3 Funktionskrav og projektering

3.1 *Funktionskrav* 52

3.2 *Konstruktive bestemmelser* 52
3.2.1 Materialeegenskaber 53
3.2.2 Styrkeeftervisning ved beregning 54
3.2.3 Vægge 55
Centralt belastede vægge 55
Væg som skive 55
Tryk på fodrem 56
Forankring for sug 56
Forankring for glidning 57
Vindues- og døråbninger 57
Eksempel: Dimensionering af vægge 57
Eksempel: Dør-/vinduesåbning 60
3.2.4 Dækelementer 61
Enkeltspændt bjælke 61
Kontinuert drager over 2 eller flere felter 62
Tværfordeling af vertikale enkeltlaster 63
Dæk/tag som skive 63
Kompositdæk konstruktioner 64
Eksempel: Simpelt understøttet etagedæk 64
Eksempel: Punktlast på simpelt understøttet dæk 66
Eksempel: Massivt træelement som kontinuert drager 66
Eksempel: Afstivende tagskive 67

3.3 *Brandforhold* 68
3.3.1 Materialeegenskaber 69
3.3.2 Beregningsvejledning 69
Resttværsnitsmetoden 69
3.3.3 Brandbeskyttelse og brandspredning 70
3.3.4 Konstruktionseksempel 71

3.4 *Fugt* 71
3.4.1 Materialeegenskaber 73
3.4.2 Beregningsvejledning 74
Fugtafhængige dimensionsændringer 74

3.5 *Varmeisolering* 75
3.5.1 Materialeegenskaber 75
3.5.2 Beregningsvejledning 75
3.5.3 Konstruktionseksempel 76

3.6 *Lydforhold* 76
3.6.1 Materialeegenskaber 77
3.6.2 Beregningsvejledning 77
3.6.3 Andre konstruktioner 78

3.7 *Indeklima* 78
3.7.1 Forurening fra byggematerialer 78
3.7.2 Varmeakkumulering 78
3.7.3 Fugtakkumulering 79

3.8 *Beregningsprogram - henvisning*
Projekteringsprocedurer 80
Elementbestilling 80
Andre punkter 80

3 Funktionskrav og projektering

I kapitlet behandles emner, som er relevante for specielt projekterende ingeniører og arkitekter, men også udførende håndværkere og entreprenører kan hente brugbare informationer vedrørende massive træelementer i dette kapitel.
Med udgangspunkt i myndighedskrav behandles de dimensioneringsprincipper, der kan benyttes ved anvendelse af massive træelementer. Der lægges størst vægt på de funktionskrav, som har direkte betydning for træelementernes egenskaber.
Konstruktionsprincipper ved opbygning af vægge, etageadskillelser og tage behandles ligesom løsninger på samlingsdetaljer vises.
Derudover gennemgås nogle af de projekteringsprocedurer, der er relevante ved anvendelse af massive træelementer. I den sammenhæng trækkes nogle af de områder frem, hvor procedurerne ved byggerierne adskiller sig fra byggerier opført med andre materialer/elementer.
Det er her vigtigt at bemærke, at de beregningsprincipper og løsningsforslag, som gives i dette kapitel er generelle eksempler på anvendelsesmuligheder for massive træelementer. I praksis vil der være mange flere løsninger at vælge imellem. Derudover kan der i praksis forekomme belastningstilfælde, som de i dette kapitel viste beregningsprincipper og løsningsforslag ikke har taget højde for.

3.1 FUNKTIONSKRAV

Massive træelementer anvendt i byggeri skal udføres i overensstemmelse med gældende myndighedskrav.
I Danmark er det *Bygningsreglement af 1995* (BR-95) og *Bygningsreglement for småhuse af 1998* (BRS-98). Reglementerne giver de overordnet retningslinier som konstruktionerne skal overholde. Som supplement til reglementerne anvendes en række normer, der indenfor konkrete områder sikre et forsvarligt teknisk kvalitetsniveau for byggeriet.
I de efterfølgende afsnit tages udgangspunkt i de krav i reglementerne som direkte har betydning for massive træelementers anvendelse i byggeriet, og der gives konkrete dimensioneringsforslag til byggetekniske løsninger.

Følgende afsnit i *Bygningsreglement af 1995* og *Bygningsreglement for Småhuse af 1998* vil blive behandlet i det efterfølgende:

Bygningsreglement af 1995

Kapitel 5:	Konstruktive bestemmelser
Kapitel 6:	Brandforhold
Kapitel 7:	Fugtisolering
Kapitel 8:	Varmeisolering
Kapitel 9:	Lydforhold
Kapitel 11:	Indeklima

Bygningsreglement for Småhuse af 1998

Kapitel 4:	Konstruktioner, brandforhold og byggeplads
Kapitel 5:	Varmeisolering
Kapitel 6:	Indeklima

De viste dimensioneringsprincipper og løsningsforslag skal ses som generelle eksempler på mulige løsninger.

3.2 KONSTRUKTIVE BESTEMMELSER

Massive træelementers bærende og afstivende egenskaber undersøges med udgangspunkt i kapitel 5 og 4 i henholdsvis BR-95 og BRS-98. De konstruktive bestemmelser skal sikre, at konstruktionerne udføres på en sikkerhedsmæssig forsvarlig måde, som kan modstå de normalt forekomne statiske og dynamiske påvirkninger.
I det efterfølgende beskrives kort de krav, som myndighederne stiller til dimensionering og udførelse af bygningskonstruktioner. Med udgangspunkt i de beskrevne regler og elementernes egenskaber vises løsningsforslag og dimensioneringsprincipper på konkrete konstruktionseksempler, der vil forekomme i praksis.
I reglementerne defineres de konstruktive bestemmelser for bygningskonstruktioner herunder massive træelementer generelt som:

BR-95 (afs. 5.1.1) og BRS-98 (afs. 4.1.1):
Byggearbejder skal udføres på en teknisk og håndværksmæssig forsvarlig måde, og de anvendte materialer skal være holdbare og velegnede til formålet, så der opnås tilfredsstillende forhold i sikkerheds- og sundhedsmæssig henseende

Som hjælp til den konstruktive dimensionering er der udarbejdet en række konstruktionsnormer:

DS 409: Sikkerhedsbestemmelser for konstruktioner
DS 410: Last på konstruktioner
DS 411: Betonkonstruktioner
DS 412: Stålkonstruktioner
DS 413: Trækonstruktioner
DS 414: Murværk
DS 415: Fundering
DS 417: Svejste lagertanke af stål til brandfarlige væsker
DS 419: Aluminiumskonstruktioner
DS 420: Letbeton
DS 446: Tyndpladekonstruktioner
DS 451: Kompositkonstruktioner, betonstål

Der kan afviges fra de gældende normer såfremt et tilfredsstillende sikkerhedsniveau ved afvigelserne kan dokumenteres overfor kommunalbestyrelsen.

Ved dimensionering af massive træelementer tages der udgangspunkt i konstruktionsnormerne:
Sikkerhedsnormen (DS 409), *Lastnormen* (DS 410) og *Trænormen* (DS 413).
Sikkerhedsnormen afsnit 1.1 angiver at en konstruktion skal dimensioneres og udføres således, at den i den forventede brugstid ved korrekt anvendelse og vedligeholdelse:

- *Med en tilfredsstillende sikkerhed kan modstå de laster, den kan forventes udsat for*
- *Fungere tilfredsstillende ved normal brug*
- *Har tilfredsstillende bestandighed og robusthed.*

Ifølge *Sikkerhedsnormen* skal konstruktioner vurderes indenfor følgende tre lastkombinationer:

- Lastkombination 1: Anvendelsesgrænsetilstand
- Lastkombination 2: Brudgrænsetilstand
- Lastkombination 3: Ulykkeslast

Hvilken af de tre lastkombinationer, som bliver dimensionsgivende afhænger af konstruktionstypen, anvendelsesområdet og den ydre belastning. I dette afsnit vil der primært blive set på konstruktioner udsat for laster hørende til lastkombination 1 og 2, mens afsnit 3.7 Brandforhold primært henvender sig til lastkombination 3 (ulykkeslast).

3.2.1 Materialeegenskaber

Styrke- og stivhedsegenskaber for massive træelementer afhænger af de anvendte materialers egenskaber og deres anvendelsesområde.
Anvendelsesområdet for konstruktioner og materialer defineres ud fra tre anvendelsesklasser, *se tabel 3.1.*

Tabel 3.1: Materialers og konstruktioners anvendelsesområde kan defineres ud fra 3 anvendelsesklasser.
Kilde: (DS413, 1998).

Anvendelsesklasse	Beskrivelse
1 Tørt byggeri	Er karakteriseret ved et fugtindhold i materialerne svarende til en lufttemperatur på 20°C og en relativ luftfugtighed, som kun over stiger 65% i nogle få uger om året.
2 Fugtigt byggeri	Er karakteriseret ved et fugtindhold i materialerne svarende til en lufttemperatur på 20°C og en relativ fugtighed, som kun overstiger 85% i nogle få uger om året.
3 Vådt byggeri	Er karakteriseret ved et fugtindhold i materialerne, som er højere end svarende til anvendelses klasse 2.

Massive træelementer vil typisk blive anvendt i anvendelsesklasse 1 og 2. Råmaterialet er fortrinsvis af nåletræ.

I *Trænormen* inddeles nåletræ efter fire styrkeklasser:
K14, K18, K24 og K30
Hvor K er betegnelsen for styrkeklassen og den efterfølgende værdi er den karakteristiske bøjningsstyrke for den pågældende klasse. Konstruktionstræ inddeles ved en visuel styrkesortering i sorteringsklasserne T3, T2, T1 og T0, der modsvarer de respektive styrkeklasser K30, K24, K18 og K14. Den visuelle styrkesortering udføres på baggrund af DS 483, 1999: *Visuel styrkesortering af konstruktionstræ.*

Massive træelementers mekaniske egenskaber adskiller sig fra konstruktionstræs egenskaber, da elementtværsnittet opbygges af enkeltstående brædder, hvor sammenhængen udelukkende skabes ved hjælp af forbindelsesmidler. Elementerne opbygges af brædder af varierende trækvalitet (K14-K30). Fordelen ved massive træelementer er at brædderne med størst bæreevne optager en større del af lasten end brædderne med ringere bæreevne. En umiddelbar følge heraf er, at variationen i styrke - og stivhedsværdierne reduceres, med heraf følgende større karakteristiske værdier.

Tabel 3.2: Karakteristiske styrke- og stivhedtal i MPa samt densitet i kg/m³. Kilde: Frit efter DS 413;1998.

			Nåletræ:				Massive træelementer[1]	
	Limtræ:							
	Konstruktionstræ:		K30	K24	K18	K14	MT1	MT2
Styrke	Styrke Bøjning parallelt m. fibrene	$f_{c,0,k}$	30	24	18	14	18	14
	Tryk parallelt med fibrene[2]	$f_{c,90,k}$	26	20	15	12	8	6
	Tryk vinkelret på fibrene	f_{mk}	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Stivhed	Elasticitetsmodul parallelt med fibrene, middelværdi	E_0	12000	10500	9000	7000	11000	8000
	Elasticitetsmodul parallelt med fibrene, 5% fraktil	$E_{0,k}$	8000	7000	6000	4700	10000	6500
	Elasticitetsmodul vinkelret på fibrene, middelværdi	E_{90}	400	350	300	250	-	-
	Forskydningsmodul, middelværdi	G	800	700	600	500	-	-
	Densitet, 5% fraktil	$\rho_{12,k}$	380	350	320	290	320	290
	Densitet, middelværdi	ρ_{12}	460	460	420	380	350	380

1) Værdierne er for elementer uden stødsamlinger. Ved stødsamlinger i 1/3-dels punkterne skal styrkeværdierne reduceres med en faktor: $k_{stød,styrke} = 0,6$ og stivhedsværdierne reduceres med en faktor: $k_{stød,stivhed} = 0,8$, *se figur 3.1*

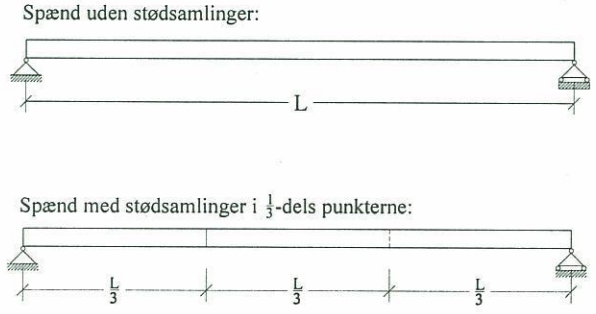
2) *Ved tryk endetræ mod endetræ skal* $f_{c,0,k}$ *multipliceres med 0,6*

Produktionen af træelementerne giver mulighed for at anvende forskellige trækvaliteter i elementerne. I forbindelse med dimensionering af bygninger med massive træelementer er det således nødvendigt, at have kendskab til hvilket råmateriale, som er anvendt i produktionen.
Styrkeklasserne for massive træelementer, MT1 og MT2, som er angivet i tabel 3.2 består af:

MT1: Sorteret til minimum K18.
MT2: Usorteret dansk gran

Reduktionsfaktorernes ($k_{stød,styrke}$ *og* $k_{stød,stivhed}$) anvendelse forudsætter at stød i dæk er udført som vist på figur 3.1.

Stødsamlinger i vægge kan udføres som flyverstød med forskudte samlinger.



Figur 3.1: Massive træelementer anvendt i tage og som etagedæk uden stød og med stød i trediedelspunkterne. I elementer med stødsamlinger skal midterzonen friholdes for stød.

3.2.2 Styrkeeftervisning ved beregning

Materialernes styrke- og stivhedsværdier angives i *Trænormen* som karakteristiske værdier, f_k.
Karakteristiske styrkeværdier defineres som 5% fraktilen af prøvningsresultater. Regningsmæssige styrkeværdier kan ifølge *Trænormen* bestemmes som:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \cdot k_{\mathrm{mod}}$$

hvor

k_{mod} afhænger af anvendelsesklassen og lastgruppen. For konstruktionstræ kan værdierne findes i tabel 3.3.

$\gamma_m = 1,64 \cdot \gamma_0$

hvor

γ_0 afhænger af sikkerhedsklassen, se tabel 3.4

Tabel 3.3: Trænormens værdier for k_{mod}. *Kilde: DS 413, 1998.*

Anvendelsesklasse	Lastgrupper				
	P	L	M	K	Ø
1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9

Tabel 3.4: Sikkerhedsnormens værdier for γ_0. *Kilde: DS 413, 1998.*

	Lav	Normal	Høj
γ_0	0,9	1,0	1,1

Karakteristiske stivhedsværdier angives enten som 5% fraktilen eller som middelværdier af prøvningsresultater. Stivhedsværdier i form af elasticitetsmodul benyttes fortrinsvis i forbindelse med lastkombination 1, anvendelsesgrænsetilstanden. Ved undersøgelser af anvendelsestilstanden ønskes det bedst mulige skøn for de aktuelle forhold, hvilket betyder at $\gamma_m=1,0$ og middelværdierne for stivhedstallene benyttes.

3.2.3 Vægge

Eftervisning af vægges bæreevne sker som for søjler, da en væg blot er en søjle med en stor bredde. For at sikre vægge i massivt træ mod stabilitets- eller styrkesvigt er det nødvendigt at undersøge følgende betingelser:

1. Dimensionering mod bøjning
2. Tryk på fodrem
3. Forskydning som følge af vandret last
4. Forankring for sug
5. Forankring mod glidning

Eftervisning af bæreevne skal ske i overensstemmelse med *Trænormen* (DS 413, 1998), dvs. vægge der påføres en lodret og vandret last skal opfylde følgende betingelser:

1. $$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \le 1$$
2. $\sigma_{c,90,d} \le f_{c,90,d}$
3. Etablering af nødvendig afstivning
4. Etablering af nødvendig forankring
5. $F_H < F_{friktion}$

hvor

$\sigma_{c,0,d}$ er den regningsmæssige trykspænding parallel med træets fibre (MPa).
$\sigma_{c,90,d}$ er den regningsmæssige trykspænding vinkelret på træets fibre (MPa).
$\sigma_{m,d}$ er den regningsmæssige bøjningsspænding (MPa).
$f_{c,0,d}$ er den regningsmæssige trykstyrke parallelt med træets fibre (MPa).
$f_{c,90,d}$ er den regningsmæssige trykstyrke vinkelret på træets fibre (MPa).
$f_{m,d}$ er den regningsmæssige bøjningsstyrke (MPa).
k_c er en reduktionsfaktor, som tager hensyn til konstruktionens slankhedstal.
F_H er den vandrette last i væggens plan (kN).
$F_{friktion}$ er den friktionskraft væggen frembringer (kN).

