undersøgt for murværk af danske byggesten og danske mørtler. For en række mursten af tegl er prøvningsresultaterne for murværk i henholdsvis KC 50/50/750 og KC 20/80/550 vist på figur 19, idet trykstyrken f_{c6} er vist i afhængighed af stenklassen f_b . På figuren er endvidere vist kurver, der angiver den karakteristiske basistrykstyrke ifølge de værdier, som er oplyst som vejledning i DS 414. Disse værdier kan bruges i de tilfælde, hvor basisstyrken ikke er deklareret eller bestemt ved forsøg. Det fremgår, at selv om en højere stenklasse ofte medfører en større basistrykstyrke, så er der ikke en entydig sammenhæng mellem stenklassen og basistrykstyrken. Normen har alligevel valgt, at angive de vejledende styrkeværdier som funktion af stenklasse (og mørteltype) fordi denne værdi kendes, og den er simpel at anvende. Normens angivelser er selvfølgelig på den sikre side, således at det i praksis - specielt ved større byggeopgaver - i mange tilfælde kan være fordelagtigt at bestemme basistrykstyrken for de valgte sten og den ønskede mørteltype.



Figur 19. 6-stensstyrker som funktion af stenklassen. ● angiver massive sten, ○ angiver hulsten. Kurverne viser murværksnormens værdi for den karakteristiske 6-stensstyrke, fuldt optrukken kurve for massive sten, punkteret kurve for hulsten. For KC 20/80/550 angiver normen samme basisstyrker for massive sten og hulsten [F2] og [F3].

Forsøgsresultaterne viser, at for murværk opført med KC 50/50/750 er basistrykstyrken for hulsten lavere end for massive sten af samme stenklasse, medens denne forskel ikke gør sig gældende for murværk af KC 20/80/550. Forholdet forklares ved, at ved den svage mørtel er stenenes trækstyrke af-



Figur 20. Basistrykstyrken f_{c3} som funktion af blokklassen. Kurven viser murværksnormens værdi for den karakteristiske 3-bloks-styrke. Der skelnes ikke imellem massive blokke og hulblokke [F1].

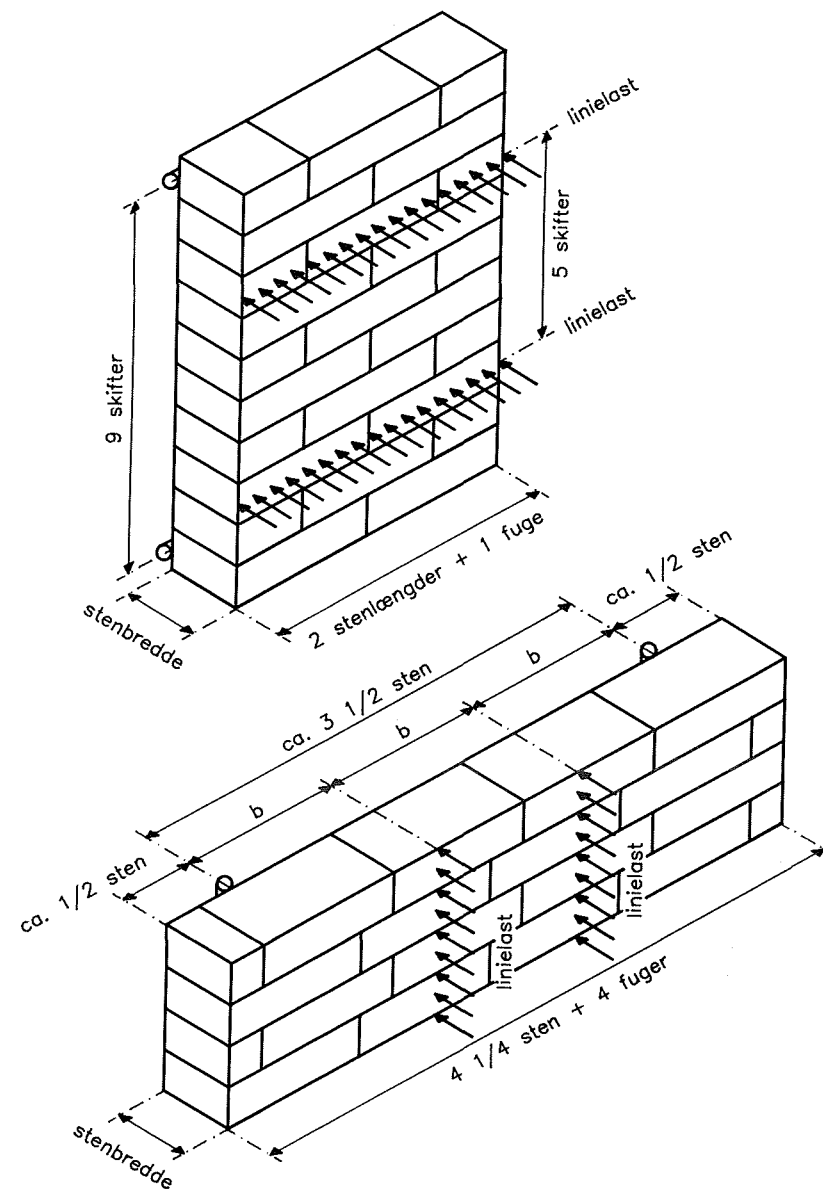
gørende for murværkets styrke, se figur 16, og trækstyrken er lavere for hulsten end for massive sten. Det samme forhold gør sig ikke gældende ved den stærke mørtel, der virker som armering over tværsnittet. I DS 414 skelnes der ved brug af KC 20/80/550 ikke mellem hulsten og massive sten, mens der for alle svagere mørtler skal regnes med, at basisstyrken for murværk af hulsten er 0,7 gange den tilsvarende styrke for murværk af massive sten. På figur 19 øverst er normens vejledende basisstyrker for murværk med hulsten og KC 50/50/750 vist med en punkteret kurve.

På figur 20 er vist de tilsvarende forsøgsresultater og normens vejledende værdier for murværk af forskellige blokke opført i KC 50/50/750.

