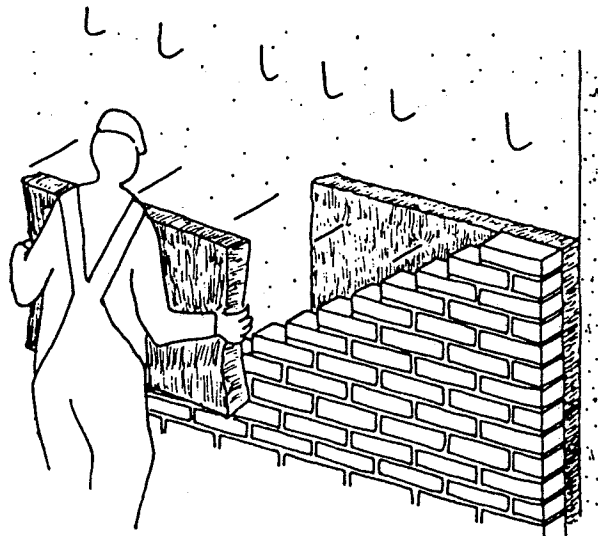


# TEMPERATUR- OG FUGTBEVÆGELSER

## I MURVÆRK



Carsten Bredahl Nielsen

Laboratoriet for Bygningsmaterialer

Danmarks Tekniske Højskole

maj 1988

## Indhold:

Indledning

Resumé

	side
Baggrund .....	4
Materialeverdier .....	4
Model af murværk .....	7
Varmeudvidelse .....	8
Svind .....	10
Beregningseksempel .....	10
Konklusion .....	14
Litteratur .....	15

### Indledning:

Nærværende notat er skrevet som et indlæg til et temamøde på Statens Byggeforskningsinstitut den 17. maj 1988 om bevægelser i murværk arrangeret af SOFUS BYG's emnegruppe "Murværk". Det er notatets formål at illustrere effekten af sten og mørteltype på varmeudvidelse og svind af murværk. Det var oprindeligt meningen at notatet skulle indeholde spændingsberegninger til at fastsætte maksimale størrelser for murflader uden dilatationsfuger. Disse beregninger udskydes til et senere notat.

Jeg vil gerne takke Erik Kjær, Kalk- og Teglværkslaboratoriet, for hjælp med fremskaffelse af materialeparametre.

Carsten Nielsen

## Resume

I det moderne byggeri anvendes skalmure, store murflader og stærke mørtler. En skalmur er udsat for store fugt- og temperatursvingninger og der vil herved optræde tilsvarende deformationer, der gør det nødvendigt at indlægge lodrette dilatationsfuger. Deformationernes størrelse afhænger af varmeudvidelseskoefficient og svind af sten og mørtel. Der ses bort fra de svind og sætninger, der sker under og umiddelbart efter opmuringen.

I litteraturen findes kun sparsomme oplysninger om svind og varmeudvidelse for sten og mørteltyper. Kalksandsten har større varmeudvidelse og svind end teglsten. For mørtler øges svind og varmeudvidelse med cementindholdet. Der udledes formler til beregning af svind og varmeudvidelse af murværk i løberforbandt ud fra de fundne materialeleværdier. Formlerne kan også anvendes for andre typer af forbandt. Som eksempel beregnes varmeudvidelse og svind for murværk af teglsten og kalksandsten med cementmørtel, kalkcementmørtel og kalkmørtel. Der udregnes værdier i både vandret og lodret retning.

Murværk med cementmørtel har større temperatur- og fugtdeformationer end murværk med kalkmørtel. Murværk af kalksandsten har større temperatur- og fugtdeformationer end murværk af teglsten. Fugtdeformationerne er mindre end temperaturdeformationerne ved en variation i temperaturen på  $\pm 35^{\circ}$  C. Varmeudvidelseskoefficienten for teglstensmurværk varierer mellem  $5,3 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}$ C og  $8,0 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}$ C afhængig af mørteltype og for kalksandstensmurværk mellem  $8,0 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}$ C og  $9,9 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}$ C. Svindet for teglstensmurværk varierer mellem 0,03% og 0,18% og for kalksandstensmurværk mellem 0,09% og 0,22%. Tillades en maksimal vandret bevægelse i lodrette dilatationsfuger på  $\pm 1,5-2,5$  mm må den maksimale afstand mellem fugerne ved en variation i temperaturen på  $\pm 35^{\circ}$  C for teglstensmurværk med cementmørtel være 11-18 m. For kalksandstensmurværk med cementmørtel er den maksimale afstand 9-14 m. Samvirkning af fugt- og temperaturbevægelser vil betyde en dæmpning af bevægelserne.