I den efterfølgende tekst gives en nærmere beskrivelse af de generelle dimensioneringsprincipper for vægge udført af massive træelementer.

Centralt belastede vægge

Da det ofte vil være styrken af fodremmen, som er dimensioneringsgivende for væggen kan bæreevnen regnes eftervist på baggrund af en svelleundersøgelse.

Statisk model:

For centralbelastede vægge med et geometrisk slankhedstal $\lambda = \frac{l_s}{i}$ mindre end de i tabel 3.6 givne værdier kan væggens bæreevne bestemmes ved hjælp af svellebæreevnen:

$$\sigma_{c,90,d} \le f_{c,90,d}$$

Værdierne i tabel 3.5 har som forudsætning, at fodrem er udført i nåletræ.

Tabel 3.5: Geometriske slankhedstal for vægge udført af massive træelementer, hvorunder væggens bæreevne kan bestemmes af nåletræssvellens bæreevne.

	Uden stød	Med 33% stød
Dansk usorteret træ	$\lambda \le 130$	$\lambda \le 115$
Udenlandsk træ	$\lambda \le 160$	$\lambda \le 145$

For geometriske slankhedstal større end de i tabel 3.5 givne værdier skal væggens bæreevne desuden bestemmes på baggrund af:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} \le 1$$

Væg som skive

Massive træelementer kan betragtes som en skive når den indgår i det afstivende system, hvor der skal overføres laster i elementets plan. Beregninger har vist at vægge af massive træelementer uden en eller anden

form for af-stivning, ikke er egnede til at optage en vandret kraft F_H i væggens længderetning. På grund af at sømningen mellem de enkelte brædder er en såkaldt "blød" samling, vil forskydningen i toppen af væggen ofte overskride $h/500$, hvilket er uacceptabelt. Beregninger af væggens deformation kan dog udføres, som det er vist i det efterfølgende.

Som afstivning af væggen kan anvendes en- eller tosidig pladebeklædning af eksempelvis:

- *Konstruktions krydsfiner*
- *Spånplade*
- *OSB-Plader(Orientiel Strand Board)*
- *Gipskarton*
- *Fibergips*
- *FCP Herculit*

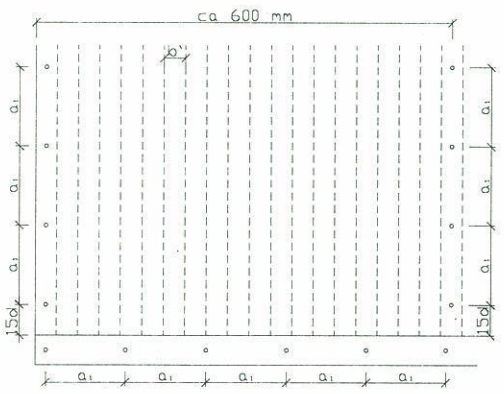
Udover pladebeklædning kan afstivningen af væggen etableres ved vindtræksbånd eller lignende som krydsafstivning. Anvendes plader som afstivende skive skal eftervisningen ske i henhold til gældende godkendelse og anvisninger på det enkelte pladeprodukt. Bliver pladerne sømmet/klammet på skal bræddetykkelsen være min: $b \geq 10 \cdot d_n$

hvor

d_n er diameteren/tykkelsen på søm/klamme.
b' er tykkelsen på pladen/brædderne.

Ovenstående krav er af hensyn til bræddernes randafstande i forbindelse med sømningen.

Anvendes væggen som afstivende anbefales det at væggen beklædes med et plademateriale, brædder eller vindtræksbånd. Væggens forskydningsbæreevne med plade/bræddebeklædning kan udføres efter samme principper, som kendes fra træskeletvægge med plader, se figur 3.2.



Figur 3.2: Systemsømning af plademateriale på væg.

Vægge udført af massive træelementer og beklædt med brædder har sandsynligvis en større forskydningsbæreevne end tilsvarende træskeletkonstruktioner, men på nuværende tidspunkt foreligger der ikke tilstrækkelig dokumentation til at eftervise den præcise bæreevne.
Forskydningsbæreevnen for en 70 mm væg opført af massive træelementer med beklædning på begge sider kan bestemmes til værdierne i tabel 3.6. Sømning af plademateriale anordnes efter påvirkning pr. 1,2 m elementbredde mod væltning.

Tabel 3.6: Forskydningsbæreevne for massive træelementer med pladebeklædning (standardværdier for stolpekonstruktioner). Kilde: DIN 1052.

Beklædning	Bæreevne	Forbindelsesmidler
13 mm gipsplade	4,0 kN/m	Gipspladeskruer (a_1 =120 mm)
12 mm krydsfinér	7,0 kN/m	Søm 2,8x65 (a_1 =150 mm) 4,0x40 skrue (a_1 =150 mm)

Tryk på fod

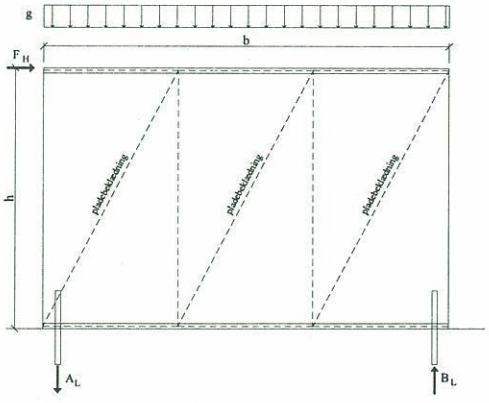
Belastningen på fodrem skal overholde følgende betingelse:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F}{A} \leq f_{c,90,d}$$

hvor

F er den samlede last fra de ovenliggende konstruktioner.
A er det belastede areal af fodremmen.

Forankring for sug



Figur 3.3: Væg som udstivende skive.

Vægge af massivt træ skal forankres for en kraft A_L, som kan bestemmes i henhold til:

$$A_L = F_H \frac{h}{b} - \tfrac{1}{2} \cdot g$$

hvor

A_L er forankringskraften.
h er væggens højde.
b er væggens længde.
g er egenvægt af væg samt ovenliggende konstruktioner.

Forankring for glidning

Det er ligeledes nødvendigt at undersøge om væggen er tilstrækkelig forankret mod glidning, hvilket kan bestemmes udfra nedenstående betingelse. I den lastkombination, der beregnes skal det desuden sikres at den/de vægge som medtages i beregningen altid er belastet:

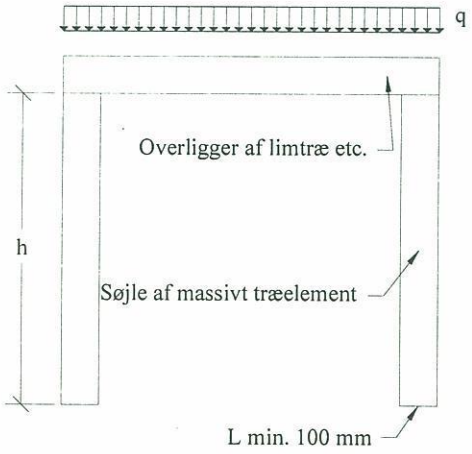
$$F_H \leq F_{friktion} = F_g \cdot 0{,}8 \cdot \mu_d$$

hvor

F_g er den samlede egenlast som trykker på fodremmen.
$\mu_{d,k}$= *0,5* er den regningsmæssige friktionskoefficient for træ mod beton.
$F_H \geq F_{friktion}$ skal der etableres forankring mod glidning.
$F_H < F_{friktion}$ er der tilstrækkelig modstand i fugen og yderligere forankring mod glidning er ikke nødvendig.

Vindues- og døråbninger

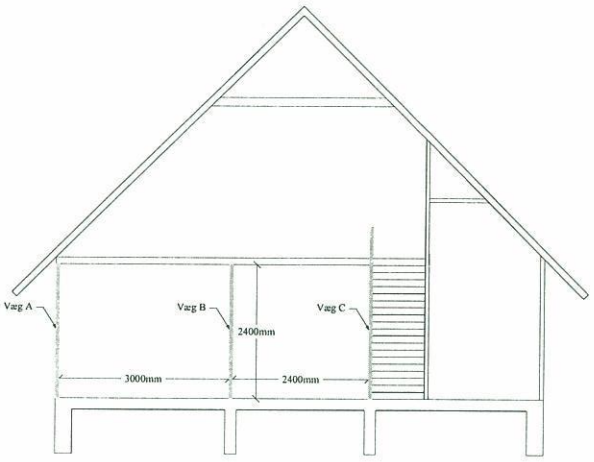
Vægge med vindues- og døråbninger dimensioneres efter de samme principper, som er angivet for vægge i det ovenstående. Belastningen bliver blot større, da der skal optages last fra overliggeren over åbningen, se figur 3.4.



Figur 3.4: Dimensionering af søjler omkring vindues- og døråbninger foregår efter de samme principper som gælder for almindelige vægge.

Eksempel: Dimensionering af vægge

Nedenstående eksempel viser anvendelse af beregningsprincipperne. Der betragtes et enfamiliehus i to etager, se figur 3.5

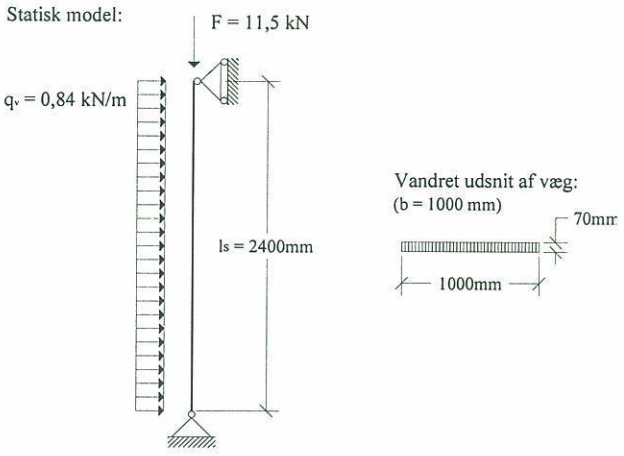


Figur 3.5: Tværsnit af hus, hvor væg A, B og C dimensioneres i det nedenstående eksempel.

Som det fremgår af tværsnittet på figur 3.5 vil væggene A, B og C blive dimensioneret.

Væg A: Ydervæg af 70 mm massivt træ udført i *MT2* og uden stødsamlinger.
Væg B: Centralt belastet skillevæg af 70 mm massivt træ udført i *MT2* og uden stødsamlinger.
Væg C: Excentrisk belastet skillevæg af 70 mm mas sivt træ udført i *MT2* og uden stødsamlinger.

Væg A: Ydervæg



Følgende forudsætninger anvendes i dimensioneringseksemplet:

LAK: *1,5 vind+0,5 sne+1,3 p+1,0 g*
Ø-last – Normal sikkerhedsklasse
Anvendelsesklasse 1
$A=7{,}0\cdot10^4\ mm^2$
$W_y=816{,}7\cdot10^3\ mm^3$
$I_y=28{,}6\cdot10^6\ mm^4$
$i=20{,}2mm$

$$\lambda=\frac{l_s}{i}=\frac{2400mm}{20{,}2mm}=\underline{118{,}8}$$

$$\lambda_{rel}=\frac{1}{\pi}\cdot\sqrt{\frac{f_{c,k}}{E_{0,k}}}\cdot\lambda=$$
$$\frac{1}{\pi}\cdot\sqrt{\frac{6MPa}{8000MPa}}\cdot118{,}8=\underline{1{,}04}$$

$$k=0{,}5\cdot(1+\beta_c(\lambda_{rel}-0{,}5)+\lambda_{rel}^2)$$
$$=0{,}5\cdot(1+0{,}2\cdot(1{,}04-0{,}5)+1{,}04^2)=\underline{1{,}10}$$

Bøjningsstyrken:

$$f_{m,d}=\frac{f_{m,k}}{\gamma_m}\cdot k_{mod}=\frac{14MPa}{1{,}64}\cdot1{,}1=\underline{9{,}39MPa}$$

Trykstyrken:

$$f_{c,0,d}=\frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m}\cdot k_{mod}=\frac{6}{1{,}64}\cdot1{,}1=\underline{4{,}02MPa}$$

Det antages at væggen har en forhåndsudkrumning på:

$$e=l_s/300=2400mm/300=\underline{8mm}$$

Udbøjningen som følge af tværlasten:

$$u_0=\frac{5}{384}\cdot\frac{q_v\cdot l_s^4}{E\cdot I}$$
$$=\frac{5}{384}\cdot\frac{0{,}84\,N/mm\cdot(2400mm)^4}{8000MPa\cdot28{,}6\cdot10^6\,mm^4}=\underline{1{,}6mm}$$

Det maksimale moment på midten af væggen bliver:

$$M_{max}=\tfrac{1}{8}\cdot q\cdot l_s^2+\tfrac{1}{2}\cdot Q\cdot(u_0+e)$$
$$=\tfrac{1}{8}\cdot0{,}84\,N/mm\cdot(2{,}4m)^2+\tfrac{1}{2}\cdot11{,}5kN\cdot(0{,}0016+0{,}008)m$$
$$=\underline{0{,}66kNm}$$

Bøjningsspændingerne:

$$\sigma_{m,d}=\frac{M_{max}}{W_y}=\frac{0{,}66\cdot10^6\,Nmm}{816{,}7\cdot10^3\,mm^3}=\underline{0{,}81MPa}$$

Trykspændingerne:

$$\sigma_{c,d}=\frac{Q}{A}=\frac{11{,}5\cdot10^3\,N}{7{,}0\cdot10^4\,mm^2}=\underline{0{,}16MPa}$$

Dimensionering mod udknækning af væggen sikres ved overholdelse af brudbetingelse 1:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c\cdot f_{c,0,d}}+\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}}\le1$$

Indsættes de kendte størrelser fås:

$$\frac{0{,}16Mpa}{0{,}69\cdot4{,}02MPa}+\frac{0{,}81MPa}{9{,}39MPa}=\underline{\underline{0{,}14<1}}$$

Bæreevne Brudbetingelse 1 er således opfyldt.

Den aktuelle udbøjning af:

$$u_{fin}=\frac{M_{max}}{N_{el}}<\frac{l}{300}\ ,\ \text{hvor}$$

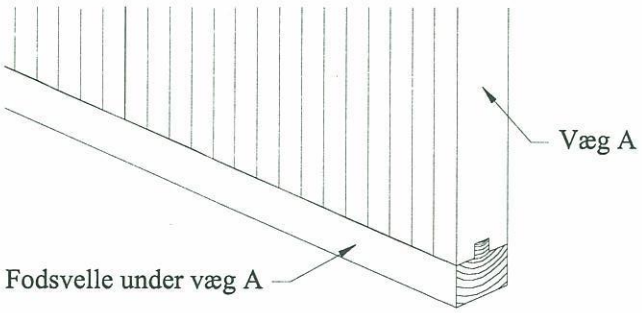
$$N_{el}=\frac{\pi^2\cdot E_{0,m}\cdot I}{l_s^2}=\frac{\pi^2\cdot8000MPa\cdot28{,}6\cdot10^6\,mm^4}{(2400mm)^2}$$

$$\underline{N_{el}=392{,}0kN}$$

Indsættes i udbøjningsformlen fås:

$$u_{fin}=\frac{0{,}66\cdot10^6\,Nmm}{392{,}0\cdot10^3\,N}=\underline{\underline{1{,}7mm<\frac{l}{300}=8mm}}$$

Væggens udbøjningen accepteres som følge heraf. Endelig undersøges om fodremmen kan optage trykket, som overføres via væg A, se figur 3.6.