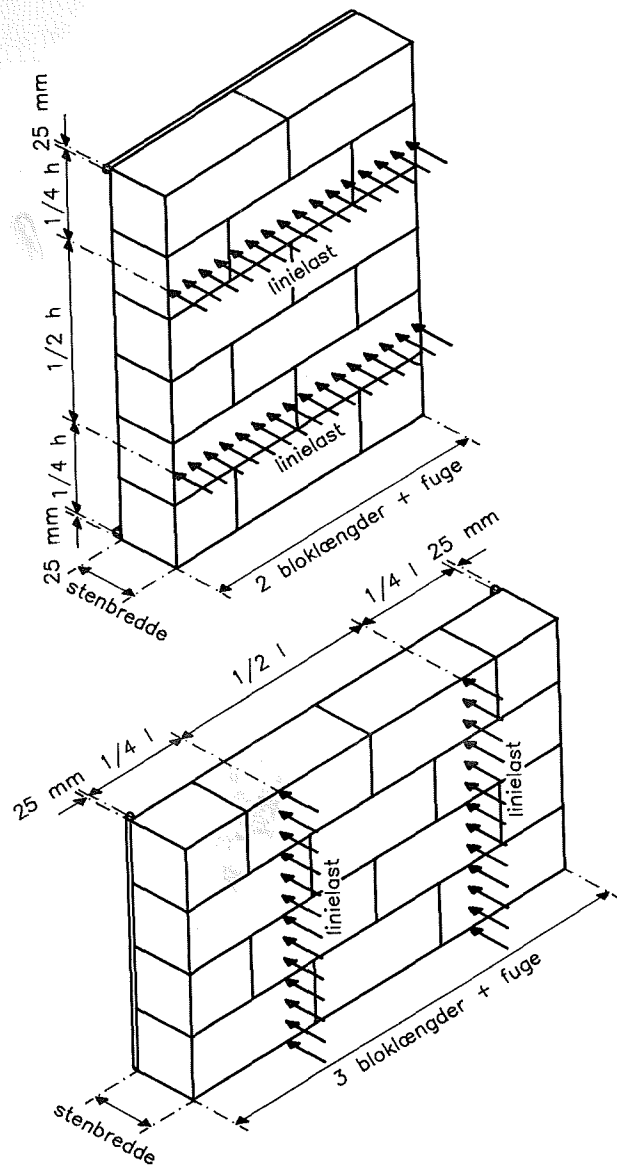
Basistrækstyrker

Basistrækstyrkerne bestemmes ved bøjning om to akser i murens plan henholdsvis parallel med en liggefuge, f_h (bøjningstrækstyrken i liggefugerne), og vinkelret på en liggefuge, f_v (bøjningstrækstyrken i studsfigurerne).

For murværk af mursten er prøvelegemernes størrelse vist på figur 21. Prøvningsmetoden er beskrevet i DS 438.15. For murværk af blokke er prøvelegemernes størrelse vist på figur 22. Prøvningsmetoden er beskrevet i DS 438.3.



Figur 21. Prøvelegemer til bestemmelse af basistrækstyrkerne for murværk af mursten. Prøvelegemet foroven er til bestemmelse af bøjningstrækstyrken i liggefugerne og for neden til bestemmelse af bøjningstrækstyrken vinkelret på liggefugerne (i studsfigurerne).



Figur 22. Prøvelegemer til bestemmelse af basistrækstyrkerne for murværk af blokke. Foroven prøvelegeme til bestemmelse af bøjningstrækstyrken i liggefugerne og forneden vinkelret herpå.

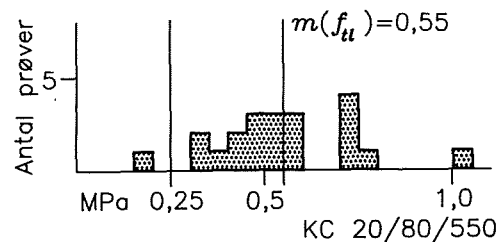
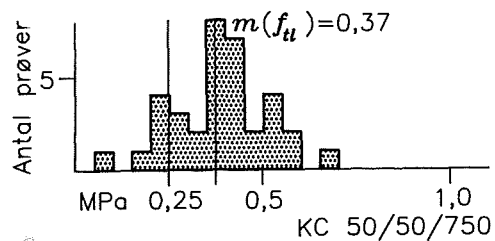
Trækstyrken ved bøjning om en akse parallel med liggefugerne er afhængig af adhæsionen mellem fuger og sten.

Trækstyrken ved bøjning om en akse vinkelret på liggefugerne er yderligere afhængig af friktion mellem fuger og sten. Friktionens størrelse er afhængig af, hvor stor forskydning der er imellem studsfugerne i de enkelte skifter. Prøvningsmetoden er baseret på $\frac{1}{4}$ stens forskydning. Når denne trækstyrke også kaldes bøjningstrækstyrken i studsfugerne, er det kun af mnemotekniske årsager for at erindre om bøjningsretningen - der kan ikke etableres trækstyrke i selve studsfugen.

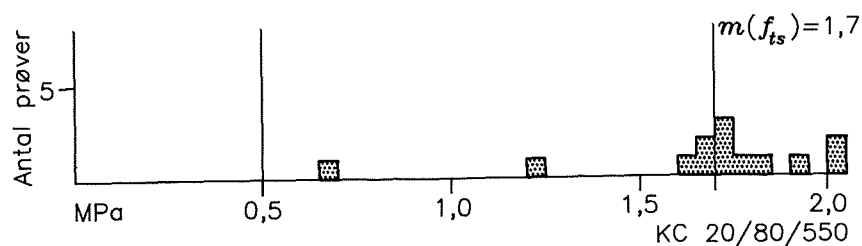
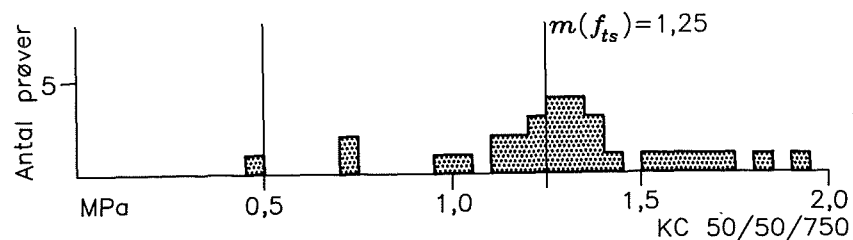
Bøjningstrækstyrken parallelt med liggefugerne afhænger normalt ikke af stenklassen, men udtrykker snarere mørtelkvaliteten og mørtlens adhæsion til stenene. For svage sten, det vil sige sten lavere end stenklasse 10, kan bruddet dog ske i stenene.

Denne adhæsion er især afhængig af stenenes sugsevne og mørtlens vandholdeevne. Prøvningsresultaterne for bøjningstrækstyrken i liggefugerne for en række stærkt sugende, massive mursten opført i henholdsvis KC 50/50/750 og KC 20/80/550 er vist i figur 23. Figuren viser resultaternes fordeling og middelstyrke. Det fremgår, at middelstyrken er størst for den cementrige mørtel. I DS 414 er den karakteristiske bøjningstrækstyrke i vejledningen angivet til $f_{tk} = 0,25$ MPa for byggesten af tegl i stenklasse 10 eller større og for byggesten af letbeton i blokklasse 2,5 eller større.

De tilsvarende prøvningsresultater for bøjningstrækstyrken i studsfugerne er vist på figur 24. Også i dette tilfælde er middelstyrken størst for den cementrige mørtel. I DS 414 er den karakteristiske bøjningstrækstyrke i vejledningen angivet til $f_{tsk} = 0,50$ MPa for byggesten af tegl i stenklasse 10 eller større og for byggesten af letbeton i blokklasse 2,5 eller større.



Figur 23. Bøjningstrækstyrken f_u i liggefuger. Søjlediagrammerne viser fordeling af prøvningsresultaterne for murværk af tegl. Bøjningstrækstyrken er normalt ikke afhængig af stenklassen.



Figur 24. Bøjningstrækstyrken f_{ts} i studsfuger. Søjlediagrammerne viser fordeling af prøvningsresultaterne for murværk af tegl. Bøjningstrækstyrken er ikke afhængig af stenklassen.

Arbejdslinien for tryk

De tøjninger, som et prøvelegeme undergår, når det udsættes for spændinger, fremstilles grafisk i et tøjning/spænding-kordinatsystem. Kurven kaldes arbejdslinien for prøvelegemet, fordi arealet under kurven er lig det arbejde, der skal udføres på volumenenheden for at præstere den målte deformation. Når der er proportionalitet mellem spændinger σ og tøjninger ϵ bliver arbejdslinien en ret linie, og materialet siges at følge Hookes lov. Dette betyder, at $\sigma = E \epsilon$, hvor E er en konstant. E kaldes elasticitetsmodulen, og den angiver arbejdsliniens hældning.