## Baggrund

I den traditionelle anvendelse af murværk med massive 1½-stens mure og forholdsvis små murflader giver varmeudvidelse og svind af sten og mørtel normalt ikke anledning til problemer. Deformationerne er små og de resulterende spændinger tilsvarende små, idet der vil opstå lokale revner i den relativt svage mørtel. Sådanne revner påvirker ikke stabiliteten af det samlede murværk.

I det moderne byggeri anvendes skalmure, store murflader og stærke mørtler. De store murflader giver tilsvarende store bevægelser da den stærke mørtel gør at hele fladen bevæger sig som et sammenhængende materiale. Skalmuren er udsat for store fugt- og temperatursvingninger og da den kun fastholdes til bagmuren med trådbindere, der let deformeres, vil væggen frit kunne bevæge sig. Bevægelserne har betydning for påvirkningen af trådbinderne samt øvrige bygningsdele, der er i kontakt med muren (vinduer, døre, tværvægge). Desuden vil der optræde lokale spændingskoncentrationer og revner, der gør det nødvendigt at indlægge lodrette dilatationsfuger.

I det følgende behandles ikke de svind og sætninger der sker under og umiddelbart efter opmuringen, men udelukkende deformationer i afbundet murværk.

Der angives materialeværdier for varmeudvidelse og svind af forskellige sten- og mørteltyper. Disse anvendes til at bestemme varmeudvidelse og svind af murværk.

## Materialeværdier

Værdier for svind og varmeudvidelse af sten og mørteltyper er sparsomme i litteraturen. I det følgende er søgt samlet nogle af disse værdier med angivelse af kilden. Desuden er der fra /6/ angivet styrke og elasticitet af sten og mørtler.

Selvom de angivne værdier stammer fra forskellige kilder, vil der ofte være tale om, at kilderne citerer hinanden. Det er uklart hvilke forsøg, der ligger til grund for tallene, der mere fremstår som erfaringsværdier. Kilderne /2/ og /8/ er undtagelser, da der her er tale om forsøgsdata. Kilderne angiver varmeudvidelseskoefficienter for murværk med forskellige sten uden at angive mørteltype undtagen /8/, hvor der er anvendt en KC-mørtel. Svind angives af kilderne som maksimalværdier uden angivelse af udtørningsbetingelserne. /8/ er en undtagelse, idet der her er optegnet svindkurver. I fig. 2 er forsøgt en opdeling af svind fra helt våd tilstand til helt tør tilstand og svind i brugsområdet. Denne opdeling er ikke entydig.

Varmeudvidelsen af porøse materialer er bestemt af grundmaterialets varmeudvidelseskoefficient. Porøsiteten er i /2/ for teglsten fundet kun at have ringe betydning for varmeudvidelseskoefficienten. Tegl har lavest varmeudvidelseskoefficient, dernæst kalksandsten og kalkholdige mørtler og højest ligger cementholdige materialer og gipsmørtel.

I /9/ behandles tre mekanismer, som medvirker til at fremkalde fugtbetingede deformationer (svind og svelning) i porøse materialer. Jo mere finporøst et materiale er desto større svind vil det få ved udtørring pga. det kapillære undertryk. Et stort indre overfladeareal vil ifølge Gibbs-Banghams hypotese også give et stort svind. Cementholdige materialer har en finporøs struktur og et stort indre overfladeareal og vil dermed have et større svind end tegl, der er grovporøst. K-mørtel svinder kraftigt under hærningen men derefter er svindet lille. I fig. 2 ses C-mørtel at have større svind end K-mørtel, mens KC-mørtel som blandingsmateriale ligger imellem. Tilsvarende ses betonsten at have større svind end teglsten, mens kalksandsten ligger imellem. Kalksandsten har ifølge /8/ et kraftigt svind ved lave relative damptryk (RF), men dette vurderes i /8/ at være uden betydning, da man ikke i praksis når ned på sådanne damptryk.