Figur 3.6: Principskitse af fodsvelle under væg A.

LAK: *1,5 sne + 0,5 vind + 1,3 p + 1,0 g*

K-last: *P=13 kN* – Normal sikkerhedsklasse

Trykstyrken vinkelret på fibrene (nåletræ):

$$f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_m} \cdot k_{mod} = \frac{3,5}{1,64} \cdot 0,9 = \underline{1,92MPa}$$

Belastningen fra væg A:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{P}{A} = \frac{13kN}{70000mm^2} = \underline{0,19MPa}$$

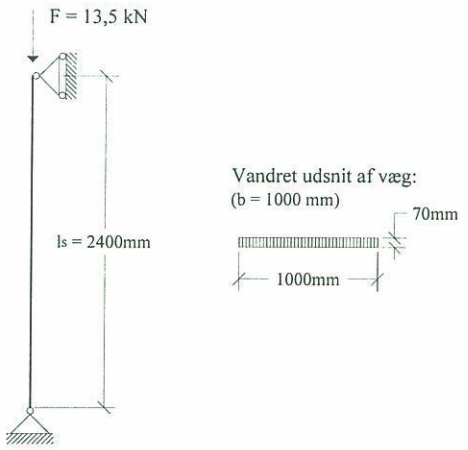
Indsættelse i brudkriterium 2 giver:

$\sigma_{c,90,d} = \underline{0,19\ MPa} \leq f_{c,90,d} = \underline{1,92\ MPa}$

Bæreevnen i fodsvellen er således opfyldt.

Væg B: Centralt belastet skillevæg

Statisk model:



LAK: *1,3p + 1,0g*

L-last – Normal sikkerhedsklasse

Anvendelsesklasse 1

Øvrige tværsnitsdata og søjlefaktor som for væg A.
I henhold til afsnit omhandlende centralt belastet vægge er det tilstrækkeligt at eftervise at trykket fra væggen kan optages på remmen.

Trykstyrken vinkelret på fibrene (nåletræ):

$$f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_m} \cdot k_{mod} = \frac{3,5}{1,64} \cdot 0,7 = \underline{1,49MPa}$$

Belastningen fra væg B:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{P}{A} = \frac{13,5kN}{70000mm^2} = \underline{0,19MPa}$$

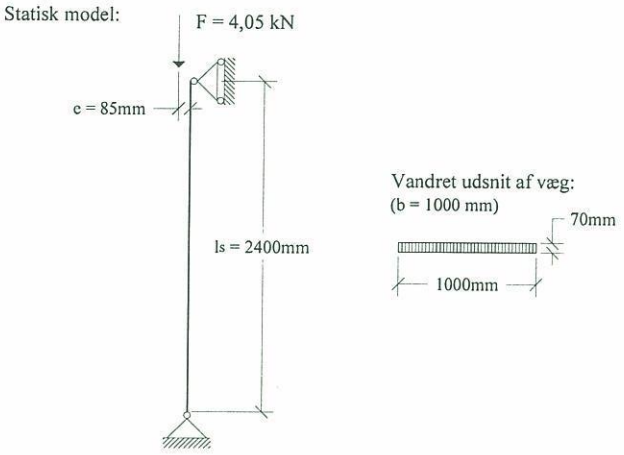
Indsættelse i brudkriterium 2 giver:

$\sigma_{c,90,d} = 0,19\ MPa \leq f_{c,90,d} = 1,49\ MPa$

Bæreevnen i fodsvellen er således opfyldt.

Væg C: Excentrisk belastet væg

Statisk model:



LAK: 1,3 *p* + *1,0 g*

L-last – Normal sikkerhedsklasse

Anvendelsesklasse 1

Øvrige tværsnitsdata og søjlefaktor som for væg A.

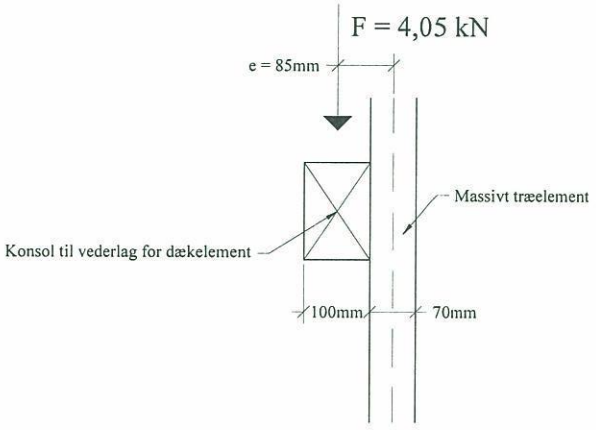
Bøjningsstyrken for som:

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \cdot k_{mod} = \frac{14MPa}{1,64} \cdot 0,7 = \underline{4,18MPa}$$

Trykstyrken bestemmes som væg A:

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} \cdot k_{mod} = \frac{6}{1,64} \cdot 0,7 = \underline{2,56MPa}$$

Som vist på den statiske model for væg C optræder der en excentricitet på 85 mm. Excentriciteten kan forklares ved at lasten fra dækket overføres via en konsol på siden af væggen, se figur 3.7.



Figur 3.7: Lodret udsnit af væg C ved konsol.

Momentet hidrørende fra excentriciteten kan bestemmes som:

$M_{max} = exF = 0,085\ mx4,05kN = \underline{0,344\ kNm}$

Bøjningsspændingerne er givet ved:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{max}}{W_y} = \frac{0{,}344 \cdot 10^6\ Nmm}{816{,}7 \cdot 10^3\ mm^3} = \underline{0{,}42MPa}$$

Trykspændingerne er givet ved:

$$\sigma_{c,d} = \frac{Q}{A} = \frac{4{,}05 \cdot 10^3\ N}{7{,}0 \cdot 10^4\ mm^2} = \underline{0{,}06MPa}$$

Dimensionering mod udknækning af væggen sikres ved overholdelse af brudbetingelse 1:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \le 1$$

Indsættes de kendte størrelser fås:

$$\frac{0{,}06Mpa}{0{,}69 \cdot 2{,}56MPa} + \frac{0{,}42}{4{,}18} = \underline{\underline{0{,}13 < 1}}$$

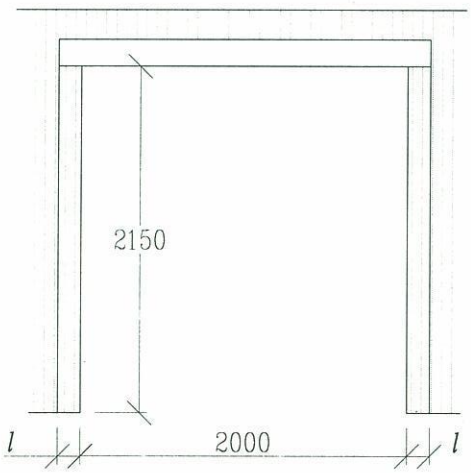
Brudbetingelse 1 er således opfyldt.

Udbøjningen er OK, da belastningen er mindre end ved væg A.

Svelletrykundersøgelsen undlades ligeledes, da lasten på væggen er mindre end ved væg B.

Eksempel: Dør-/vinduesåbning

I dette eksempel betragtes en åbning til et dørparti. Som overligger anvendes en limtræsbjælke 65x166 mm, som er belastet med en jævnt fordelt last på 10 KN/m. Væggen bliver samtidig belastet af vind svarende til en karakteristisk last på 0,56 KN/m².



Figur 3.8: Døråbning i massivtræsvæg

Til bæring af overliggeren medregnes kun den vægdel som er direkte belastet.

Vederlagsundersøgelse:

LAK 2.1 brud: $1{,}3 \cdot p + 1{,}0 \cdot g$

L-last – Normal sikkerhedsklasse

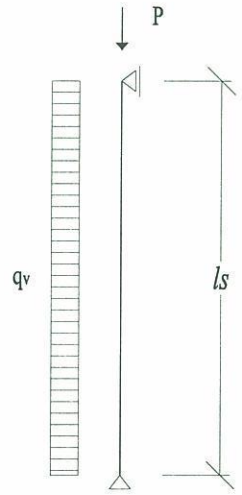
$R_A = R_B = 0{,}5 \cdot 10KN/m \cdot 2{,}2m = 11KN$

$f_{cd} = 1{,}28\ MPa$

Nødv. $l \ge \frac{11 \cdot 10^3\ N}{1{,}28MPa \cdot 65mm} = 132mm \approx 140mm$

Søjleeftervisning:

LAK 2.1 brud: $1{,}5 \cdot vind + 1{,}3 \cdot p + 1{,}0 \cdot g$ *(Ø-last)*



Figur 3.9: Statisk system af dørpost.

Til posten anvendes massive træelementer af *MT2* uden stød.

$P = 11\ KN$

$q_v = 0{,}56 \cdot 1{,}5 \cdot (2{,}0 + 0{,}28) \cdot 0{,}5 = 0{,}96\ KN/m$

Beregningen gennemføres som for tværbelastet væg:

$$\frac{\sigma_{cd}}{k_c \cdot f_{cd}} + \frac{\sigma_{md}}{f_{md}} = 0{,}87 < 1$$

Brudbetingelsen er dermed opfyldt.

Udbøjningseftervisning:

LAK 1: *anvendelsesklasse 1*

$$u_{fin} = \frac{M_{max}}{N_{el}} = \frac{0{,}63 \cdot 10^6 \cdot 2150^2}{\pi^2 \cdot 8000 \cdot 4 \cdot 10^6} = 9mm$$

$2150/300 = 7\ mm < 9\ mm$

Stivheden i posten er ikke tilstrækkelig vederlagslængden, l skal øges for at få tilstrækkeligt tværsnit.

3.2.4 Dækelementer

Enkeltspændt bjælke

Enkeltspændte bjælker udført af massive træelementer undersøges for brudgrænse- og anvendelsestilstand analog til en bjælke udført i konstruktionstræ. Dog med de for massive træelementer gældende styrke- og stivhedstal og under hensyntagen til at eventuelle stød udføres i henhold til kapitel 2. I forbindelse med dimensioneringen skal følgende betingelser undersøges:

1. Brud i det hårdest påvirkede tværsnit.
2. Udbøjning fra egenvægt, nyttelast og naturlast.
3. Svingninger.

Eftervisningerne foretages i henhold til *Trænormens* retningslinier bortset fra betingelse 3, her anvendes principper fra svensk og tysk litteratur samt EC5.

1. $\frac{M}{W} \le f_{m,d}$

2. $u_{fin} = u_{inst}(1+\psi_2 \cdot k_{def}) \le {}^{l}/_{300}$

3. Svingninger
   a. Statisk kriterium
   b. Dynamisk kriterium

Svingninger

I *Trænormen* (DS 413, 1998) behandler man ikke begrebet svingninger i etageadskillelser. Svingninger i etageadskillelser kan skabe ubehag for beboeren og emnet beskrives blandt andet i, (Boverket, 1994), (STEP 1, 1995) samt diverse tysk litteratur.

I dette afsnit præsenteres de designprincipper, der anvendes i udlandet ved dimensionering af etageadskillelser mod uhensigtsmæssige svingninger, som følge af vibrationer fra menneskers gang på dækket. Dimensionering af trækonstruktioner i etageadskillelser mod svingning kan ske ved hjælp af et statisk - og et dynamisk kriterium.
Det statiske kriterium består i at kontrollere at nedbøjningen for en kortvarig punktlast på $Q_d = 1{,}0\ kN$ fordelt på én meter ikke overstiger $u_{max} = 1{,}5\ mm$. Nedbøjningen kan bestemmes som:

$$u = \frac{Q_d \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_l}$$

hvor

$(EI)_l$ er bøjningsstivheden pr. m i længderetningen $\left(\mathrm{Nm^2/m}\right)$.

Generelt anbefales det at nedenstående principper i det dynamiske kriterium anvendes for etageadskillelser med egenfrekvenser større end 8 Hz. I etageadskillelser med mindre egenfrekvenser vil den dynamiske belastning fra beboernes gang være noget større, og skal derfor behandles efter andre principper, der ikke er beskrevet her.

Etageadskillelserne betragtes i det efterfølgende som simpelt understøttet langs alle fire kanter. Det dynamiske svingningskriterium er opfyldt når:

$$v_{\max} = \frac{4 \cdot (0{,}4 + 0{,}6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200} \le v_{grænse} = 100^{(f \cdot z - 1)}$$

hvor

v er impulshastighedsresponsen $\left(\frac{\mathrm{m/2}}{\mathrm{Ns}}\right)$.

n_{40} er antallet af egensvingninger med frekvenser mindre end 40 Hz.

m er dækkets masse per fladeenhed $\left(\mathrm{kg/m^2}\right)$.

b er dækkets bredde (m).

l er dækkets længde i spændretningen (m).

f kan sidestilles med den laveste resonansfrekvens f_1.

z er den relative dæmpning, som sættes til 1% svarende til værdien for værdien for traditionelle træbjælkelag. $f \cdot z$ betegnes som konstruktionens dæmpningskoefficient.

Antallet af egensvingninger med frekvenser mindre end 40 Hz kan bestemmes som:

$$n_{40} = k_f \cdot \frac{b}{l} \cdot \left[\left[\left(\frac{40}{f_1}\right)^2 - 1\right] \cdot \frac{(EI)_l}{(EI)_b}\right]^{1/4}$$

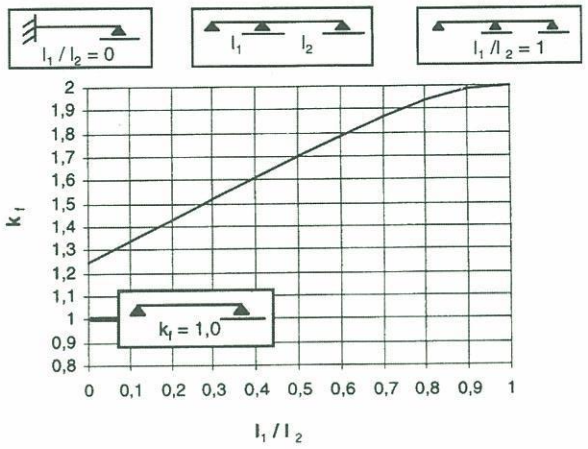
hvor

k_f er en faktor, som tager hensyn til understøtningen af dækket, se figur 3.10.

f_1 er den laveste resonansfrekvens (Hz).
$(EI)_b$ er bøjningsstivheden pr. m i bredderetningen $\left(\mathrm{Nm^2/m}\right)$.

For massive træelementer hvor $(EI)_l >> (EI)_b$ kan den laveste egenfrekvens bestemmes som:

$$f_l = k_f^2 \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$



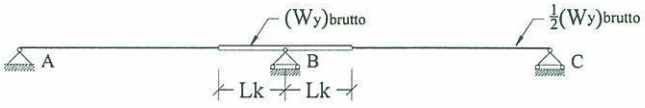
Figur 3.10: Graf til bestemmelse af k_f. Kilde: Werner, 1998.

De netop præsenterede formler forudsætter blandt andet, at man har kendskab til bøjningsstivheden på tværs af elementbredden, som er elementets svage retning. Anvendes massive træelementer uden nogen form for gulvplade til fordeling af lasten vil stivheden på tværs af elementbredden afhænge af sømmenes udtrækningsstyrke. I tysk litteratur gives der forskellige retningslinier til bestemmelse af bøjningsstivheden på tværs af elementbredden.
I (Werner, 1998) angives at elasticitetsmodulet på tværs af elementbredden kan bestemmes som:

$E_b = 0{,}013\ E_l$

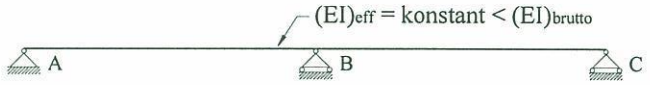
Kontinuert drager over 2 eller flere felter

Når man ved kontinuerte dragere anordner støddene over mellemunderstøtningerne, vekselvis til højre og til venstre med en angivet koblingslængde, får man et statisk system som en gerberdrager.
Den dimensionsgivende eftervisning i brudgrænsetilstanden skal udføres i punktet med størst feltmoment. Feltmomentet bestemmes som for en kontinuert drager med konstant bøjningsstivhed (EI). Ved beregning af modstandsmomentet W_y, medregnes kun halvdelen af brædderne, se figur 3.11.