For trykpåvirket murværk vokser tøjningerne lige fra begyndelsespunktet relativt mere end spændingerne. Det betyder, at arbejdslinien bliver krum hele vejen til brud, der sker pludseligt, hvorfor murværk siges at være et skørt materiale. På figur 25 er vist syv eksempler på arbejdslinier for tryk bestemt på standardprøvelegemer, se figur 17.

Det fremgår af forsøgsresultaterne, at udover at brudstyrken for murværk opmuret i KC 20/80/550 er større, end for de samme sten opmuret i KC 50/50/750, så er stivheden for murværk af hulsten i stærk mørtel ofte større end stivheden for murværk af massive sten, medens brudstyrken for hulsten i den svage mørtel KC 50/50/750 er væsentlig mindre end for de samme sten i KC 20/80/550. Dette kan måske skyldes, at i forbindelse med den svage og mindre stive mørtel er stenene udsat for trækpåvirkning på tværs, se figur 16 - og trækstyrken for hulsten er mindre end for massive sten.

Elasticitetsmoduler

For materialer med krum arbejdslinie kan en retliniet elasticitetsmodul indføres, enten som sekantmodulen eller tangentmodulen.

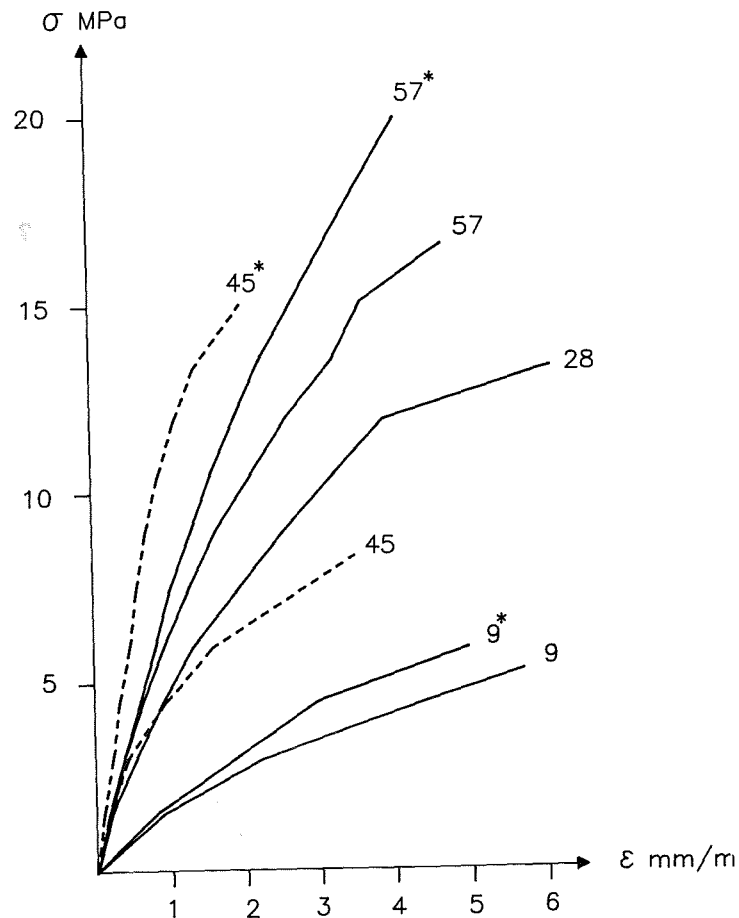
Sekantmodulen angiver hældningen af sekanten fra begyndelsespunktet til et nærmere fastsat punkt på arbejdslinien

$$E_c = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

og denne sekant kan anvendes som en retliniet tilnærmelse af den krumme arbejdslinie.

Tangentmodulen angiver hældningen af tangenten til et nærmere fastsat punkt på arbejdslinien

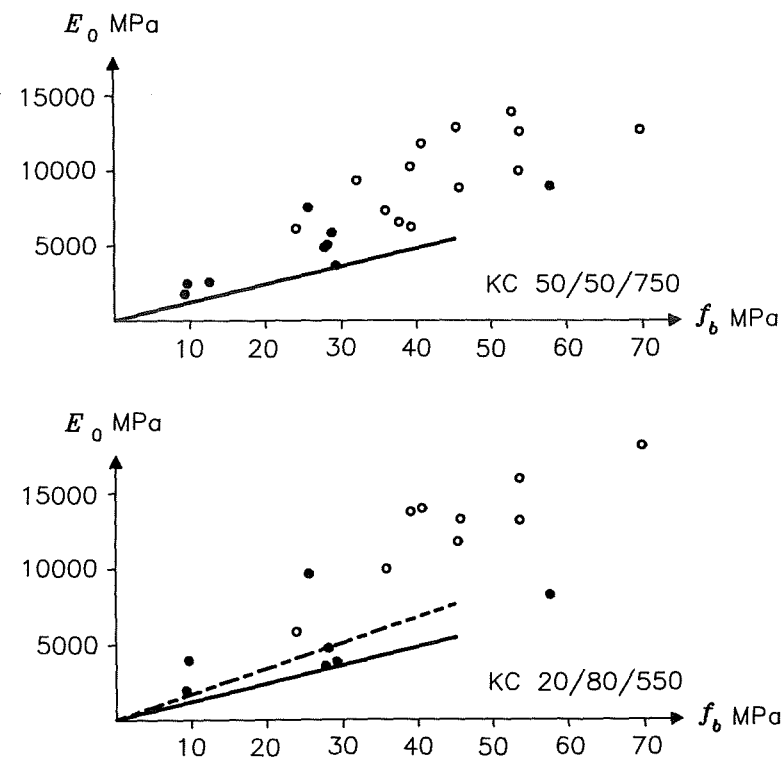
$$E_o = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (2)$$



Figur 25. Trykarbejdslinier for syv udvalgte standard-prøvelegemer; se figur 17. Fuldt optrukne arbejdslinier markerer prøvelegemer af massive sten, mens punkterede arbejdslinier markerer prøvelegemer af hulsten. Tallene ved enden af arbejdslinierne angiver stenklassen. Hvis der er anført en * ved tallet, er mørteltypen KC 20/80/550; ellers er den KC 50/50/750. [F3].

og den angiver forholdet mellem spændinger og tøjninger i et lille område omkring punktet. Specielt kaldes tangentmodulen i begyndelsespunktet for E_0 .

For murværk bestemmes begyndelseselasticitetsmodulen E_0 sædvanligvis samtidig med basistrykstyrken. For de prøvelegemer, hvis basistrykstyrke blev angivet i figur 19, blev der fundet de værdier af E_0 , som er vist på figur 26. I DS 414 er for E_0 angivet vejledende værdier i tabelform i afhængighed af stenklassen eller blokklassen. Disse værdier kan bruges i de tilfælde, hvor E_0 ikke er deklareret eller bestemt ved forsøg. De er også vist på figur 26.



Figur 26. Elasticitetsmodulen E_0 som funktion af stenklassen f_b . Punkterne for prøvningsresultaterne angiver henholdsvis ● massive sten og ○ hulsten. Kurverne viser murværksnormens vejledende værdier for den karakteristiske modul, idet fuldt optrukket kurve angiver massive sten, punkteret kurve hulsten. For KC 50/50/750 angiver normen samme værdi for elasticitetsmodulen for massive sten og hulsten. [F2] og [F3].