materiale	Kilde						
	/2/	/3/	/4/	/5/	/6/	/7/	/8/
C-mørtel		8-14	8-14		8-14		
KC-mørtel				10-20			
K-mørtel		10-20	7-9		7-9		
Gips-mørtel			14-18				
Teglsten	6	2-9	4-6		5		
Kalksandsten		8-9	8		8		
Betonsten			12-14		12		
Tegl + mørtel				5	5	6	KC:5,9
Kalksandsten + mørtel					8	10	KC:
Betonsten + mørtel					12		6,8-8,6

Tabel 1: Varmeudvidelseskoefficienter,  $\alpha \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

materiale	Kilde					
	/2/	/3/	/4/	/5/	/6/	/8/
C-mørtel		(0,5-1,0)			0,7	
KC-mørtel						(0,30)
K-mørtel		(0,07)				
Teglsten	0,03			(0,1-0,2)	~ 0	(0,10)
Kalksandsten			0,1-0,2		~0,1	(0,5-0,8) 0,1-0,2
Betonsten			0,1		0,3-0,7	
Tegl + mørtel				0,1		(KC:0,09)
Kalksandsten + mørtel						0,06-0,15

Tabel 2: Svind,  $\epsilon_s$  ‰.

I parentes er angivet svind fra helt våd tilstand til helt tør tilstand. Uden parentes er angivet værdier for maksimalt svind i "brugsområdet", dvs. svind for de i praksis maksimalt forekommende fugtvariationer.

Materiale	E-modul GPa	Trykstyrke MPa
C-mørtel	20-30	5-20
KC-mørtel		2-10
K-mørtel	3	1-2
Teglsten		
- let brændte	10-15	15-40
- hårdt brændte	15-20	30-60
Kalksandssten	15-20	15-25
Betonsten	20-40	~15

Tabel 3: Elasticitetsmodul og trykstyrke for sten og mørtler.  
/6/.

### Model af murværk

For at bestemme, hvor stor indflydelse varmeudvidelse og svind af mørtlen har på varmeudvidelsen og svindet af murværket betragtes en skalmur i løberforbandt.

For et enkelt skifte haves et kompositmateriale bestående af sten og mørtel kombineret i tværmodellen ved vandret udvidelse og i parallelmodellen ved lodret udvidelse /1/.

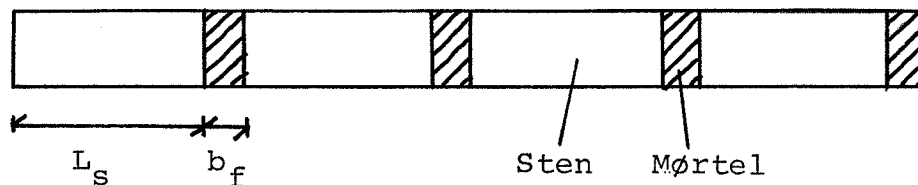


Fig. 1: Sten og mørtel i et skifte kombineret i tværmodellen ved vandret udvidelse og parallelmodellen ved lodret udvidelse.



Der indføres koncentrationen i vandret retning af sten:

$$(1) \quad c_v = L_s / (L_s + b_f)$$

hvor  $L_s$  er længden af stenen og  $b_f$  bredden af de lodrette fuger.

Et skifte kombineres derefter med en vandret fuge i parallelmodellen ved vandret udvidelse og i tværmodellen ved lodret udvidelse /1/.

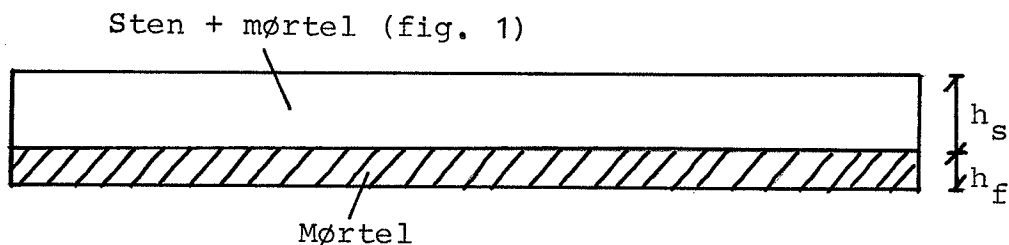


Fig. 2: Et skifte og en vandret fuge kombineret i parallelmodellen ved vandret udvidelse og i tværmodellen ved lodret udvidelse.