Figur 3.11: Statisk system til eftervisning i brudgrænsetilstanden.

Deformationsberegninger udføres som for en gennemløbsdrager med konstant bøjningsstivhed (EI). Inertimomentet reduceres med 10% som kompensation for bræddestødende over mellemunderstøtningen, se figur 3.12



Figur 3.12: Statisk system til eftervisning i anvendelsestilstanden.

Den nødvendige komblingslængde (L_k) og de forekomne komblingskræfter (K) kan bestemmes i henhold til tabel 3.7.

Tabel 3.7: Koblingskræfter og koblingslængder for elementer spændende over flere felter. Kilde: Wolf et al, 1998.

Antal felter	Koblingskræfter: K = *Tabelværdi* $\cdot\ q \cdot b' \cdot l \cdot 2$					Koblingslængden: L_k = *Tabelværdi* l				
n	k_{bv}	k_{bh}	k_{cv}	k_{ch}	k_{dv}	l_{bv}	l_{bh}	l_{cv}	l_{ch}	l_{dv}
2	0,625	0,625				0,10	0,10			
3	0,250	0,420				0,10	0,18			
4	0,360	0,442	0,354			0,10	0,16	0,10		
5	0,330	0,425	0,460	0,330		0,10	0,17	0,10	0,10	
6	0,540	0,423	0,430	0,340	0,430	0,10	0,17	0,10	0,10	0,10
≥7	Yderligere midterfelter 0,430					Yderligere midterfelter 0,10				

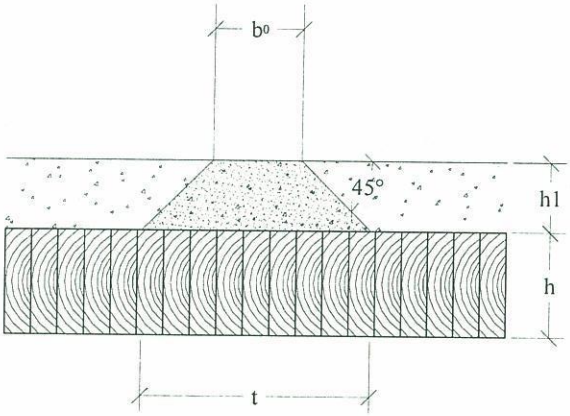
Tværfordeling af vertikale enkeltlaster

Har man enkeltlaster på dækket skal det eftervises, at sømningen mellem de enkelte brædder er tilstrækkelig til at overføre kræfterne til de tilstødende brædder.
Så vidt det er muligt bør enkeltlaster uden tværfordelingsplader på massive træelementer undgås. Ved større enkeltlaster anbefales det er man lægger en lastfordelingsplade/bjælke, således at lasten bliver fordelt på et større antal brædder.

Lastfordelingsbredden, t, for beton kan udtrykkes som følgende:

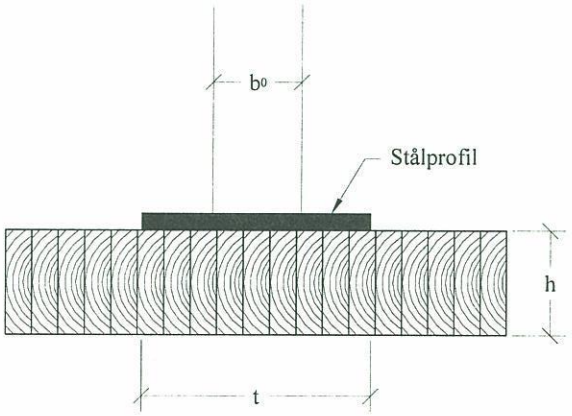
$t = b_0 + 2h_1$

Lastfordelingsbredden er ligeledes vist på figur 3.13.



Figur 3.13: Lastfordelingen ved anvendelse af beton som lastfordeler.

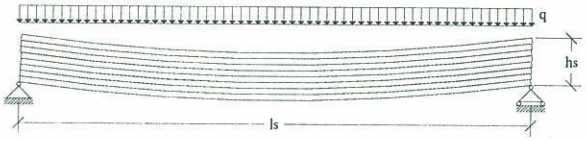
Anvendes i stedet en stålplade eller et stålprofil fordeler lasten sig over hele længden af plade eller profil, se figur 3.14. I den forbindelse er det nødvendigt at sikre sig at det anvendte profil har den nødvendige stivhed.



Figur 3.14: Lastfordelingen ved anvendelse af stålprofil som lastfordeler.

Dæk/tag som skive

Sømmede massive træelementer giver i egentlig forstand ingen skivevirkning, da horisontale belastninger i brædderne længderetning og vinkelret derpå giver forskydninger mellem de enkelte brædder.
For at opnå skivevirkning kan elementerne forsynes med trækbånd eller brædder. Effektiv skivevirkning af dæk kan også opnås ved at udstøbe et betonlag på dækket eller der kan etableres en skivevirkning ved at sømme krydsfiner rundt i kanten på dækket.



Figur 3.15: Skivebelastning vinkelret på brædderne.

Deformationen af skiven på figur 3.15 kan tilnærmelsesvis bestemmes af nedenstående udtryk:

$$\max u = \frac{q \cdot l_s^2}{8 \cdot h_s} \cdot \frac{e}{K \cdot b'}$$

hvor

q er vandret jævnt fordelt last
l_s er skivende "lysvidde"
h_s er skivens højde
e er afstanden mellem forbindelsesmidlerne
K er forbindelsesmidlernes stivhedtal.
b' er bræddebredden

Skivens tilladelige deformation er $u \leq \frac{l_s}{1000}$.

Langs kanten ved vederlagene skal dækket fastholdes for en vederlagskraft svarende til:

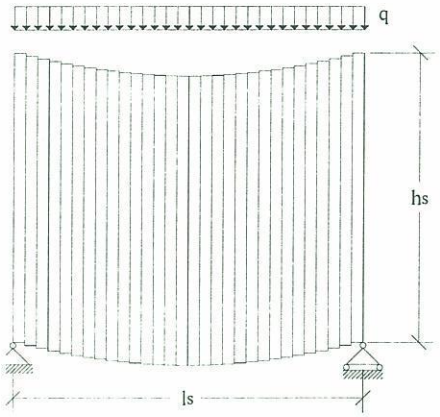
$F_v = ½ \cdot q \cdot l_s$

Den mindste afstand mellem forbindelsesmidlerne kan bestemmes som:

$$e \leq n_R \frac{l_s \cdot F_d}{2 \cdot F_v}$$

hvor

e er sømafstanden langs vederlaget
n_R er antallet af sømrækker langs vederlaget
F_d er den tilladelige regningsmæssige tværbelastning af forbindelsesmidlerne.



Figur 3.16: Skivebelastning parallelt med brædderne

Deformation af skive som vist på figur 3.16 kan bestemmes af nedenstående udtryk.

Middelforskydningen pr. fuge er givet ved:

$$def_{fuge,middel} = \frac{F_v}{2 \cdot (n_s \cdot K)}$$

hvor

F_v er vederlagsreaktionen (N)
n_s er antallet af søm pr. fuge
K er forbindelsesmidlernes stivhedstal (N/mm)

Den maksimale udbøjning på midten af skivefeltet kan findes som:

$$def_{fuge,\max} = ½ \cdot n_f \cdot def_{fuge,middel} < l_s/1000$$

hvor

n_f er antallet af fuger i skivefeltet

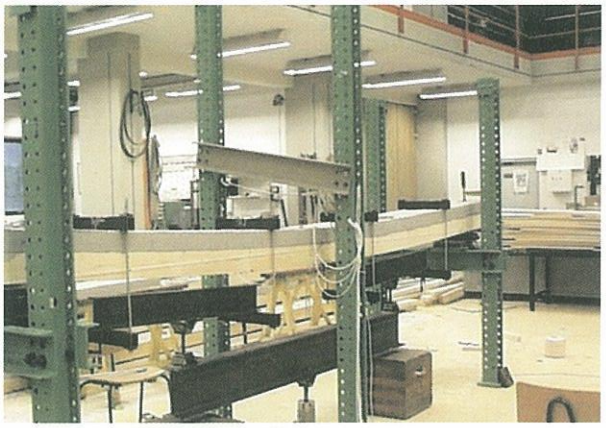
Eftervisning af fugen for maksimal forskydsningskraft:

$$e < n_R \cdot \frac{h_s \cdot F_d}{F_v}$$

Kompositdæk konstruktioner

Kompositdæk konstruktioner bestående af beton i trykzonen og træ i trækzonen har særdeles gode mekaniske egenskaber. Først og fremmest opnås en bedre fordeling af lasten på de massive træelementer ved en kombination med beton. En forbedret lastudbredelse kan ligeledes opnås ved at anvende forskellige former for pladematerialer i kombination med massive træelementer.

Ved at skabe tilstrækkelig sammenhæng mellem betonen i trykzonen og træet i trækzonen kan der opnås spændvidder på ca. 15 m (Natterer et al, 1996). Denne sammenhæng kan skabes ved at udfræse fuger i overfladen på det massive træelementer, hvori der monteres specialfremstillede bolte. Boltene monteres således at det er muligt at foretage en efterspænding, når betonen er hærdet. Forskningsarbejdet omkring kompositkonstruktioner med beton er i fuld gang i såvel Danmark som i udlandet, se figur 3.17.

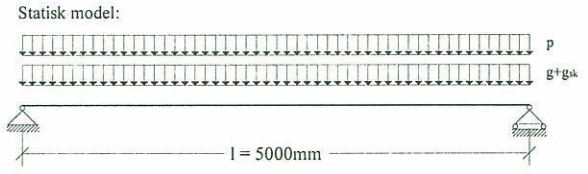


Figur 3.17: Forsøgsopstilling på Danmarks Tekniske Universitet med kompositkonstruktioner bestående af 80 mm beton i trykzonen og 120 mm massive træelementer i trækzonen.

Udover de forbedrede mekaniske egenskaber for kompositkonstruktionerne kan de brand- og lydtekniske egenskaber ligeledes forbedres. I (Natterer et al, 1996) nævnes brandmodstandstider på op imod 90 minutter og lydisolering på 60 dB.

Eksempel: Simpelt understøttet etagedæk

I dette eksempel betragtes en etageadskillelse udført af massive træelementer, simpelt understøttet langs alle fire kanter. I eksemplet betragtes udelukkende træelementet, det vil sige der ses ikke på bidrag fra eventuel gulvbelægning. Elementet regnes udført af træ iht. *MT1* og der ses på et 1,0 m bredt udsnit af dækket.



Figur 3.18: Simpelt understøttet etagedæk.

$P_k = 2,0\ kN/m2$ $\quad h = 0,16\ m$
$g_{sk} = 0,5\ kN/m2$ $\quad W_y = 4,27106\ mm3$
$g = 0,98\ kN/m2$ $\quad I_y = 341106\ mm4$
$f_{mk} = 9\ MPa$ $\quad E_0 = 8800\ MPa$

Betingelse 1:
LAK 2.1 Brud: $1,3 \cdot P + 1,0(g_{sk}+g)$ *(L-last)*
Anvendelsesklasse 1 - Normalsikkerhedsklasse

$$M = \frac{1}{8} \cdot 4,08 \cdot 5,0^2 = 12,75 MPa$$

$$f_{md} = \frac{10,8}{1,64} \cdot 0,7 = 4,61 MPa$$

Det nødvendige modstandsmoment kan bestemmes som:

$$\text{Nødv.} W_y = \frac{12,75 \cdot 10^6}{4,61} = 2,8 \cdot 10^6 mm^3 < W_y$$

Brudbetingelsen er således opfyldt.

Betingelse 2:
LAK 1 Anv.: $1,0\ P + 1,0\ (g_{sk}+g)$
Anvendelsesklasse 1 - Normal sikkerhedsklasse
Udbøjningen fra henholdsvis egenvægt og nyttelast kan bestemmes som:

$$u_g = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,48 \cdot 5000^4}{8800 \cdot 341 \cdot 10^6} \cdot 1,6 = 6,4 mm$$

$$u_p = \frac{5}{384} \cdot \frac{2,0 \cdot 5000^4}{8800 \cdot 341 \cdot 10^6} \cdot 1,18 = 6,4 mm$$

$$u_g + u_p = 12,8\ mm < {}^{5000mm}/_{300} = 16,7 mm$$

Betingelse 2 anvendelseskrav er således opfyldt.

Betingelse 3a:
For at kunne dimensionere etagedækket for uacceptable svingninger er det nødvendig at kende gulvets størrelse.

Gulvets areal er givet ved: $A_{rum} = l \cdot b_{rum}$

hvor

$b_{rum}=8,0\ m$

$\rho = 250\ kg/m^3$ er densiteten for det massive træelement.

$h = 0,16\ m$ er tværsnitshøjden for de massive træelementer.

Fladelasten for det massive træelement er:
$M = \rho \cdot h = 350\ kg/m^3\ 0,16\ m = 56\ kg/m^2$

I undersøgelsen betragtes et udsnit af element bredden, $b_{element}$:

$b_{element}=1,0\ m$

Bøjningsstivheden pr. m er:
$(EI)_l = 8800 \cdot 341 \cdot 10^6 = 3,0 \cdot 10^{12}\ Nmm^2/m$
$(EI)_b = 114,4 \cdot 341 \cdot 10^6 = 3,9 \cdot 10^{10}\ Nmm^2/m$

Det statiske svingningskriterium giver:

$$u = \frac{1000 \cdot (5000)^3}{48 \cdot 3,0 \cdot 10^{12}} = 0,87 mm < 1,5 mm$$

Det massive træelement overholder således det statiske lastkriterium.

Betingelse 3b:
Den laveste resonansfrekvens bestemmes til:

$$f_1 = 1,0^2 \cdot \frac{\pi}{2 \cdot 5,0} \cdot \sqrt{\frac{3,0 \cdot 10^6}{56}} = 14,5 Hz > 8 Hz$$

Antallet af egensvingninger med frekvenser mindre end 40 Hz er:

$$n_{40} = k_f \cdot \frac{8,0}{5,0} \cdot \sqrt[4]{\left[\left(\frac{40}{14,5}\right)^2 - 1\right] \cdot \frac{3,0 \cdot 10^6}{3,9 \cdot 10^4}} = 7,6$$

Den maksimale impulshastighedsrespons kan bestemmes som:

$$v_{max} = 4 \cdot \frac{(0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{56 \cdot 8,0 \cdot 5,0 + 200} = 0,008 \frac{({}^{m}/_{s})}{N \cdot s}$$

Den tilladte impulshastighedsrespons bestemmes med et relativt dæmpningstal på $\zeta = 1,0\ \%$:

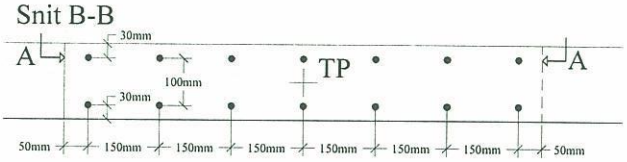
$$v_{grænse} = 100^{(14,5 \cdot 0,01 - 1)} = 0,02 \frac{({}^{m}/_{s})}{Ns} > v_{max}$$

Det massive træelement opfylder således det dynamiske lastkriterie.

Eftervisning af stød i trediedelspunkt:

Snit A-A

Snit B-B



Figur 3.19: Udsnit af stødsamling.