Normeret arbejdslinie

I det følgende undersøges et udtryk for en variabel tangentmodul, som er foreslået af W. Ritter [11].

$$E_{\sigma} = \frac{E_0}{f_c} (f_c - \sigma) = E_0 \left(1 - \frac{\sigma}{f_c}\right) \quad (3)$$

σ er trykspændingen i punket
 f_c er materialets trykbrudstyrke.

Dette udtryk indsættes i udtrykket for tangentmodulen (2), hvorefter

$$d\epsilon = \frac{1}{E_0} \frac{1}{1 - \frac{\sigma}{f_c}} d\sigma$$

som ved integration bliver

$$\epsilon = -\frac{f_c}{E_0} \int \frac{1}{1 - \frac{\sigma}{f_c}} d\left(1 - \frac{\sigma}{f_c}\right) = -\frac{f_c}{E_0} \ln\left(1 - \frac{\sigma}{f_c}\right)$$

idet den arbitrære konstant bliver nul.

Ved indførelse af Rittertallet

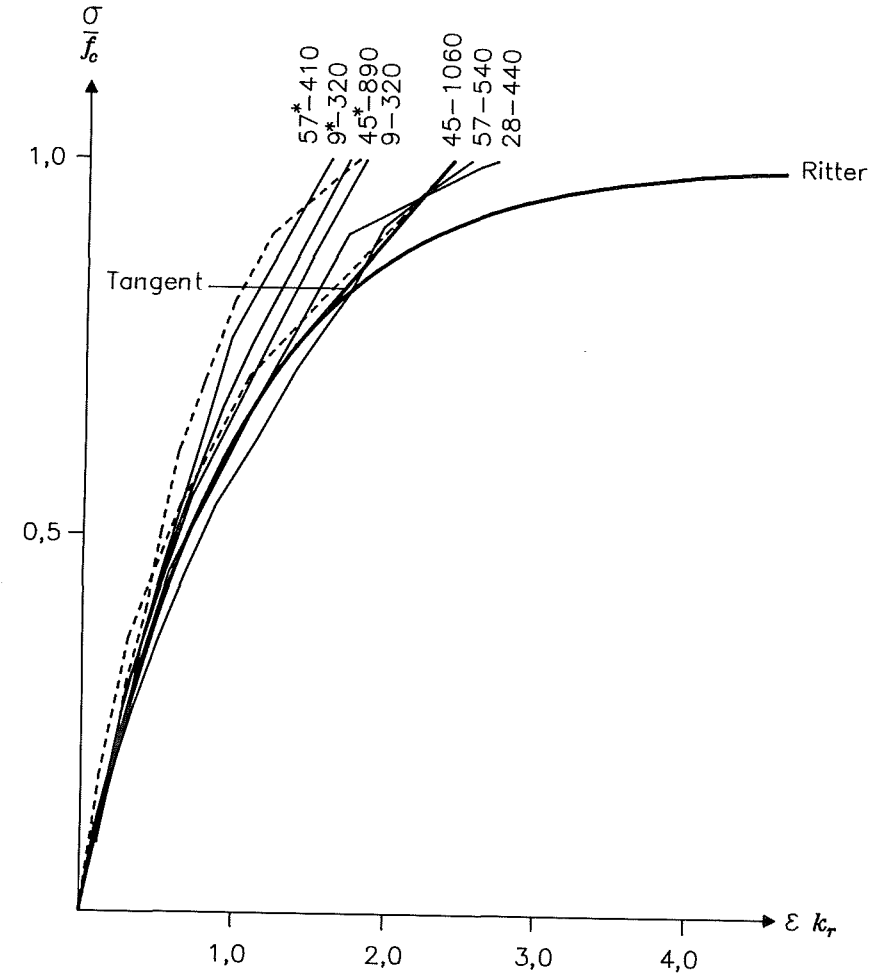
$$k_r = \frac{E_0}{f_c} \quad (4)$$

kan resultatet skrives

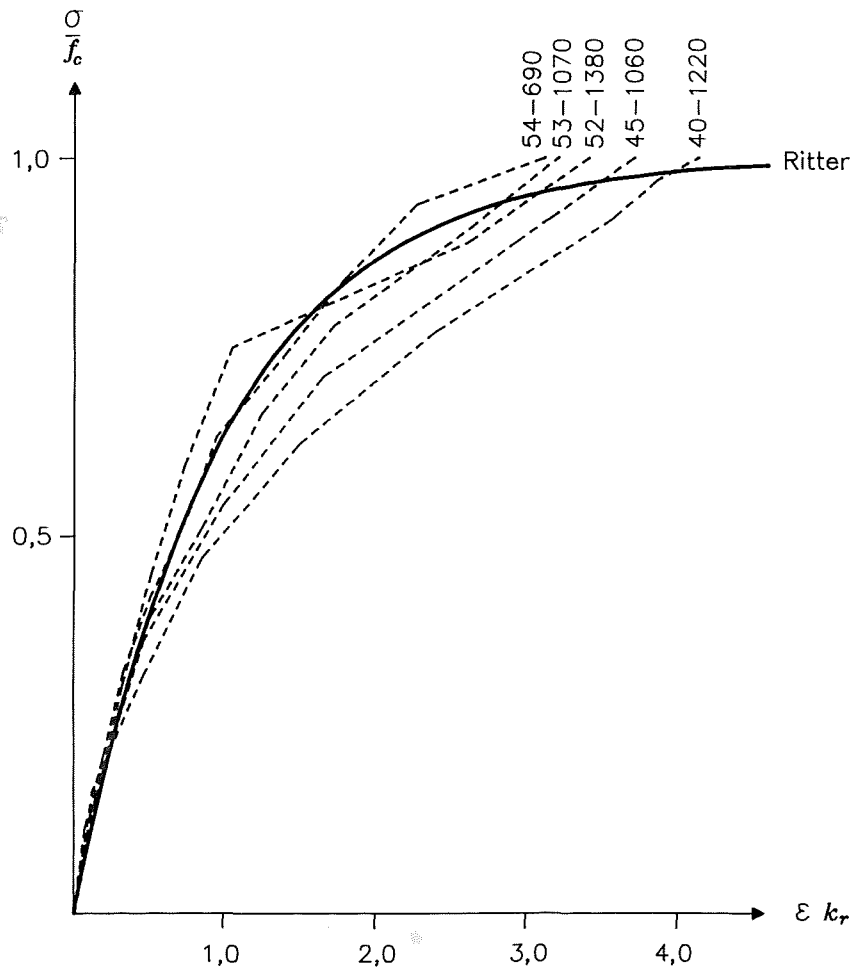
$$k_r \epsilon = -\ln\left(1 - \frac{\sigma}{f_c}\right) \quad (5)$$

Dette udtryk giver en sammenhæng mellem to dimensionsløse værdier, som henholdsvis kan kaldes den normerede tøjning $k_r \epsilon$ og den relative spænding σ/f_c . Den grafiske afbildning af (5), kaldes Ritterkurven, og arbejdslinien repræsenteret af relative spændinger og normerede tøjninger kaldes i det følgende for den normerede arbejdslinie.