Der indføres koncentration i lodret retning af sten

$$(2) \quad c_l = h_s / (h_s + h_f)$$

hvor  $h_s$  er stenens højde og  $h_f$  højden af de vandrette fuger.

### Varmeudvidelse

Varmeudvidelsen af såvel mørtel som sten regnes at være lineær

$$(3) \quad \epsilon_T = \alpha \cdot dT$$

hvor  $\epsilon_T$  er den relative længdeændring af et materiale med varmeudvidelseskoefficienten  $\alpha$  når temperaturen ændres  $dT$ . Begge materialer regnes desuden lineært elastiske.

Varmeudvidelseskoefficienten i vandret retning for et skifte bestemmes med tværmodellen som:

$$(4) \quad \alpha_{SV}^* = \frac{dL}{L \cdot dT} = \frac{(\alpha_S \cdot L_S + \alpha_m \cdot b_f) \cdot dT}{(L_S + b_f) \cdot dT} = c_V \cdot \alpha_S + (1 - c_V) \cdot \alpha_m$$

hvor  $\alpha_S$  og  $\alpha_m$  er varmeudvidelseskoefficient for sten og mørtel. Elasticitetsmodulen for et skifte bestemmes som /1/:

$$(5) \quad E_{SV}^* = \left[ \frac{c_V}{E_S} + \frac{1 - c_V}{E_m} \right]^{-1}$$

hvor  $E_S$  og  $E_m$  er elasticitetsmodul for tegl og mørtel. For et skifte kombineret med en vandret fuge kan varmeudvidelseskoefficienten med parallelmodellen bestemmes som /2/:

$$(6) \quad \alpha_V^* = \frac{c_1 \cdot \alpha_{SV}^* \cdot E_{SV}^* + (1 - c_1) \cdot \alpha_m \cdot E_m}{c_1 \cdot E_{SV}^* + (1 - c_1) \cdot E_m}$$

I lodret retning bestemmes varmeudvidelseskoefficienten for et skifte med parallelmodellen som

$$(7) \quad \alpha_{s1}^* = \frac{c_V \cdot \alpha_S \cdot E_S + (1 - c_V) \cdot \alpha_m \cdot E_m}{c_V \cdot E_S + (1 - c_V) \cdot E_m}$$

Murværkets varmeudvidelseskoefficient i lodret retning kan derefter med tværmodellen bestemmes som:

$$(8) \quad \alpha_1^* = c_1 \cdot \alpha_{s1}^* + (1 - c_1) \alpha_m$$

## Svind

Ved svindberegningen regnes begge materialer ligeledes lineært elastiske, og det antages, at der ikke sker brud i nogen af materialerne. Idet man i formlerne (4) til (8) alle steder erstatter  $\alpha$  med det tilsvarende svind  $\epsilon$  kan svindet i vandret og lodret retning bestemmes af (6) og (8). Indeks har samme betydning som før.

## Beregningseksempel

I det følgende laves beregninger for en skalmur med løberforbandt med normalsten. Fugens bredde regnes til 12 mm og stenens løber til 55 × 228 mm. Herved fås:

$$(1) \quad c_v = 228/(228+12) = 0,95$$

$$(2) \quad c_l = 55/(55+12) = 0,82$$

Der betragtes murværk af teglsten og kalksandsten med tre forskellige mørtler; cementmørtel (C), kalkcement-mørtel (KC) og kalkmørtel (K). Udfra afsnittet om materialeparametre skønnes værdier af varmeudvidelseskoefficient, elasticitetsmodul og svind for sten og mørtler.

Med (6) og (8) beregnes den relative forøgelse af varmeudvidelseskoefficienten og svindet ved at kombinere sten og mørtel. De resulterende værdier for murværket tages i forhold til værdien for stenen alene. Der udregnes værdier i både vandret og lodret retning.