Momentet i støddsamling kan bestemmes til:
$M = 0{,}064(½4{,}081{,}17(5{,}0\text{-}1{,}17)) = 0{,}58\ kNm$

Tværkraften i støddsamlingen kan bestemmes til:
$V = 0{,}064(½4{,}085{,}0\text{-}1{,}174{,}08) = 0{,}35 kN$

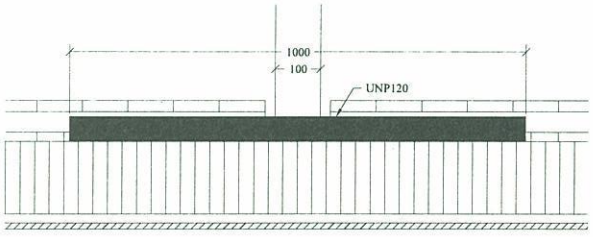
Den maksimale belastning på det hårdest belastet søm:

$$N_1 = \frac{0{,}58 \cdot 0{,}45}{4 \cdot (0{,}45^2 + 0{,}30^2 + 0{,}15^2)} + \frac{0{,}35}{14} = 0{,}23 kN$$

da $N_1 < 170 \cdot 3{,}1^{1{,}7} \cdot 0{,}7/1{,}64 = 0{,}5\ kN$ er bæreevnen af det hårdest belastet søm tilstrækkelig.

Eksempel: Punktlast på simpelt understøttet dæk

Udsættes dækelementet i foregående eksempel for en punktlast på midten af dækket, vil det være nødvendigt at fordele lasten således at af tværsnittets brædder er påvirket. se figur 3.20.



Figur 3.20: Punktbelastning på dæk.

Som trykfordeling vælges en UNP120, l = 1,0 m. Undersøges stivheden af UNP-prodilet som en simpelt understøttet bjælke med en central belastning fås en deformation på ca. 0,5 mm, dvs. profilet er tilstrækkeligt stift til at fordele lasten. Stammer punktlasten fra en søjle, der understøtter et tag udsat for snelast fås følgende.

Betingelse 1:
LAK 2.1 Brud: $1{,}3 \cdot P + 1{,}0 \cdot g$ *(K-last)*
Anvendelsesklasse 1 – Normal sikkerhedsklasse
Momentet på midten af dækket kan bestemmes som:

M = 16,06 kNm

$$f_{md} = \frac{10{,}8}{1{,}64} \cdot 0{,}9 = 5{,}93 MPa$$

$$\text{Nødv.} W_y = \frac{16{,}06 \cdot 10^6}{5{,}93} = 2{,}71 \cdot 10^6 mm^3 < W_y$$

Brudbetingelsen er således opfyldt.

Betingelse 2:
LAK 1 Anv.: $1{,}0 \cdot P + 1{,}0 \cdot g$
Udbøjningen kan bestemmes som:

$u_g = 6{,}4\ mm$ fra foregående eksempel.

$$u_Q = \frac{1}{48} \cdot \frac{8000 \cdot 5000^4}{8800 \cdot 341 \cdot 10^6} \cdot 1{,}0 = 6{,}9 mm$$

$$u_g + u_p = 13{,}3\ mm < {}^{5000mm}/_{300} = 16{,}7 mm$$

Betingelse 2 anvendelseskrav er således opfyldt.

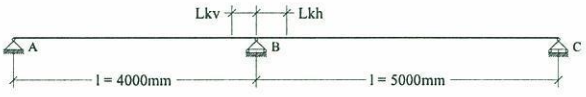
Det skal selvfølgelig vurderes, om der samtidig med enkeltlasten vil kunne forekomme nyttelast fra bolig. hvilket vil være det mest sandsynlige. Dækket i eksemplet vil ikke kunne klare kravet til nedbøjning, hvis der også er indflydelse fra nyttelast. Dækket kan eventuelt gøres stivere ved at udføre den del af dækket, som påvirkes af en punktlast, med brædder uden stød.

Eksempel: Massive træelementer som kontinuert drager

Fra vægeksemplet haves et system med massive træelementer som gennemløbsdrager over to felter.

$P_k = 2{,}0\ kN/m^2$ $\quad g = 0{,}8\ kN/m^2$
$g_{sk} = 0{,}5\ kN/m^2$ $\quad h = 0{,}12\ m$

Beregninger i henhold til betingelse 1 – 3 undersøges efter de samme principper som for eksemplet med det simpelt understøttede dæk og er derfor ikke vist her. Derimod er den nødvendige bæreevne af stød over midtervæggen bestemt, se figur 3.21



Figur 3.21: Etagedæk med spænd over to felter.

Den nødvendige stødlængde bestemmes til:

$L_{kv} = 0{,}1 \cdot 5{,}0\ m = 0{,}5\ m$
$L_{kh} = 0{,}1 \cdot 4{,}0\ m = 0{,}4\ m$

Tværbæreevnen for et 3,1/80 søm kan bestemmes som:

$f_d = 170\ \ 3{,}1^{1{,}7}\ 0{,}7/1{,}64 = 0{,}497\ kN$

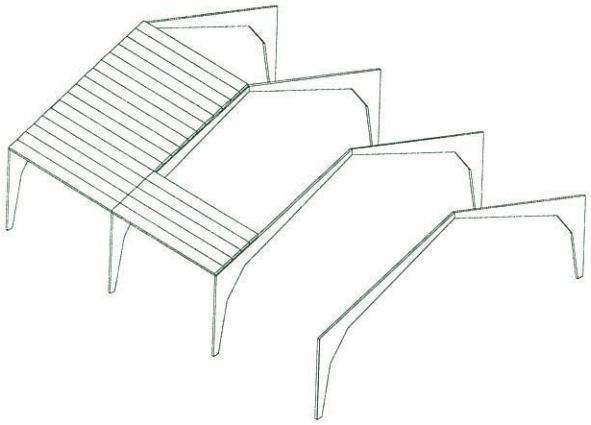
Koblingskraften kan bestemmes til:

$K_H = 0{,}625 \cdot 0{,}032 \cdot 3{,}9 \cdot 5{,}0 \cdot 2 = 0{,}78\ kN$

To søm har således den tilstrækkelig bæreevne til at optage koblingskraften.
Sømafstanden sættes konstruktivt til 15 cm i stødet over midtervæggen.

Eksempel: Afstivende tagskive

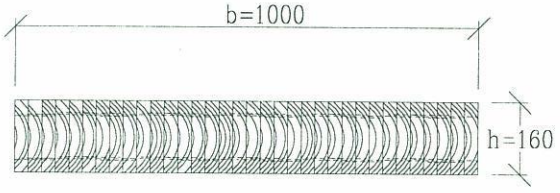
I dette eksempel betragtes en hal udført med limtræsrammer, og som tag anvendes massive træelementer.



Figur 3.22: Limtræsrammer med massive træelementer som tag.

Rammeafstand: 5,8 m
Spændvidde: 15 m
Spærbenshøjde: 4 m
Taghældning: 20

De massive træelementer er opbygget af 30x160 mm planker af *MT1*-kvalitet med stød.
Elementerne er sømmet med galvaniserede firkantsøm 3,4x90, i to rækker med en effektiv sømafstand på 12 cm.



Figur 3.23: Udsnit af tagelement udført af massive træelementer.

$W_y = 4266 \cdot 10^3\ mm^3$
$I_y = 341 \cdot 10^6\ m^4$
Anvendelsesklasse 2

Karakteristiske lasters projektion vinkelret på tagfladen:

Vind: 0,20 KN/m²
Sne: 0,65 KN/m²
Egenvægt: 1,20 KN/m²

Betingelse 1:
LAK 2.1 brud: *1,5·sne+0,5·vind+1,0·g (k-last)*
Anvendelsesklasse 2 – Normal sikkerhedsklasse

$M = 10{,}24\ KNm$

$$f_{md} = \frac{10{,}8}{1{,}64} \cdot 0{,}9 = 5{,}93 MPa$$

$$\text{Nødv.} W_y = \frac{10{,}24 \cdot 10^6}{5{,}93} = 1{,}73 \cdot 10^6\ mm^3 < W_y$$

Betingelse 2:
LAK 1 anv.: *1,0·p+1,0·g*

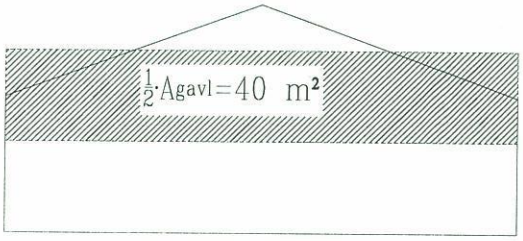
$$u_g = \frac{5}{384} \cdot \frac{1{,}20 \cdot 5800^4}{8800 \cdot 341 \cdot 10^6} \cdot 1{,}8 = 11mm$$

$$u_p = \frac{5}{384} \cdot \frac{0{,}85 \cdot 5800^4}{8800 \cdot 341 \cdot 10^6} \cdot 1{,}0 = 4mm$$

$U_g + U_p = 15\ mm < l/300 = 19\ mm.$

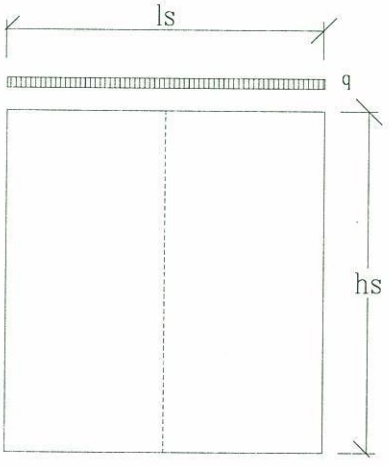
Udbøjningskravet er dermed opfyldt.

Eftervisning af tagskiven:



Figur 3.24: Tagskiven skal optage en vindlast svarende til vindtryk+sug på ½ A_{gavl}.

$q_d = 1{,}2\ KN/m^2$ $q = 3{,}0\ KN/m$



Figur 3.25: h_s er tagfladens sande længde

$n_s=17,4/2\cdot0,12=290$ stk søm

$F_v=24$ KN

$K=816$ N/mm

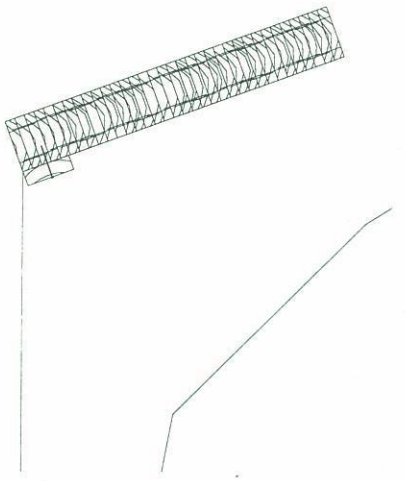
$$def_{fuge,middel}=\frac{24\cdot10^3}{2\cdot290\cdot816}=0,05mm$$

$$n_f=\frac{16000}{30}=533stk \text{ fuger}$$

$def=0,5\cdot533\cdot0,05=13$ mm

$l_s/1000=16$ mm

Eftervisning af kanten:



Figur 3.26: Kantbefæstigelse af tagskive.

$$e<\frac{17,4\cdot10^3\cdot170\cdot3,4^{1,7}}{24000}=989mm$$

Tagskiven skal minimum fastgøres til kantbjælken pr. 99 cm.

3.3 BRANDFORHOLD

Massive træelementers brandtekniske egenskaber beskrives med udgangspunkt i kapitel 6 og 4 i henholdsvis BR-95 og BRS-98. Brandtekniske forhold er et vigtigt område for byggeriet, da brandforholdene har stor betydning for brugerens og befolkningens sikkerhed.
Op igennem 90'erne har der i Norden været stor fokus på trækonstruktioners brandtekniske egenskaber. Formålet med den øgede fokus har været at klarlægge træets brandtekniske egenskaber med henblik på at opføre fleretagers huse med bærende konstruktioner af træ.

I modsætning til stål og beton er træ brændbart og opfattes derfor fejlagtigt af mange som brandteknisk dårligere end stål og beton. Selvom træ er et brændbart materiale kan det, set ud fra et brandteknisk synspunkt, være bedre end ubrændbare materialer. En brandpåvirket trækonstruktion har en forudsigelig indbrændingshastighed, der gør det muligt at dimensionere trækonstruktioner, så den nødvendige bæreevne gennem brandforløbet bevares.

I Danmark stilles materialespecifikke brandkrav, hvilket betyder at der skeles mere til bygningsdelenes materialer end til deres brandtekniske egenskaber. I bygningsreglementet udmønter de materialespecifikke brandkrav sig i at bygningsdelene inddeles i ubrændbare (BrandSikre) og brændbare (BrandDrøje) bygningsdele. Træ er et brændbart materiale. Bygningsdele, hvori træ indgår kan således klassificeres som BD-bygningsdele.

For BD-bygningsdele angives der ligeledes i Bygningsreglementet et fast tidsrum og integritet på eksempelvis 30, 60 eller 120 minutter, hvori konstruktionens egenskab skal overholdes. Konstruktionens egenskab kan være bærende og/eller adskillende.

Eksempel:
En bærende BD30 konstruktion skal opretholde sin bæreevne i et tidsrum på 30 minutter under en brand.

Bygningsreglementet stiller desuden krav til overflader og beklædninger i bygninger. For overflader skelner man mellem klasse A og klasse B materialer, hvor klasse A er svært antændelige materialer, mens klasse B er let antændelige materialer. Beklædninger opdeles i klasse 1 og klasse 2, hvor klasse 1 beklædninger kun kan opbygges af klasse A materialer og klasse 2 beklædninger skal være mindst klasse B materialer. Ubehandlet træ og træbaseret plader tilhører gruppen af klasse B materialer.

Bygningsreglementets kapitel 6 om brandforhold og *Tillæg 1 til bygningsreglement 1995*[1)] gør det muligt at opføre fleretagers træhusbyggeri med bærende konstruktioner af træ. Dette giver to muligheder for at opføre træhusbyggerier i op til 4 etager, hvor gulv i øverste etage ikke er mere end 9,6 m over terræn, nemlig:

1. *Bygningen kan forsynes med et automatisk sprinkleranlæg.*
2. *De bærende trækonstruktioner kan beskyttes af et ubrændbart eller næsten ubrændbart brandbeskyttelsessystem.*

[1)] Tillæg 1 til bygningsreglement 1995 udkom første gang 15. oktober 1999, men blev ophævet af tillæg 1 som udkom 7. juli 2000 med ikrafttræden fra den 1. august 2000.

Et brandbeskyttelsessystem skal hindre den bagvedliggende trækonstruktioner i at nå temperaturer, som svarer til træets antændelsestemperatur, og dermed hindre trækonstruktionen i at deltage i branden. Antændelsestemperaturen for træ beskrives flere steder i litteraturen til at ligge i området 250-350°C. Ved forsøg under kontrollerede forhold i ovn vil den kritiske temperatur være ca. 225°C (Larsen og Riberholt, 2000). Antændelsestemperaturen er i praksis afhængig af flere forhold, hvoraf specielt træets dimensioner og påvirkningens varighed har betydning. Man vil kunne se lavere antændelsestemperaturer ved længere tids påvirkning, ligesom træ i små dimensioner er lettere at antænde end træ i store dimensioner. Det store trævolumen i massive træelementer gør konstruktionen svære at antænde sammenlignet med spinkle trækonstruktioner. Samtidig indeholder massive træelementer store bæreevnereserver til forskel fra spinkle træskeletkonstruktioner.
Dansk Brandteknisk Instituts brandtekniske vejledning nr. 33 beskriver, hvorledes et brandbeskyttelsessystem kan udføres, samt brandtekniske krav til bygningsdele og til indvendige væg- og loftsoverflader i træhusbyggerier op til 4 etager.

3.3.1 Materialeegenskaber

Som nævnt har temperaturen omkring træet stor indflydelse på, hvorvidt træet vil antænde og deltage i branden eller ej. Træets vedvarende deltagelse i branden afhænger desuden af den varmemængde som tilføres. Forsøg udført af Sven Hadvig på limtræsblokke har vist, at når temperaturen kommer under 600°C, er varmetilførelsen for lille til at kunne opretholde en nedbrydende ulmebrand i træet (Hadvig, 1981). Disse forsøg viser at temperaturen, hvor indbrændingen i træet vil ophøre, er ca. dobbelt så stor som træets antændelsestemperatur, hvilket kan forklares ved at der i forbindelse med branden dannes et isolerende forkulningslag på træets overflade, som beskytter det bagvedliggende resttværsnit. Det har dog ikke været muligt at finde yderligere litteratur med tilsvarende undersøgelser til at bekræfte temperaturen til indbrændingens ophør.