På figur 27 er vist de normerede arbejdslinier svarende til de arbejdslinier, der blev vist i figur 25. På figuren er desuden vist Ritterkurven. De normerede arbejdslinier for massive sten og for hulsten i KC 20/80/550 følger Ritterkurven ganske godt ved de mindre spændinger, men for de meget store relative spændinger fortsætter Ritterkurven mod uendelig med en vandret asymptote ved $\sigma/f_c = 1,0$, medens de normerede arbejdslinier

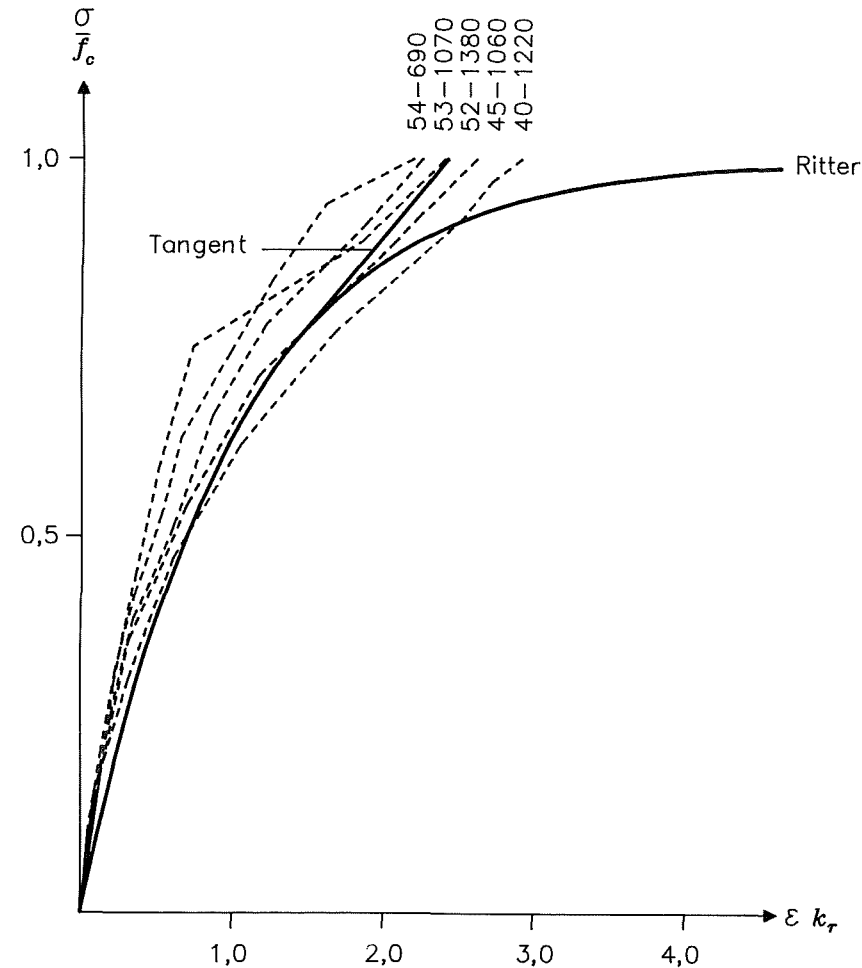


Figur 27. Normerede arbejdslinier for de samme prøvningsresultater, som blev vist på figur 25. De anførte tal angiver stenklassen - efterfulgt af Rittertallet. Murpiller som er opført i KC 20/80/550 er markeret med *, de øvrige murpiller er opført i KC 50/50/750. Kurverne for hulsten er vist punkteret. Den normerede arbejdslinie for hulsten i KC 50/50/750 er vist med en normeret tøjning lig $0,7 k_r \epsilon$. Ritterkurven ifølge (5) er vist med tyk streg.



Figur 28. Normerede arbejdslinier for forskellige hulsten i KC 50/50/750. De anførte tal angiver stenklassen - efterfulgt af Rittertallet. Tøjningerne er her større end i figur 27, men ved at gange dem med 0,7 vil også disse normerede arbejdslinier forløbe som de øvrige, se figur 29.

har brud ved en normeret tøjning ca. = 1,5 til 2,5. Da de viste arbejdslinier er baseret på enkeltværdier og ikke på middeltal af flere prøvningsresultater, er de normerede arbejdslinier godt sammenfaldende. For hulsten i svag mørtel (fx KC 50/50/750) er arbejdslinierne så krumme, at de ikke umid-



Figur 29. Normerede arbejdslinier for hulsten i svag mørtel - KC 50/50/750, idet tøjningerne er multipliceret med 0,7. Hermed forløber de som de øvrige arbejdslinier vist i figur 27. Det betyder, at de forskellige materialekombinationer kan behandles ens, men at tøjningerne for hulsten i svag mørtel er 1,4 gange større.

delbart kan sammenlignes med de øvrige, se figur 28, men ved at multiplicere den normerede tøjning for denne materialekombination med 0,7, falder de normerede arbejdslinier sammen med de øvrige, se figur 29. Det betyder, at det er muligt at vælge en nominel arbejdslinie for murværk.

Den nominelle arbejdslinie følger Ritterkurven for spændinger indtil $\sigma = 0,75 f_c$, og derefter Ritterkurvens tangent indtil brud. Denne tangent er vist både på figur 27 og figur 29. Herved opnås et formeludtryk for en nominel arbejdslinie, der bliver

$$\epsilon = -\frac{f_c}{E_0} \ln \left(1 - \frac{\sigma}{f_c}\right) \text{ for } \frac{\sigma}{f_c} \leq 0,75 \quad (5)$$

$$\epsilon = -\frac{4 f_c}{E_0} \left(0,403 - \frac{\sigma}{f_c}\right) \text{ for } \frac{\sigma}{f_c} > 0,75 \quad (6)$$

For hulsten opført i svag mørtel skal der regnes med tøjninger, som er 1,4 gange så store.

I almindelig dimensioneringspraksis er det for kompliceret at regne med krum arbejdslinie, men den fundne nominelle arbejdslinie kan imidlertid benyttes som udgangspunkt for fastsættelsen af en passende retliniet arbejdslinie.

Ved tværsnitsundersøgelser forudsættes at plane tværsnit forbliver plane, dvs. at tøjningen varierer retliniet over tværsnittet. Spændingsfordelingen over et trykket tværsnit har affinitet til den del af arbejdslinien, der svarer til det aktuelle tøjningsinterval. Ved at anvende en retliniet arbejdslinie opnås således en spændingsfordeling, som varierer retliniet (Hookes lov).

Hvis tøjningen varierer således, at den bliver nul eller tæt på nul nogle steder i tværsnittet, vil den bedste retliniede tilnærmelse være en sekant. Hvis tøjningen derimod kun varierer lidt over tværsnittet (i forhold til gennemsnitstøjningen), vil den bedste retliniede tilnærmelse være en tangent.

I praksis anvender man fx følgende arbejdslinier:

- tangent til Ritterkurven. Anvendes hvor spændingsvariationerne er små i forhold til spændingsniveauet, fx ved stabilitetsundersøgelse af centralt lastede søjler, "Rittersøjler",
- sekant til Ritterkurven, se figur 30. Anvendes hvor spændingsvariationerne er store, fx ved undersøgelse af tværsnit med bøjning (elastisk spændingsfordeling),
- trinkurve, se figur 31. Anvendes i mange brudberegninger (plastisk spændingsfordeling).