Det ses, at såvel varmeudvidelse som svind er størst for murværk med C-mørtel og mindst for K-mørtel. Murværk af kalksandsten har større deformationer end murværk af tegl (tabel 6), men den relative forøgelse af varmeudvidelse og svind er størst for murværk af tegl (tabel 5). For C-mørtel er varmeudvidelse og svind størst i vandret retning for begge stentyper, for KC-mørtel

er der ingen forskel og for K-mørtel er deformationerne størst i lodret retning (tabel 5 og 6). Fugtdeformationerne er mindre end deformationerne ved en temperaturvariation på 35° C (tabel 6). Den relative forøgelse af fugtdeformationerne ved at kombinere sten og mørtel er betydelig (tabel 5). En mørtel med et stort svind har således stor indflydelse på murværkets svind.

Parameter	$\alpha$ $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	E GPa	$\epsilon$ ‰
Tegl	5	15	0,03
Kalksandsten	8	17	0,1
C-mørtel	14	30	0,5
KC-mørtel	11	15	0,3
K-mørtel	8	3	0,07

**Tabel 4:** Anvendte værdier for varmeudvidelseskoefficient  $\alpha$ , elasticitetsmodul E og svind  $\epsilon$  for materialerne.

	Vandret		Lodret	
	$\alpha_v^*/\alpha_s$	$\epsilon_v^*/\epsilon_s$	$\alpha_L^*/\alpha_s$	$\epsilon_L^*/\epsilon_s$
Tegl				
+ C-mørtel	1,60	6,0	1,46	5,0
+ KC-mørtel	1,26	3,0	1,26	3,0
+ K-mørtel	1,06	1,1	1,12	1,3
Kalksandsten				
+ C-mørtel	1,24	2,2	1,19	2,0
+ KC-mørtel	1,08	1,4	1,08	1,4
+ K-mørtel	1,00	0,97	1,00	0,94

**Tabel 5:** Relativ forøgelse af varmeudvidelseskoefficient og svind i vandret og lodret retning for tegl eller kalksandsten kombineret med tre mørtler.

	Vandret tøjning		Lodret tøjning	
	$35 \cdot \alpha_V^* \text{ ‰}$	$\epsilon_V^* \text{ ‰}$	$35 \cdot \alpha_L^* \text{ ‰}$	$\epsilon_L^* \text{ ‰}$
Tegl				
+ C-mørtel	0,28	0,18	0,26	0,15
+ KC-mørtel	0,22	0,09	0,22	0,09
+ K-mørtel	0,19	0,03	0,20	0,04
Kalksandsten				
+ C-mørtel	0,35	0,22	0,33	0,20
+ KC-mørtel	0,30	0,14	0,30	0,14
+ K-mørtel	0,28	0,10	0,28	0,09

Tabel 6: Temperatur- og fugtbevægelser i vandret og lodret retning i murværk af tegl eller kalksandsten med tre mørteltyper. Variationen i murens temperatur regnes til  $35^{\circ}$  C. Deformationerne er beregnet ud fra tabel 4 og 5.

Varmeudvidelseskoefficienten for teglstensmurværk varierer mellem  $5,3 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}$ C og  $8,0 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}$ C afhængig af mørteltype. Svindet varierer mellem 0,03‰ og 0,18‰.

For kalksandstensmurværk varierer varmeudvidelseskoefficienten mellem  $8,0 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}$ C og  $9,9 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}$ C og svindet mellem 0,09‰ og 0,22‰.

Sammenlignes de fundne varmeudvidelser for murværk med kilderne i tabel 1 ses, at anvendes ren C-mørtel i teglstensmurværk undervurderes varmeudvidelseskoefficienten. For kalksandstensmurværk med C-mørtel undervurderes /6/ varmeudvidelseskoefficienten mens værdien i /7/ er passende. Kildernes angivelse af svind for murværk (tabel 2) ses at være i overensstemmelse med de beregnede svind (tabel 6).

De beregnede varmeudvidelser og svind er bestemt af værdierne i tabel 4. Disse værdier kan på nuværende tidspunkt ikke fastlægges bedre ud fra litteraturen, så indtil bedre forsøg foreligger bør man af sikkerhedsgrunde regne med de deformationer, der er

angivet i tabel 6. Har man mere sikre værdier end den i tabel 4, kan andre varmeudvidelseskoefficienter og svind bestemmes af (6) og (8). For andre geometrier af murværket end der her er regnet med, kan (6) og (8) anvendes med andre værdier af stenkonzentrationen  $c_v$  og  $c_l$  vandret og lodret.