3.3.2 Beregningsvejledning

Trækonstruktioners brandtekniske egenskaber kan fastlægges i henhold til lastkombination 3.3 ulykkeslast – brand jf. DS409 og DS410. Ved beregningerne skal den termiske last fastsættes enten ud fra et nominelt brandforløb (standardbrandforløber) eller ud fra et parametrisk brandforløb (DS 413, 1998). Trænormen angiver desuden to forenklede beregningsmetoder:

Resttværsnitmetoden
Ved resttværsnitsmetoden regnes med et effektivt resttværsnit svarende til det oprindelige tværsnit med fradrag fra indbrændingszone og en svækket zone.
Metoden anvendes, hvor den termiske last regnes ud fra standardbrandkurven og der anvendes uændrede styrke- og stivhedsegenskaber.

Styrkereduktionsmetoden
Ved styrkereduktionsmetoden regnes med et effektivt tværsnit svarende til det oprindelige tværsnit med fradrag fra indbrændingszonen med eller uden hensyntagen til hjørneeffekter. Som navnet antyder regnes der med reducerede styrke- og stivhedsværdier, men metoden kan anvendes for et nominelt brandforløb som et parametrisk brandforløb.

I denne håndbog er det er valgt kun at se på resttværsnitsmetoden.

Resttværsnitsmetoden

Ved branddimensionering efter resttværsnitsmetoden i henhols til DS 413 beskrives brandforløbet ved hjælp af standardbrandkurven, som ifølge *Lastnormen* kan beskrives ved hjælp af formlen:

$\theta_g = 20+345 \cdot log_{10}(8t+1)$.

Før brandpåvirkning: $A = h \cdot b$
Efter brandpåvirkning: $A' = h' \cdot b'$

De reducerede tværsnitsdimensioner bestemmes som:

$h' = h-(d_{char}+k_0 d_0)$, $b' = b-(d_{char}+k_0 d_0)$

hvor

$d_{char} = \beta_0 \cdot t$ (mm) med brandvarigheden t og indbrændingshastigheden β_0 angivet i tabel 3.8.

$k_0 d_0$ svarer til en svækket zone i trækonstruktionen, hvor $d_0 = 7mm$ for $t \geq 20\ min$. For $t < 20\ min$ interpoleres retlinet fra 0 til 7 mm, hvilket giver $d_0 = 0{,}35 \cdot t$.

k_0 er en reduktionsfaktor, som afhænger af beskyttelsen af konstruktionens overflade. For ubeskyttede konstruktioner er $k_0 = 1{,}0$. For konstruktioner beskyttet af plademateriale skelnes mellem træbaseret beklædninger og andre beklædninger.

Beskyttelse med træbaseret beklædning:

$$k_0 = \begin{cases} \dfrac{t_{fi,req} - t_{pr}}{20} & \text{for } t_{fi,req} - t_{pr} < 20 \text{ min} \\ 1{,}0 & \text{for } t_{fi,req} - t_{pr} \geq 20 \text{ min} \end{cases}$$

Beskyttelse med andre materialer:

$$k_0 = \begin{cases} \dfrac{t_{fi,req} - t_{pr}}{10} & \text{for } t_{fi,req} - t_{pr} < 10 \text{ min} \\ 1{,}0 & \text{for } t_{fi,req} - t_{pr} \geq 10 \text{ min} \end{cases}$$

hvor

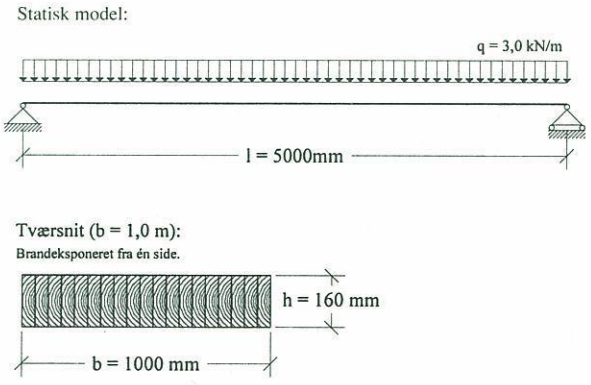
$t_{fi,req}$ (min) er den krævede brandmodstandsevne i minutter og t_{pr} er beklædningens beskyttelsestid i minutter, bestemt som:

$$t_{pr} = {tykkelse}/{\beta_0} - 4 \text{ min}$$

Tabel 3.8: Indbrændingshastigheder i henhold til Trænormen. Tabellens værdier må kun anvendes for $d_{char} \leq b/4$ og $d_{char} \leq h/4$.

	β_0 (mm/min)
Nåletræ ($\rho_{12,k}$ = 320 kg/m³)	0,75
Limtræ ($\rho_{12,k}$ = 380 kg/m³)	0,65
Løvtræ ($\rho_{12,k}$ = 450 kg/m³)	0,50

Som et eksempel på anvendelsen af resttværsnitsmetoden bestemmes bæreevnen af massive træelementer anvendt som etageadskillelse og udsat for bøjning. Dækelementet er fremstillet af udenlandsk træ og med stød i trediedelspunkterne som eksemplet fra konstruktionsafsnittet. Elementet regnes udsat for et nominelt brandforløb i 60 minutter og er ubeskyttet fra den brandvirkede side, se figur 3.27.



Figur 3.27: Beregningseksempel på massivt træelement, hvor der ses på 1,0 m af dækbredden.

$$M = \tfrac{1}{8} \cdot q \cdot l^2 = \tfrac{1}{8} \cdot 3{,}48 \cdot 5{,}0^2 = 10{,}88 kNm$$

Indbrændingsdybden bestemmes som:

d_{char} = 0,75 mm/min60 min = 45 mm

Den reducerede konstruktionshøjde er givet ved:

h' = 160 mm – (45 mm + 7 mm) = 108 mm

Det reducerede modstandsmoment er givet ved:

$$W' = \tfrac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \tfrac{1}{6} \cdot 1{,}0m \cdot (0{,}108m)^2 = \underline{1{,}94 \cdot 10^{-3} m^3}$$

Bøjningsspændingen i dækket efter et 60 minutters nominelt brandforløb kan bestemmes som:

$$\sigma_m = \frac{M}{W'} = \frac{10{,}88 kNm}{1{,}94 \cdot 10^{-3} m^3} = \underline{5594 \, {kN}/{m^2} \; (5{,}6 MPa)}$$

For massive træelementer udført med træ svarende til styrkeklasse K18, vil bøjningsspændingen give en udnyttelsesgrad på:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{f_{m,k}} = \frac{5{,}6 MPa}{0{,}5 \cdot 18 MPa} = \underline{\underline{0{,}62}}$$

Ubeskyttede massive træelementer med en konstruktionshøjde på 160 mm kan således modstå et 60 minutters nominelt brandforløb. I henhold til bygningsreglementets brandkrav er det for de fleste konstruktioners vedkommende nødvendigt at inddække trækonstruktionerne med et brandbeskyttelsessystem, således at træet ikke deltager i branden.

3.3.3 Brandbeskyttelse og brandspredning

For at kunne overholde brandkravene vil man ved brug af trækonstruktioner ofte benytte beklædningsmaterialer for at beskytte trækonstruktionen. Selvom de store trætværsnit/bæreevnereserver taler for at anvende ubeskyttede massive træelementer betyder kravene i bygningsreglementet, at man ofte vil beskytte sine bærende massive træelementer med en eller anden form for beklædning. Formålet med den brandbeskyttende beklædning er i et givet tidsrum at beskytte træoverfladen i at opnå temperaturer, der kommer i nærheden af træets antændelsestemperatur. Til beskyttelse af massive træelementer kan eksempelvis anvendes pladematerialer som:

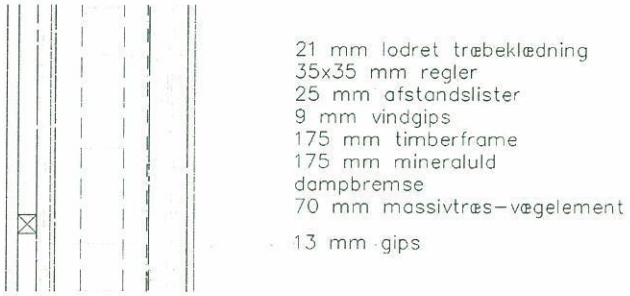
- *Gipsplader*
- *Kalciumsilikatplader*
- *Fibergipsplader*

I stedet for pladematerialer kan etageadskillelser brandbeskyttes med et betonlag på oversiden. Udover at beskytte trækonstruktioner mod brand er det ligeledes vigtigt at hindre at branden spreder sig fra rum til rum (brandsektion til brandsektion). En brand kan sprede sig ved stråling, ledning eller konvektion. For at undgå brandspredning er det nødvendigt at opsætte brandstop i hulrum. Man bør anvende brandstop følgende steder, (Flervånings Trähus, 1997):

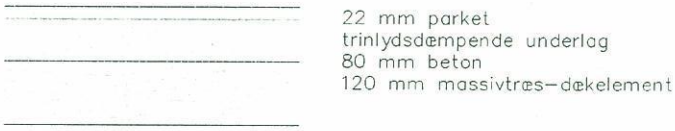
- *I vægge i niveau med bjælkelag og tag.*
- *I bjælkelag med vederlag for brandsektionsadskillende vægge.*
- *I begge ender af trapper.*
- *Rundt om rør, ventilationskanaler og skorstene.*

Brandstop udføres eksempelvis ved hjælp af træ, krydsfiner, mineraluld eller med udstøbningsmaterialer, som har tilstrækkelig integritet, se Træ 38, Træ og brand.

3.3.4 Konstruktionseksempel



Figur 3.28: Eksempel ydervæg (BD30 konstruktion).

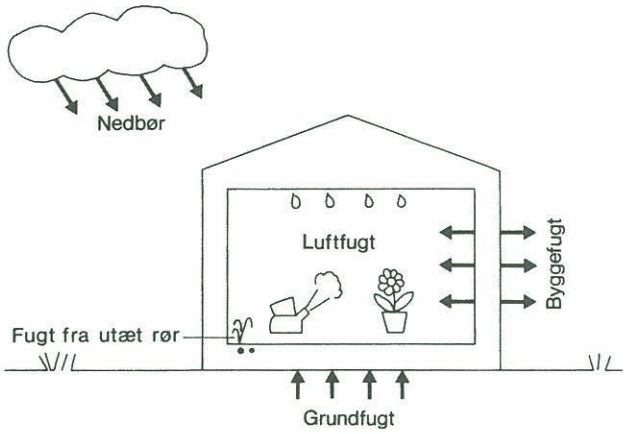


Figur 3.29: eksempel etagedæk (BD60 konstruktion).

3.4 FUGT

Fugtisolering af materialer og konstruktioner er nødvendigt for at sikre disses holdbarhed og dermed lang levetid. For trækonstruktioners vedkommende skal det ligeledes sikres at der ikke opstår uønskede sprækker eller spændinger som følge af træets fugtafhængige dimensionsændringer. Bygningsreglementets kapitel 7 beskriver de krav myndighederne stiller til fugtisolering i bygninger. I forbindelse med fugtisolering af materialer og konstruktioner er det først og fremmest vigtigt at kende de typiske fugtkilder, som kan optræde i byggeriet, se figur 3.30

Bygningsreglementets kapitel 7 beskriver de generelle retningslinier fugtisolering af bygninger og materialer. For fugtfølsomme materialer som træ gælder det specielt, at der skal sikres mod skadelig fugtophobning som følge af kondensation. En generel beskrivelse af de i figur 3.30 viste fugtkilder kan angives som vist i tabel 3.9, se side 72.



Figur.3.30: SBI-anvisning 178 viser typiske fugtkilder i byggeriet. Kilde: Andersen et al, 1993.

I byggerier med massive træelementer vil det specielt være områderne *byggefugt* og *luftfugt*, man skal være særligt opmærksom på. Den mængde vand som indbygges i massive træelementer ved fremstillingen afhænger af hvilket fugtindhold, der er i de anvendte brædder, se kapitel 2.
I forbindelse med produktionen af elementerne sikres det, at fugtindholdet i elementerne overholder de opsatte grænseværdier. Ved den efterfølgende transport, lagring og montage af elementerne kræves det ligeledes, at elementerne ikke tilføres fugt fra omgivelserne. Håndteringen og logistikken på byggepladsen er i den forbindelse et vigtigt område at fokusere på.

Fugtpåvirkningen af materialer og bygningsdele i anvendelsesfasen afhænger af flere faktorer blandt andet konstruktionsopbygning, udeklima, indeklima. For at sikre fugtteknisk rigtige konstruktionsløsninger er det således nødvendigt at foretage en fugttekniske vurdering af konstruktionernes egnethed. En fugtteknisk vurdering kan foretages ved beregninger eller overholdelse af generelle konstruktionsprincipper.
En måde at vurdere risikoen for skadelig fugtpåvirkninger på er brugen af rumklimaklasser. Man opererer med 3 rumklimaklasser, se tabel 3.10.

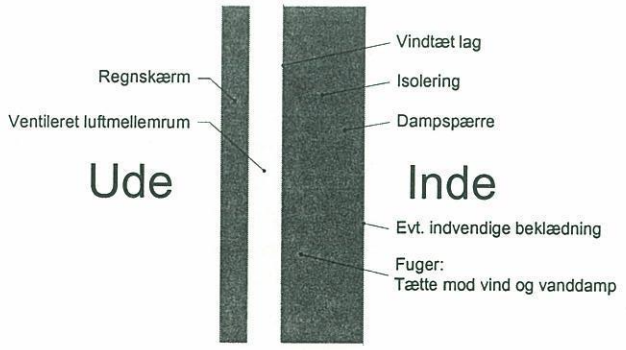
Tabel 3.10: Rumklimaklasser med tilhørende dugpunktstemperatur. Kilde: Frit efter BB14, 1994.

Rumklimaklasse		
	1 Tørre lagerhaller Tørre industrilokaler Sportshaller uden tilskuere	Dugpunkt < 0 °C (5 g vand/m³ luft)
	2 Boliger Skoler Kontorer Butikslokaler Institutioner	Dugpunkt < 11 °C (10 g vand/m³ luft)
	3 Sportshaller med tilskuere Svømmehaller Vaskerie Baderum Fugtige industrier	Dugpunkt > 11 °C (>10 g vand/m³ luft)

Tabel 3.9: En generel beskrivelse af typiske fugtkilder i byggeriet samt generelle forholdsregler til forebyggelse af skader på specielt trækonstruktioner.

	Byggefugt	Nedbør	Luftfugt	Grundfugt	Fugt fra utæt rør
Forholdsregler	Byggefugt tilføres materialer eller konstruktioner i forbindelse med fremstilling, lagring eller montage af materialerne.	Nedbør i form af regn og sne påvirker primært klimaskærmen og har således størst betydning for materialerne i klimaskærmwen.	Luftfugt er den fugtpåvirkning materialer udsættes fra indeklimaet. Beboernes aktivitet, levevis og udstyr som eksempelvis vaskemaskine og lignende har betydning for fugtproduktionen i bygningen og dermed luftfugtpåvirkningen.	Grundfugt indtrængning i bygningen har specielt betydning for materialer som direkte eller indirekte er i kontakt med terræn.	Fugt fra utætte rør og andre installationer kan påvirke materialer og konstruktioner flere steder i bygningen. Rørinstallationer kan være placeret skjult i vægge og dæk og dermed kan der gå lang tid før en vandskade fra et utæt rør opdages.
Beskrivelse	For at sikre et acceptabelt fugtindhold i materialerne i byggefasen er det vigtigt, at fugtindholdet i komponenterne kontrolleres ved fremstillingen ligesom komponenterne beskyttes mod fugt fra nedbør og andre materialer i forbindelse med lagring og montagen. Ved anvendelse af trækonstruktioner er det vigtigt at fugtindholdet ved indbygningen svarer til det fugtindhold træet vil indstille sig ved igennem anvendelsesperioden.	I praksis har nedbøren størst betydning for materialerne i klimaskærmen. Det gælder således for disse materialer at sikre, at den bagvedliggende konstruktion ikke bliver påvirket af nedbøren samtidig med, at fugtindholdet i de anvendte materialer i klimaskærmen ikke er til skade for materialet. I forbindelse med opbygning af klimaskærmskomponenter anvender man ofte to-trinstætningen.	Fugtig rumluft vil kondensere når temperaturen på overfladen kommer under dugpunktstemperaturen. Det er især vigtigt, at hindre fugtig rumluft i at komme ud og kondensere i skjulte bygningsdele. Kondensation af fugtig rumluft kan hindres ved at opbygge sine bygningsdele således at fugtig rumluft ikke kan transporteres ud i konstruktionen via diffusion eller konvektion. Risikoen for kondensation af fugtig rumluft mindskes ligeledes ved at sikre den nødvendige ventilation i boligen. I SBI-anvisning 178 angives et luftskifte på ½ gang i timen at være tilstrækkeligt i boliger (Andersen et al, 1993).	Terrænforholdene har stor betydning for mængden af indtrængende grundfugt. I terrændæk beskyttes bygningsdele ved at etablere et kapillarbrydende lag samt ilægge en fugtspærre mellem terræn og fugtfølsomme materialer	I de områder af bygningen, hvor man har vandinstallationer er det vigtigt at de konstrueres således at de igennem anvendelsesperioden kan inspiceres og eventuelt udskiftes. Ved at trække rør i forings rør opnås der yderligere en sikkerhed mod vandskade som følge af utætte rørinstallationer.