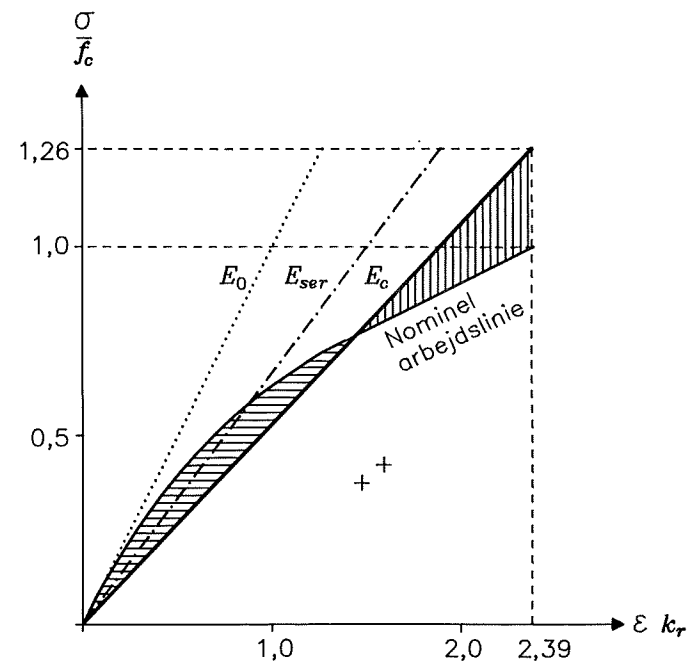
I det følgende redegøres for et princip ved valg af de parametre, der giver den præcise fastlæggelse af arbejdslinierne b) og c).

Udgangspunktet er, at arealet under arbejdslinien er et udtryk for det arbejde, som skal præsteres per volumenenhed af materialet for at fremkalde brud. De retliniede arbejdslinier fastlægges derfor således, at arealet under dem er lig med arealet under den nominelle arbejdskurve.

Elastisk spændingsfordeling

Der søges en sekant til den nominelle arbejdslinie, se figur 30. Når arealerne under de to kurver skal være ens, skal sekanten gå fra (0,0) til (2,39, 1,26). Det viser sig da, at tyngdepunkterne af de to arealer ligger rimeligt tæt på hinanden, se figur 30. Med en let afrunding kan man sætte den formelle bøjningstrykstyrke til

$$\sigma_{\max} = 1,25 f_c \quad (7)$$



Figur 30. Normeret arbejdslinie for elastisk spændingsfordeling. Den rette linie mærket E_c er en tilnærmelse for den nominelle arbejdslinie, idet arealet under den rette linie er det samme som under den nominelle arbejdslinie, defineret på grundlag af forsøgsvælsultaterne. Ved at anvende den retliniede arbejdslinie kan formelt regnes med en trykstyrke, der er 1,25 gange større end trykbrudstyrken f_c bestemt på centralt lastede piller (med ensformigt fordelt spænding). De to krydser er tyngdepunkter, som omtales i teksten.

hvor f_c er den styrke, som blev fundet ved standardprøvningen med ensformigt fordelt trykspænding.

Værdien af sekantmodulen blev på figuren fundet til

$$0,5 E_0$$

men da det for beregning af søjlers bæreevne er vigtigt ikke at anvende en for stor værdi reduceres den 25 pct. I murværksnormens vejledning er der således angivet

$$E_c = 0,375 E_0 \quad (8)$$

til brug ved søjleberegninger.

Til undersøgelser i anvendelsesgrænsetilstanden, hvor lasten altid er mindre end brudværdien, kan passende anvendes en sekantarbejdslinie, som skærer den nominelle arbejdslinie ved den halve trykstyrke, svarende til en sekantmodul

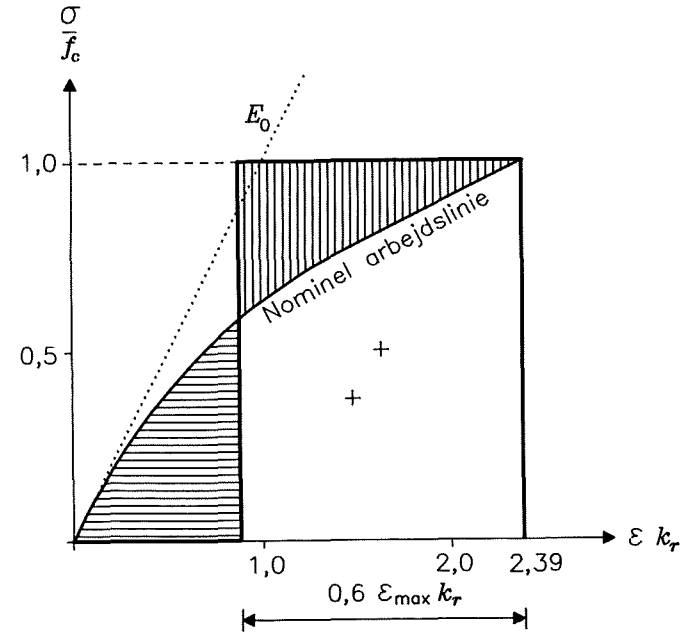
$$E_{ser} = 0,7 E_0 \quad (9)$$

Denne arbejdslinie er også vist på figur 30.

Plastisk spændingsfordeling

For materialer med udpræget flydespænding (med vandret forløb på arbejdslinien) forudsætter man ved undersøgelser i brudgrænsetilstanden ofte plastisk spændingsfordeling. Murværk har ikke nogen udpræget flydespænding, men dog en krum arbejdslinie, og da plastisk spændingsfordeling indebærer visse beregningsmæssige fordele, anvender man denne tilnærmelse fx i brudundersøgelser af armerede bjælker.

Der er tale om en rektangulær spændingsfordeling, som følge af en rektangulær arbejdslinie som vist på figur 31. I en situation med retliniet tøjningsfordeling fra nul til brudtøjningen fås en spændingsfordeling, der svarer til hele arbejdslinien, og en rimelig forudsætning er da, at arealerne under den nominelle og den plastiske arbejdslinie er ens. Dette kan fx opnås som vist på figur 31, hvor flydespændingen er sat lig med trykstyrken over et tøjningsinterval på ca. $0,6 \epsilon_{max}$.



Figur 31. Normaliseret arbejdslinie for plastisk spændingsfordeling. Rektangelbredden $0,6 \epsilon_{max}$ er bestemt ud fra højden $\sigma/f_c = 1,0$ og således, at arealet er det samme som arealet under den nominelle arbejdslinie. Tyngdepunkterne af de to arealer er vist med krydser.

Forskydningsstyrke

En væg kan betragtes som et todimensionalt legeme (en skive), og når den udsættes for last i væggen plan, siges den at være i en toakset spændingstilstand, se figur 32. Gennem et givet punkt kan der lægges uendeligt mange snit ("hele kompasset rundt"), og i hvert af disse snit optræder normal- og forskydningsspændinger. Spændingernes størrelser og fortegn varierer med snitretningen. Der kan ofte findes et snit, hvori normalspændingen er nul, og der kan altid findes to snit vinkelret på hinanden, de såkaldte hovedsnit, hvor forskydningsspændingerne er nul. I øvrigt er normalspændingerne i disse to hovedsnit, de såkaldte hovedspændinger, netop de maksimale og minimale normalspændinger i punktet. Ved forskydningsundersøgelse af murede vægge undersøger man dog ikke hovedsnittene, men kun vandrette og lodrette snit.