/7/ angiver, at lange skalmure bør opdeles af lodrette dilatationsfuger, så den største vandrette bevægelse ved fugerne bliver  $\pm 1,5-2,5$  mm. I tabel 7 er angivet de hertil svarende maksimale længder af murværk. Bevægelserne regnes at foregå symmetrisk om skalmurens lodrette midtlinie. Da temperaturbevægelserne er større end fugtbevægelserne (tabel 6) bliver førstnævnte bestemmende for den maksimale murlængde.

	Max mur længde, m
Tegl	
+ C-mørtel	11-18
+ KC-mørtel	14-23
+ K-mørtel	16-26
Kalksandsten	
+ C-mørtel	9-14
+ KC-mørtel	10-17
+ K-mørtel	11-18

**Tabel 7:** Maksimal afstand mellem lodrette dilatationsfuger i murværk af tegl eller kalksandsten med tre mørteltyper, når den største vandrette bevægelse må være  $\pm 1,5-2,5$  mm beregnet for en variation i temperatur på  $\pm 35^{\circ}$  C. (tabel 6)

Der er et samspil mellem fugt- og temperaturbevægelser. Ved opvarmning af en væg sker samtidig en udtørring og ved afkøling en opfugtning. Fugt- og temperaturbevægelserne vil således være modsatrettede, så den resulterende bevægelse bliver mindre end den teoretisk beregnede.

Måling af deformationer i en teglstensvæg /10/ viser, at i vandret retning er bevægelserne 25% mindre, end hvad man kan beregne ud fra lineære varmeudvidelseskoefficienter.

Fugtbevægelser dæmpede og i nogle tilfælde overgik temperaturbevægelser. Den største målte bevægelse af muren svarer til en varmeudvidelseskoefficient på  $2,5 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}\text{C}$ .

En mekanisk fastholdelse af muren i form af trådbindere og indspænding vil også betyde en dæmpning af bevægelserne.

### Konklusion:

Murværk med cement-mørtel har større temperatur- og fugtdeformationer end murværk med kalkmørtel. Murværk af kalksandsten har større temperatur- og fugtdeformationer end murværk af teglsten. Fugtdeformationerne er mindre end temperaturdeformationerne ved en variation i temperaturen på  $\pm 35^{\circ}\text{C}$ . Varmeudvidelseskoefficienten for teglstensmurværk er maksimalt  $8 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}\text{C}$  og for kalksandstensmurværk  $10 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}\text{C}$ . Fugtdeformationen er for teglstensmurværk maksimalt 0,18% og for kalksandstensmurværk 0,22%. Samvirkning af fugt- og temperaturbevægelser vil betyde en dæmpning af bevægelserne.

## Litteratur

- /1/ Lauge Fuglsang Nielsen: Materialemekanik. Teknisk rapport 169-A (1986), LBM 1986.
- /2/ Carsten Bredahl Nielsen: Thermisk deformation og svind af saltholdige teglsten. Teknisk rapport 182/88, LBM 1988.
- /3/ Kompendium 7, B-retningens grundkursus 8862, LBM 1981.
- /4/ Duhrkop, Saretok, Sneck, Svendsen: Mørtel muring pudsning, SBI-anvisning 64, København 1966.
- /5/ Teglintustriens tekniske Tjeneste: Tegl 10, København 1967.
- /6/ P. E. Mondorf: Murværkskonstruktioner, Polyteknisk Forlag, København 1972.
- /7/ SBI-anvisning 156: Skalmure ved udvendig efterisole-ring, 1988.
- /8/ R113:1984: Bygga bestandigt, Nordiskt murverks symposium 15-17 august 1984, Goteborg.
- /9/ Anders Nielsen: Svind-Svelningsmekanismer, DTH-LBM kursus 6108/17, 1988.
- /10/ K. K. Karpati og P. J. Sereda: Movement of brick panel cladding, Materials and Structures, Vol.13, No.73, 1980.