Ved projektering af byggeriet kan en placering i ovenstående rumklimaklasser være med til at vise, hvorvidt det er nødvendigt med en mere detaljeret fugttekniske dimensionering. Det er samtidig vigtigt at sikre sig at byggeriets fremtidige anvendelsesformål ikke ændres. Ændrer man eksempelvis anvendelsesformålet for en tør lagerhal (rumklimaklasse 1) til en fugtig produktionshal (rumklimaklasse 3) vil det give en betragteligt større fugtbelastning, hvilket kan forvolde stor skade, hvis bygningen ikke fugtteknisk er dimensioneret til at modstå denne påvirkning.
Et andet vigtigt princip ved fugtteknisk dimensionering af konstruktioner mod udeklimaet er udnyttelsen af princippet om to-trinstætning. To-trinstætningen fungere ved udvendigt at have en regnskærm, bag denne et ventileret luftmellemrum og et vindstandsende lag. I konstruktioner med to-trinstætning sørger ventilationsspalten for at vindtrykket på regnskærmen mindskes, se figur 3.31



Figur 3.31: Principskitse af to-trinstætningen.
Kilde: Frit efter SBI-anvisning 178, 1993.

3.4.1 Materialeegenskaber

Træ er et organisk og hygroskopisk materiale, hvilket betyder at fugtindholdet i træet har betydning for træets fysiske - og mekaniske egenskaber. Træets holdbarhed og fugtbetingede dimensionsændringer er to vigtige områder man bør være opmærksomme på i forbindelse med projektering af trækonstruktioner. Ved at kende træets fugttekniske egenskaber kan der udføres konstruktionsløsninger med lang levetid.

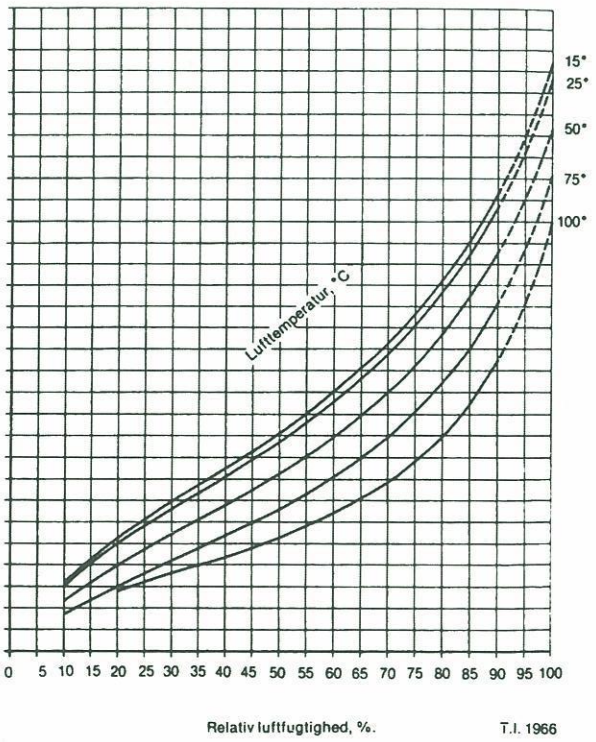
Fugtindholdet i træ angives i procent og kan bestemmes ved hjælp af veje/tørremetoden:

$$\omega = \frac{m_\omega - m_0}{m_0} \cdot 100$$

hvor

m_ω er vægten af træet med det aktuelle fugtindhold
m_0 er vægten af træet med et fugtindhold på 0%[2)]

Fugtindhold i størrelsesordnen ω=*6-28%* kan desuden bestemmes ved hjælp af elektroniske fugtmodstandsmålere (Hoffmeyer, 1995). Fugtindholdet i træet bestemmes af omgivelsernes påvirkning: temperatur, relativ fugtighed samt direkte vandpåvirkning. Sammenhængen mellem temperatur, relativ fugtighed og træets fugtindhold kan illustreres ved hjælp af træets sorptionsisoterm, se figur 3.32



Figur 3.32: Træets sorptions isoterm ved temperaturerne 15, 25, 50, 75 og 100°C. Kilde: Thomassen, 1995.

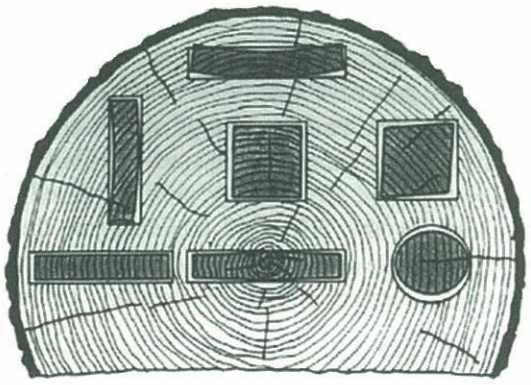
Som det fremgår af figur 3.32 vil et relativt fugtindhold i luften på 100% give et fugtindholdet i træet på omkring 27-28%, hvilket betragtes som træets fibermætningspunkt[3)]. Fibermætningspunktet er væsentligt for træet, fordi ændringer i fugtindholdet under fibermætningspunktet har stor indflydelse på træet fysiske - og mekaniske egenskaber. Fugtindholdet i træ over fibermætningspunktet findes som frit vand i cellehulrummene.

Holdbarheden af træet afhænger af fugtindholdet i træet. Biologisk nedbrydning undgås ved at sikre at fugtindholdet i træet holdes under 20%, som normalt betegnes som det fugtniveau, hvor risikoen for trænedbrydende svampeangreb forstærkes. Angreb af ikke nedbrydende, men misfarvende og sundhedsskadelige svampe, som eksempelvis skimmelsvamp kan forekomme ved fugtindhold mindre end 20%. Temperaturen har ligeledes stor betydning for svampenes vækst, hvor 20-35°C giver svampene gode vækstmuligheder.
Træets fugtafhængige dimensionsændringer kan ifølge SBI-anvisning 193 regnes proportionale med ændringer i fugtindholdet, se tabel 3.11

Tabel 3.11: Tøjninger i promille pr. procent ændring i fugtindhold. Kilde: Frit efter Larsen og Riberholt, 2000.

	Fyr, gran og eg	Bøg og birk
I fiberretningen	0,1	0,1
Langs årringene (tangentielt)	2,5-3,0	4,0
På tværs af årringene (radiært)	1,3-1,5	2,0

Som det fremgår af tabel 3.11 forekommer de største dimensionsændringer i træets tværretning. Træets svind som følge af udtørring kan ligeledes illustreres ved hjælp af figur 3.33



Figur 3.33: Træets svind efter tørring afhængig af træets udskæring fra stammen. Kilde: Hoffmeyer, 1995.

[2)] Et fugtindhold i træet på 0% opnås ved tørring i ovn ved 103°C i ca. et døgn indtil vægten er konstant.
[3)] Træets fibermætningspunkt variere mellem 25-35% for de fleste træarter (Hoffmeyer, 1995).

I praksis vil træet være skåret ud i forskellige retninger og man regner således med en ændring i tværretningen på ***2 promille pr. procentændring i fugtindhold*** (Larsen og Riberholt, 2000).

Forskelle i træets fugtindhold vil gennem året være i størrelsesordnen 6-8% svarende til ændringer i den relative fugtighed på 35-75%, se figur 3.32. Den relative fugtighed variere ikke kun igennem året, men også i løbet af den enkelte dag. Træet påvirkes af disse ændringer, men indstiller sig ikke i ligevægt med omgivelserne fra den ene time til den anden. Varigheden af omgivelsernes påvirkning og træets dimensioner er betydende for den tid det tager før træet er i ligevægt med omgivelserne.

Trækonstruktioner i eksempelvis ydervægge og tage kan ligeledes blive udsat for forskellige klimapåvirkninger på henholdsvis en kold yderside og en varm inderside. Dette fænomen kendes specielt for træskeletkonstruktioner, som placeres i et isoleringslag. Fugtindholdet i disse konstruktioner vil således være større på den kolde ydersiden end på den varme indersiden, hvilket er medvirkende til at give konstruktionen en fugtbetinget udbøjning mod den kolde yderside. For massive træelementer vil dette fænomen ikke optræde, da massive træelementer oftest vil blive placeret på den varme side af isoleringen.

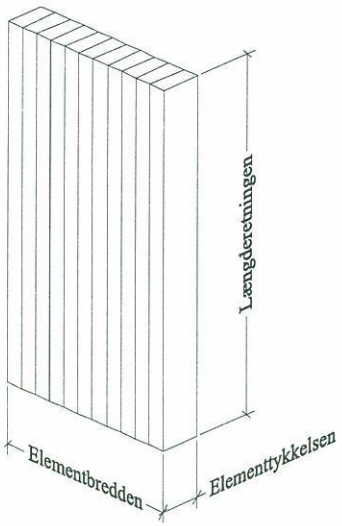
Ved trykpåvirkede trækonstruktioner skal man desuden være opmærksom på at træets krybeegenskaber kan give konstruktionerne permanente deformationer (tryksvind). De permanente deformationer opstår, hvis træets udvidelse som følge af en opfugtning hindres. Dette fænomen er specielt vigtigt at tage højde for i forbindelse med boltesamlinger, der med tiden ofte vil være nødvendig at efterspænde (Larsen og Riberholt, 2000).

3.4.2 Beregningsvejledning

Fugtafhængige dimensionsændringer

Fugtafhængige dimensionsændringer i vægge, dæk og tage udført i massive træelementer optræder i tre retninger: *længderetningen, elementtykkelsen og elementbredden,* se figur 3.34. I projekteringsfasen er det derfor vigtigt at tage højde for de eventuelle dimensionsændringer, der vil forekomme som følge af ændringer i træets fugtindhold.

Som det fremgår af tabel 3.40 er de fugtafhængige dimensionsændringer for konstruktionstræ mindst i længderetningen, hvilket også er tilfældet for massive



Figur 3.34: Principtegning med definition af længderetning, elementbredde samt elementtykkelse for massive træelementer.

træelementer. For små spændvidder er det normalt ikke i elementernes længderetningen man skal være særlig opmærksom på dimensionsændringerne.

I projekteringsfasen har dimensionsændringer i elementbredden og elementtykkelsen langt større indflydelse på sikring af konstruktive gode konstruktionsløsninger end dimensionsændringerne i længderetningen. Massive træelementer er opbygget af selvstændige brædder, som oftest er udskåret forskellige steder i stammen og sammenvirkningen mellem de enkelte brædder etableres ved hjælp af søm, dyvler eller andre forbindelsesmidler.

Dimensionsændringerne i massive træelementer kan derfor ikke umiddelbart sammenlignes med et stykke konstruktionstræ med de samme dimensioner. Følgende betragtninger skal dog overvejes i forbindelse med den fugttekniske dimensionering (Natterer et al, 1997) og (Fynholm 2, 1999):

- *Dimensionsændringerne i massive træelementer adskiller sig fra værdierne for konstruktionstræ.*
- *Elementer med skruer har større dimensionsændringer end sømmede elementer.*
- *Ved lægtning på begge sider svare dimensionsændringerne til krydsfiners.*
- *Lægtning på begge sider eller i top og bund er at foretrække frem for vindtræksbånd på den ene side af elementet.*
- *Bræddernes indbyrdes orientering og udskæring fra stammen har betydning for størrelsen på sprækkerne mellem de enkelte lameller*

Ligesom det er vigtigt, at fugtindholdet i træet ikke er for stort af hensyn til biologisk nedbrydning, må massive træelementer ikke indbygges med for lavt et fugtindhold, da den efterfølgende udvidelse kan skade konstruktionerne.
Massive træelementer produceret på DTE fremstilles som standard med elementbredder på 326 mm og 615 mm. De forholdsvis små elementbredder medfører at de fugtafhængige dimensionsændringer, der vil komme i elementbredden er små og de kan optages i fugerne mellem elementerne.

3.5 VARMEISOLERING

Varmeisolering er et område i byggeriet som de fleste mennesker har forståelse for, da en effektiv varmeisolering kan ses på varmeregningen. Fra myndighedernes side er et ønske om et lavt energiforbrug en af årsagerne til at der fokuseres meget på at nedbringe varmeforbruget i bygningerne. Ifølge bygningsreglementet kan varmeisoleringskravet vises opfyldt ved hjælp af en af nedenstående metoder:

- ***U-værdi:*** *Alle bygningsdele skal overholde givne U-værdier, se tabel 3.12.*
- ***Varmetabsramme:*** *Hele bygningen skal overholde et varmetabskrav.*
- ***Energiramme:*** *Hele bygningen skal overholde et krav til energiforbrug.*

Tabel 3.12: U-værdier for bygningsdele, der normalt opvarmes til mindst 18°C og med et samlet areal af vinduer og yderdøre som højst udgør 22%. Kilde: BR, 1995.

Bygningsdel	U-værdi(W/m2K)
Ydervægge (vægt < 100 kg/m^2	0,20
Ydervægge (vægt > 100 kg/m^2) og kældervægge mod jord	0,30
Skillevægge mod rum, der er uopvarmede eller opvarmet til en temperatur, der er mere end 8°C lavere end temperaturen i det aktuelle rum	0,40
Etageadskillelser mod rum, der er uopvarmede eller opvarmet til en temperatur, der er mere end 8°C lavere end temperaturen i det aktuelle rum	0,30
Terrændæk, kældergulve mod jord og etageadskillelser over ventileret kryberum eller fri luft	0,20
Loft- og tagkonstruktioner, herunder skunkvægge	0,15
Flade tage og skråvægge direkte mod tag.	0,20
Vinduer og yderdøre, herunder ovenlys, glasvægge, porte og lemme mod det fri eller mod rum, der er uopvarmede eller opvarmet til en temperatur, der er mere end 8°C lavere end temperaturen i det aktuelle rum.	1,80

Her vil der blive fokuseret på U-værdier og de to øvrige metoder til overholdelse af bygningsreglementets varmeisoleringskrav vil ikke blive behandlet yderligere, der henvises i stedet til *SBI-anvisning 184 – Bygningers energibehov.*

Som det fremgår af tabel 3.12 skelnes der i bygningsreglementet mellem lette og tunge ydervægskonstruktioner. Trækonstruktioner herunder massive træelementer hører til i kategorien lette konstruktioner (vægt < 100 kg/m^2).
For ydervægskonstruktioner er kravet til varmeisolering 50% større for lette konstruktioner sammenlignet med tunge konstruktioner. De strengere U-værdi krav til lette konstruktioner skyldes primært deres ringe varmeakkumulerende egenskaber. Til forskel fra skeletkonstruktioner har massive træelementer gode varmeakkumulerende egenskaber på grund af det store trævolumen, se også afsnit 4.
I takt med at isoleringsmængden i vægge og tage bliver større og større, får kuldebroer mere indflydelse på bygningernes varmetab. I projekteringsfasen er det derfor vigtigt at minimere antallet af kuldebroer i byggeriet. Udover et forøget varmetab kan kuldebroer øge risikoen for fugtskader. Indenfor de nærmeste år må det forventes at kravene til konstruktionernes isoleringsevne forøges.
Ved anvendelse af massive træelementer i konstruktionerne reduceres indvirkning fra kuldebroer væsentligt. Indflydelsen på varmeisoleringsevnen fra de fuger der opstår i massivtræ elementerne ved udtørringen til ligevægtsfugt, kan udelukkes hvis der udføres en tæt vindbeskyttelse af konstruktionen.