Forskydning i vandrette snit (parallelt med liggefuger)

Modstanden mod forskydning i et vandret snit (en liggefuge) består af et friktionsbidrag og et kohæisionsbidrag. Forskydningsstyrken f_v kan således udtrykkes ved

$$f_v = \mu \cdot \sigma_c + c \quad (10)$$

hvor

μ er friktionskoefficienten,
 σ_c er trykspændingen i snittet og
 c er kohæsionen (vedhæftningen), som kun må medregnes, hvis fugen er urevnet på det pågældende sted.

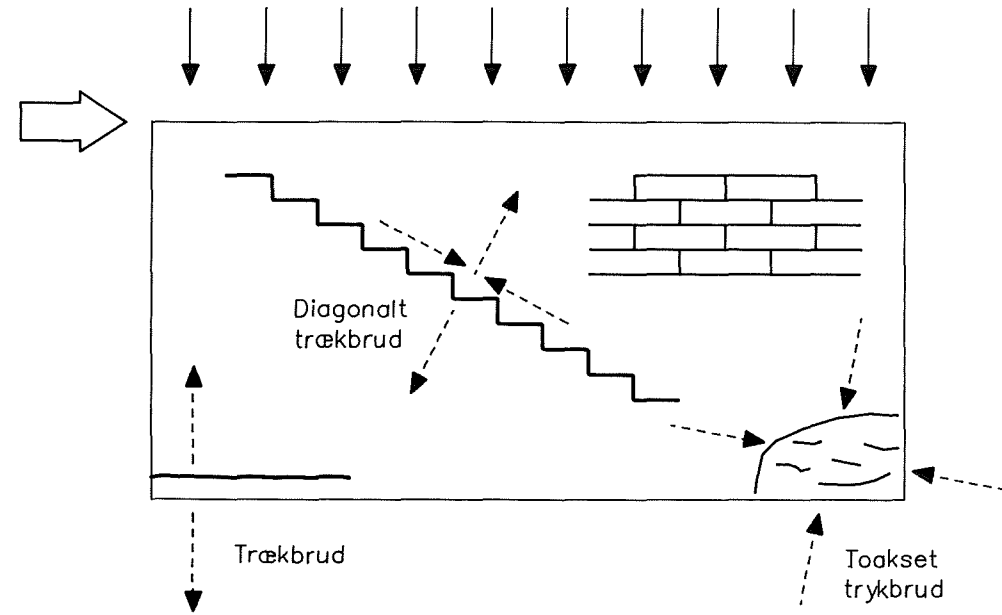
Fordelingerne af normal- og forskydningsspændinger hen over en vandret fuger er som regel forskellige. Hvis man regner murværket som et ideal-elastisk materiale, finder man en parabelformet fordeling af forskydnings-spændingerne, og en trapez- eller trekantformet fordeling af normalspændingerne, hvorved forskydningsstyrken varierer trapez- eller trekantformet. Hvis man derimod regner murværket som et idealplastisk materiale, finder man en trekantformet fordeling af forskydningsspændingerne, og en ensformig fordeling af normalspændingerne, hvorved forskydningsstyrken bliver konstant. En undersøgelse af, om forskydningsspændingen overalt er mindre end forskydningsstyrken, er altså ikke altid helt simpel.

Hvis man antager, at der ikke sker tryk- eller trækbrud i et lodret snit i muren, kan vandret forskydningsbrud kun udvikles, når hele fugen svigter på én gang. Det er derfor nærliggende at undersøge forskydningsbæreevnen på kraftniveau i stedet for at undersøge den på spændingsniveau. Det er da også en undersøgelse på kraftniveau, der er foreskrevet i murværksnormen DS 414, og den udtrykkes således:

$$V_d \leq \mu \cdot N_d + c \cdot A_c, \text{ dog max } A_c (0,6 \text{ MPa}) \quad (11)$$

hvor

V_d er den regningsmæssige forskydningskraft,
 μ er den regningsmæssige friktionskoefficient,
 N_d er den regningsmæssige tryknormalkraft i liggefugen,
 c er kohæsionen, og
 A_c er det regningsmæssige areal med trykspænding.



Figur 32. Mulige brudformer i en væg udsat for forskydning.

Normen angiver vejledende regningsmæssige værdier for kohæisions- og friktionskoefficienter, der kan anvendes, såfremt nøjagtige værdier ikke kendes, se tabel 6.

Tabel 6. Regningsmæssig friktionskoefficient og kohæsion.

Fugetype	μ	c MPa
Mørtelfuge	0,5	0,1
Mørtelfuge på plastfolie	0,3	0
Mørtelfuge på murpap	0,2	0

Forskydning i lodrette snit (vinkelret på liggefuger)

Ved forskydning vinkelret på liggefugerne forudsættes at styrken af studsfulgerne er forsvindende. Det vil sige, at forskydningsstyrken alene baseres på byggestenene. I praksis undersøges således det snit, der passerer det størst mulige antal studsfulger, og derefter findes den kraft, som jævnt fordelt skal regnes optaget af stenene.

Herved skal

$$V_d \leq \frac{1}{\gamma_m} k_m A_b f_b, \quad \text{dog max } A_b \text{ (0,8 MPa)} \quad (12)$$

hvor

A_b er byggestenenes tværsnitsareal

f_b er byggestenens trykstyrke (sten- eller blokkklasse)

k_m er en faktor, der i DS 414 er lig med 0,07 for tegl og 0,20 for letbeton.

Litteratur

- [1] Københavns etageboligbyggeri 1850-1900. En byggeteknisk undersøgelse. Jesper Engelmark, Statens Byggeforskningsinstitut. SBI-rapport 142. Hørsholm, 1983.
- [2] Kortfattet lærebog i husbygning. J. E. Gnudtzmann. København, Hagerup, 1888.
- [3] Byggematerialer IV. Lervarer. Mørtler. Beton. Kunststen. Glas. E. Suenson. København, Gjellerup, 1934.
- [4] Mørtel, muring, pudning. Teknologisk Håndbog. 2. udg. H. Dührkop, et al. Statens Byggeforskningsinstitut. SBI-anvisning 64. Hørsholm, 1981.
- [5] Moisture, thermal, elastic and creep properties of masonry. A state-of-the-art report. E. L. Jessop. I: Proceedings. Second Canadian Masonry Symposium, Ottawa, 1980. Carleton University, Ottawa, 1988. S.505-520.
- [6] Rörelser och temperaturförhållanden i skalmurar av tegel och kalksandsten. Leif G. Bergquist. I: Nordiskt symposium om murverkskonstruktioner, Stockholm, 1972. Dansk Ingeniørforening, et al., København, 1972. S.III:I-III:10.
og
Rörelser och temperaturförhållanden i skalmurer av tegel och kalksandsten. Leif Bergquist. I: 2. Nordiske Murværksymposium, Lyngby, 1975. Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby, 1975. S. 13100-13109.
- [7] Some factors affecting the bond strength of brickwork. L. R. Baker. I: Proceedings of the Fifth International Brick Masonry Conference, Washington, D.C., 1979. Brick Institute of America. S.84-89. McLean, VA., 1982.
- [8] Carrying capacity of masonry. Henry Høffding Knutsson. I: Proceedings of the Eighth International Brick and Block Masonry Conference, 1988, Dublin, Ireland. Vol. 1, s. 350-361. London, Elsevier, 1988.
- [9] The flexural strength of clay masonry determined from wallette specimens. H.W.H. West. I: Proceedings, Fourth International Brick-Masonry Conference, 1976, Brugge. Grocepeement National de l'Industrie de la Terre Cuite, Brussels, 1976. Section 4, s. 4.a.6-4.a.6-5.
- [10] Teknisk elasticitetslære. A. Ostfeld, København, Gjellerup, 1924.

- [11] Die Bauweise Hennebique. W. Ritter. Schweizerische Bauzeitung. XXXIII årg., nr. 7, s. 59-61. 1899.
- [12] Structural masonry. Sven Sahlin. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1971.
- [13] Spændinger i murede tværsnit. Svend Risager. I: 2. Nordiske Murværkssymposium, Lyngby, 1975. Danmarks Tekniske Højskole. S 12500-12511.
- [14] Teknisk Ståbi. 16. udg. København, Teknisk Forlag, 1991.

Forsøgsrapporter

- [F1] Blokmurværks bæreevne (Prøvningsrapport). Kalk- og Teglværkslaboratoriet. 1976.
- [F2] Murværks bæreevne (Prøvningsrapport KT 8680). Kalk- og Teglværkslaboratoriet. 1979.
- [F3] Bæreevne for murværk opført af mangelhulsten og massive sten. (Prøvningsrapport KT 10186). Kalk- og Teglværkslaboratoriet. 1984.
- [F4] Sandkurvens indflydelse på mørtels murtekniske egenskaber og styrke samt på murværks styrke ved anvendelse af tørmørtel uden tilsætningsstoffer (Prøvningsrapport). Kalk- og Teglværkslaboratoriet. 1988.
- [F5] Vurdering af mørtelsands kornkurver (Prøvningsrapport KT 13014). Kalk- og Teglværkslaboratoriet. 1989.

BYG-ERFA blade

- 860415 Forvitring af murværk fremkaldt af krystalliserende salte.
- 871218 Saltudblomstringer på murværk.

Danske standarder

- DS 409 Sikkerhedsbestemmelser (Norm)
- DS 410 Last på konstruktioner (Norm)
- DS 414 Murværkskonstruktioner (Norm)
- DS 424 Murcement (Norm)
- DS 427 Portlandcement og portlandflyveaskecement (Norm)
- DS 433 Letbeton uden tilslag (prøvningsmetoder)
- DS 434 Letbeton med porøse tilslag (prøvningsmetoder)

- DS 438 Blokke, mursten (prøvningsmetoder)
- DS 438.1 Blokkes densitet og trykstyrke
- DS 438.2 Bestemmelse af 3-bloksstyrken for tryk
- DS 438.3 Blokmurværks bøjningstrækstyrke
- DS 438.11 Murstens stenklasse
- DS 438.12 Murstens format
- DS 438.13 Murstens densitet, vandoptagelse og minutsugning
- DS 438.14 Murværks basistrykstyrke
- DS 438.15 Murværks basisbøjningstrækstyrker

Stikordsregister

3-bloksstyrke 45, 48
6-stensstyrke 45, 47
Almindelig kalk 22
Anvendelsesgrænsetilstanden 62
Arbejdslinien for tryk 53
Bakkesand 24
Basismål 17-19
Basisstyrke 44
Basistrykstyrke 45
Basistrækstyrke 48
Bindemiddel 22
Blandetid 31
Blokkes format 18
Blokkes trykstyrke 14
Blokkklasse 14
Blødstrøgne sten 12
Bredstensformat 16, 17
Bruttodensitet 20
Byggesten 12
Cement 23
Cementmængden (min) 28
Densitet 20
Dilatationsfuger 39
Elasticitetsmoduler 53
Elastisk spændingsfordeling 61
Farvestoffer 26
Filler 24
Forbandt 15, 34
Forskydningsstyrke 63
Friktionskoefficient 64
Friktionskoefficient og kohæsion 65
Frostfasthed 20, 39
Frysepunktssænkende midler 26
Fugearbejde 42
Fuger 16, 17

Fugetykkelse 18, 19
Fugtstandsede membran 39
Fugtvariationer 35
Grundmodul 16
Grænsekurver 25
Holdbarhed 38
Hulsten 12
Hydraulisk kalk 23
Hydraulisk mørtel 22
Hærdning 23
Håndstrøgne sten 12
Kalciumhydroxid 22
Kalciumsilikat 12
Kalkhydrat 22
Kalkmørtel 28
Kalktilpasset mørtel 28, 29
Karbonatisering 23, 41
K_h for hydraulisk kalk 27
Klorider 40
Komkurver 25
Krybning 36
Luftindblanding 26, 27
Luftindhold 26
Luftmørtel 22
Længdeændring 35, 36
Læskning 22
Mesterpetring 16
Minutsugning 21
Murcement 23
Murstens format 15
Murstens trykstyrke 13
Målafvigelse 18
Nettodensitet 20
Nominel arbejdslinie 60
Normalformat 16, 17
Normeret arbejdslinie 56

Opløselige salte 26, 39
Petring 16
Planlægningsmodul 16
Plastisk spændingsfordeling 62
Prøvelegeme 45, 46, 49
Referencemørtler 28, 39
Retarderende stoffer 26
Revnedannelser 38
Ritterkurven 56
Rittertallet 56
Stenbindere 34
Stenklasse 14
Strandsand 24
Strengpressede sten 12

Sugeevne 21
Sulfater 40
Temperaturdifferens 38
Temperaturvariation 36, 37
Tilslagsmateriale 24
Tilsætningsstoffer 26
Tørmørtel 31
Vandholdeevne 32, 33
Vandmørtel 22
Vandoptagelse 21
Vandudskillelse 32
Vådmørtel 28

Summary

SBI-Report 223 · Masonry · Materials and properties

The report goes through the essential properties of bricks, blocks and mortars and the combined material, masonry.

The first chapter contains a short review of how masonry has been designed in the past.

The second chapter describes the properties of bricks and blocks, referring to the Danish standard for test methods for strength, dimensions, densities and water absorption.

The third chapter begins with a description of the materials - lime, cement and additives - used for mortars. This is followed by instructions for composing the different types of Danish mortar so that the correct proportions between the binding agents and the aggregates are achieved. Lastly, it describes the properties of both newly mixed mortar and hardened mortar.

The fourth chapter considers masonry as a building material giving the rules for bonding bricks/blocks and the basis for the movements caused by moisture and temperature changes in masonry. The conditions for durability of masonry are described, together with the effect of bricks/blocks and mortar on the strength of masonry.

The last chapter deals with the strength properties of masonry, starting with a description of the test specimens used for testing compressive strength and tensile strength. It is shown how the ordinary stress-strain curves of different types of masonry can be converted into the so-called normalized stress-strain curve, which is reasonable close to stresses, for which the Ritter curve is replaced by a tangent to the curve. This result provides a proper basis for use of plastic stress distribution is obtained in the same way. The chapter ends with the rules for shear walls.

EX. 3

Rapporten gennemgår de styrke- og stivhedsmæssige egenskaber såvel for delmaterialerne mursten, blokke og mørtel som for konstruktionsmaterialet murværk. Materialeegenskaberne betydning for murværkets bæreevne gennemgås, herunder en analyse af den krumme arbejdslinie, der danner grundlaget for bl.a. søjleberegninger efter Ritterformlen. Rapporten er skrevet som en lærebog egnet til selvstudium og henvender sig til studerende og teknikere, der beskæftiger sig med bærende konstruktioner.