3.5.1 Materialeegenskaber

For at trækonstruktioner, herunder massive træelementer, kan overholde bygningsreglementets U-værdikrav skal træet kombineres med andre materialer herunder isoleringsmaterialer. Træ har et varmeledningstal på $\lambda_{træ}=0,12$ *W/mK*[4], hvilket er mindre end beton ($\lambda_{beton}=1,5$ *W/mK*), men ca. 3 gange større end mineraluld ($\lambda_{mineraluld}=0,039$ *W/mK*).

3.5.2 Beregningsvejledning

Transmissionskoefficient og varmetab kan beregnet i henhold til DS 418, 1986. Det bemærkes desuden at de præsenterede beregningsprincipper *ikke* tager hensyn til linietab fra kuldebroer, som det nyeste tillæg til DS 418 beskriver, da det af tidsmæssige årsager ikke har været muligt.

[4] Varmeledningsevnen afhænger af træets densitet. $\lambda_{træ}=0,12$ *W/mK* findes i DS 418 ved =450kg/m3.

For homogene konstruktionslag i væg, etageadskillelse, tag eller lignende kan transmissionskoefficienten, U-værdien bestemmes som (DS 418, 1986):

$$\frac{1}{U} = R_i + R_u + \sum R_m + \sum R_v + \sum R_l$$

hvor

R_i er overgangsisolansen ved den indvendige overflade. For bygningsdele vendende mod det fri er

$$R_i = 0{,}13 \; m^2K/W$$

R_u er overgangsisolansen ved den udvendige overflade. For bygningsdele vendende mod det fri er

$$R_u = 0{,}04 \; m^2K/W$$

R_m er isolansen for de enkelte materialelag

R_v er isolansen for ventilerede lag i konstruktionen.

R_l er isolansen for luftlag.

Isolansen for de enkelte materialelag kan bestemmes som:

$$R_m = \frac{s}{\lambda_p}$$

hvor

s er materialelagets tykkelse i m.

λ_p er materialets praktiske varmeledningstal. For træ er $\lambda_p = 0{,}12 \; W/mK$.

Som oftest består bygningskonstruktioner af flere inhomogene lag og transmissionskoefficienten kan bestemmes udfra en øvre og nedre grænseværdi beskrevet ved henholdsvis U' og U'':

$$U = \frac{2 \cdot U' \cdot U''}{U' + U''}$$

hvor

$$\frac{1}{U'} = R_i + R_u + \sum R_{homogen} + \sum \frac{s}{\lambda'}$$

med

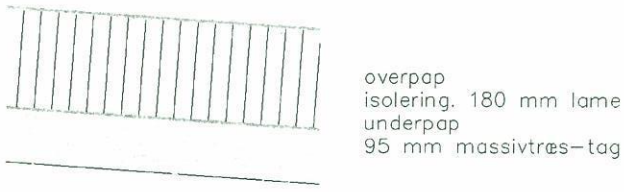
$$\lambda' = \frac{A_a \cdot \lambda_a + A_b \cdot \lambda_b + \ldots}{A_a + A_b + \ldots}$$

Den nedre grænseværdi bestemmes ved at opdele konstruktionen i sektioner som udelukkende består af homogene lag:

$$U'' = \frac{A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2 + \ldots}{A_1 + A_2 + \ldots}$$

3.5.3 Konstruktionseksempel

Figur 3.35: Eksempel på ydervæg (U-værdi = 0,19 W/m2K)



Figur 3.36: Eksempel på tag (U-værdi = 0,186 W/m²K)

3.6 LYDFORHOLD

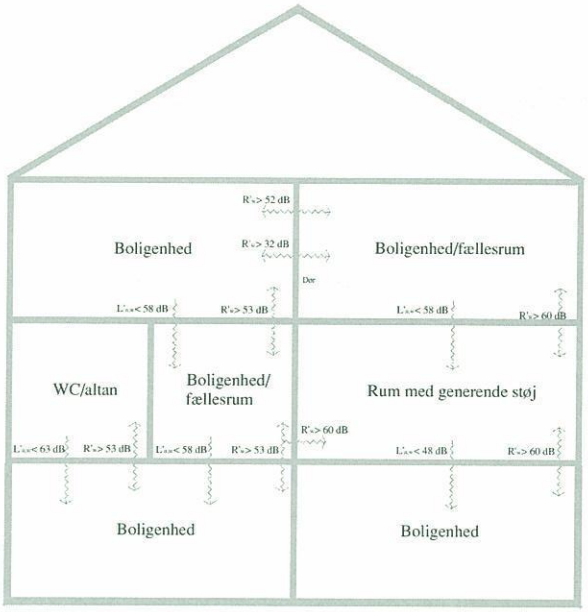
Lydforholdene i specielt træhusbyggerier er som nævnt tidligere et område, der i fremtiden kræver et væsentligt udviklingsarbejde. I bygningsreglementet skelnes der mellem lydkravene til enfamilliehuse og fleretagers bygninger. Bygningsreglementet for småhuse angiver at for huse, hvor det udendørs støjniveau overstiger 55 dB, skal konstruktionerne udføres således, at det indendørs støjniveau ikke overstiger 30 dB. Bygningsreglementet for småhuse giver desuden følgende værdier til overholdelse af den nødvendige lydisolation, se tabel 3.13

Tabel 3.13: Den nødvendige luftlydisolation, R'_w i henhold til småhusreglementet. Kilde: BR-S, 1998.

Støjniveau indtil	Lydisolation Vinduer	Ydervægge
55 dB	25 dB	30 dB
60 dB	30 dB	35 dB
65 dB	35 dB	40 dB
70 dB	40 dB	45 dB
75 dB	45 dB	50 dB
80 dB	50 dB	55 dB

Kravene til luftlydisolering og trinlydniveau for etageboliger[5] kan i henhold til kravene i BR-95 illustreres ved hjælp af figur 3.37

[5] Etageboliger omfatter i henhold til bygningsreglementet af 1995: Beboelsesbygninger, hoteller, kollegier, pensionater, kroer, klublejligheder, kostskoler, sygehjem, plejeboliger, hvilehjem samt andre institutioner og virksomheder med lignende formål.



Figur 3.37: Bygningsreglementets krav til lydforholdene i etageboliger.

Selvom myndighedernes lydkrav overholdes har erfaringer imidlertid vist at lydniveauet ikke vil være tilfredsstillende for brugeren. For lette konstruktioner herunder trækonstruktioner er det specielt svært at sikre tilstrækkelig lydisolering for lydkilder ved lave frekvenser (Riberholt, 1996) og (Pedersen, 1999).
I Danmark vurderes konstruktionerne lydtekniske i frekvensområdet 100-3150 Hz. Erfaringer fra blandt andet fleretagers træhuse opført under Nordic Wood regi har imidlertid vist, at lydbelastningen på lette konstruktioner fra specielt trinlyd ikke er uvæsentlig i et frekvensområde under 100 Hz. For at overholde tilfredsstillende lydniveau under 100 Hz er det således nødvendigt at indbygge en større masse i de lette konstruktioner.

3.6.1 Materialeegenskaber

Betragter man det rå træelement alene kan det ikke opfylde myndighedernes krav til luft- og trinlyd. Sammenligner man træ med eksempelvis beton er træs luftlydsisolerende egenskaber dårligere, hvilket primært hænger sammen med den større fladevægt der findes i betonkonstruktioner.
Forskellen mellem beton og træs trinlydsisolerende egenskaber er mindre udpræget. For såvel træ- som betonkonstruktioner er det nødvendigt at supplere med andre materialer til etablering af nødvendig trinlydniveau. I Schweiz har man udført forsøg på tre forskellige råkonstruktioner af træ (Kolb og Stupp, 1990), se tabel 3.14.
Som det fremgår af tabel 3.14 kan lydisoleringen for råkonstruktionen af massivt træ ikke alene overholde værdierne i bygningsreglementet.

3.6.2 Beregningsvejledning

Etablering af en acceptabel lydisolering i vægge og dæk er et af de områder, som er sværest at opfylde i byggeriet for både lette og tunge konstruktioner. For at opnå et tilfredstillende lydniveau i byggeriet er det ikke nok at anvende konstruktioner med den påkrævede lydisoleringsevne. Det er samtidig vigtigt, at lyden ikke kan forplante sig gennem knudepunkter og dermed forringe den samlede lydisolering.
I Nordic Wood publikationen *Flervånings trähus* er angivet følgende generelle faktorer, der har indflydelse på lydisoleringen i bygningskonstruktioner (Flervåning trähus, 1997):

- *Øget bøjningsstivhed i gulv- og vægplader mindsker lydisoleringen.*
- *Øget bøjningsstivhed af bjælker i vægge og bjælke lag mindsker lydisoleringen.*
- *Øget vægt i gulv- og vægplader øger lydisoleringen.*
- *Øget andel af porøst materiale i vægge og bjælkelag øger lydisoleringen. For stor densitet i porøse materialer kan i visse tilfælde forringe lydisoleringen*

I praksis kan der forekomme afvigelser fra disse generelle regler.

Tabel 3.14: Lydtekniskeegenskaber for forskellige typer etagesdæk i træ. Kilde: Frit efter Kolb og Stubb, 1990.

Type	Vægt	Konstruktionshøjde	Luftlydsisolering, R'_w	Trinlydsniveau, $L'_{n,w}$
Massivt træelement, h = 120 mm	54 kg/m^2	120 mm	37 dB	88 dB
Kasseelement (LKE), h = 140 mm	43 kg/m^2	140 mm	35 dB	88 dB
Træbjælkelag 140/200 mm Træplade, 20 mm	29 kg/m^2	221 mm	26 dB	90 dB

3.6.3 Andre konstruktioner

Ud over at anvende massive træelementer i bygninger kan elementerne også anvendes til andre formål som eksempelvis støjskærme. Støjdæmpning overfor trafik og industri giver gode muligheder for blandt andet at anvende massive træelementer til sådanne formål.

3.7 *INDEKLIMA*

Brugerens velvære og trivsel afhænger i høj grad af indeklimaet i en bebyggelse. Nutidens mennesker opholder sig en stor del af livet indendørs og påvirkninger herfra er således betydende for vores sundhedsmæssige velvære. I bygningsreglementet stilles primært krav til ventilation og forureninger i indeklimaet.

Generelt kræves det for beboelsesbygninger, at luftskiftet skal være mindst 0,5 gang i timen. I takt med at nutidens bygninger bliver mere og mere tætte er det vigtigt, at ventilationen sikres ved naturlig - og eller mekanisk ventilation.

I det efterfølgende er hovedvægten lagt på tre områder: *Forurening fra byggematerialer, varme- og fugtakkumulering* som alle har indflydelse på indeklimaet.

Forurening fra byggematerialers emission kan være sundhedsskadelig for mennesker, og det er derfor vigtigt at forureningen begrænses til et minimum.

Temperatur- og fugtniveauet i indeklimaet har ligeledes betydning for menneskers velvære. Det er således vigtigt at konstruktionernes udformning og materialernes egenskaber er medvirkende til at skabe et tilfredsstillende indeklima i form af udjævning i temperatur- og fugtsvingninger.

3.7.1 Forurening fra byggematerialer

Forureninger fra byggematerialer kan være medvirkende til at forurene indeklimaet.

Bygningsreglementet stiller således krav til forureningen fra byggematerialer:

> **BR-95 (afs. 11.3.1) og BRS-98 (afs. 6.4.1)**
> Byggematerialer må ikke afgive gasser, dampe, partikler eller ioniserende stråling, der kan give anledning til utilfredsstillende sundhedsmæssige indeklimaforhold.

I Danmark har man indført en mærkningsordning for byggematerialer, som kaldes Dansk Indeklima Mærkning.

Der er udført flere mindre forskningsarbejder i Rosenheim i Tyskland om afgasninger fra træ, men der mangler forskningsresultater, hvor undersøgelserne er uvildige og mere bredt anlagt end de nuværende tilgængelige oplysninger.

3.7.2 Varmeakkumulering

Store temperatursvingninger med eksempelvis høje temperaturer som følge af solstråling om sommeren kan være medvirkende til at skabe et ubehageligt indeklima. En udjævning af temperatursvingningerne i bygninger afhænger blandt andet af de anvendte materialers evne til at akkumulere varmen. Materialers evne til at akkumulere varmen kan udtrykkes i form af deres varmekapacitet. Jo større varmekapacitet desto bedre evne til at lagre varmen. Ved at anvende materialer med stor varmekapacitet opnås mulighed for at lagre noget af den overskudsvarme som tilføres bygningen/rummet.

Udover at have gode varmeakkumulerende egenskaber medføre den lave varmeledningsevne i massive træelementer at rummet hurtigt kan opvarmes.

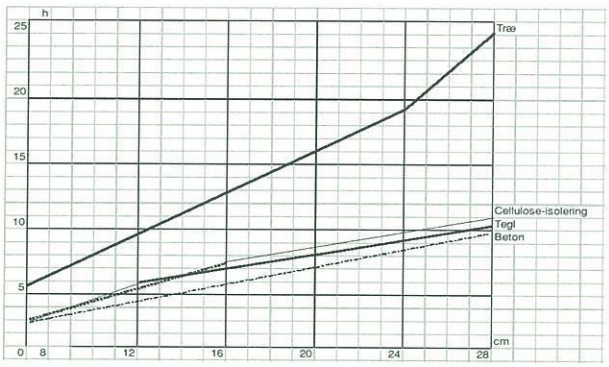
Varmelagringevnen i bygningsdelen er afhængig af placeringen af isoleringslaget. Varmeakkumulering kan kun ske når elementet kommer i berøring med det opvarmede rum dvs. på den indvendige side af bygningsdelen. For at kunne bedømme en ydervægskonstruktion med henblik på isolering mod opvarmning af bygningen i sommerperioden, anvendes temperaturledningstallet, der skal holdes så lavt som muligt. Et lavt temperaturledningstal fremkommer hvis materialet eller bygningsdelen begrænser gennemstrømning af varme og/eller optager den muligt største del af varmen i materialet, som bliver afgivet over længst mulig tid.

Temperaturledningstallet a beregnes som:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

hvor
γ er varmeledningsevne
ρ er bygningsdelens tykkelse i mm
c er varmekapacitet J/kg grader C

Konstruktioner bestående af massive træelementer mod udeluften opvarmes hurtigt i opvarmningsperioden på grund af den ringe varmeledningsevne i træet.



Figur 3.38: Faseforskydning som funktion af materialets tykkelse. Kilde: Wolf et al, 1998.

I sommerperioden bevirker massive træelementers varmelagringsevne en gunstig faseforskydning på ca. 8-10 timer. Figur 3.38 viser temperaturledningstal for forskellige materialer og her ses at træ har den bedste værdi af de viste materialer. Størrelsen af isoleringslaget har væsentlig indflydelse på temperaturledningstallet. Tykkere isolering i konstruktionen reducerer betydningen af temperaturledningstallet.
Grænseværdien for indflydelse på varmeakkumuleringsevnen i massivtræ elementer ligger på mellem 45 – 60 mm, dvs. en øgning af tykkelsen på de massive træelementer, har ingen indflydelse på varmeakkumuleringsevnen.

3.7.3 Fugtakkumulering

Fugtindholdet i indeklimaet varierer gennem året og beskrives ofte som en relativ fugtighed i procent (RF%), der kan bestemmes som:

$$RF\,\% = \frac{c_{inde}}{c_{inde,mætning}} \cdot 100$$

hvor

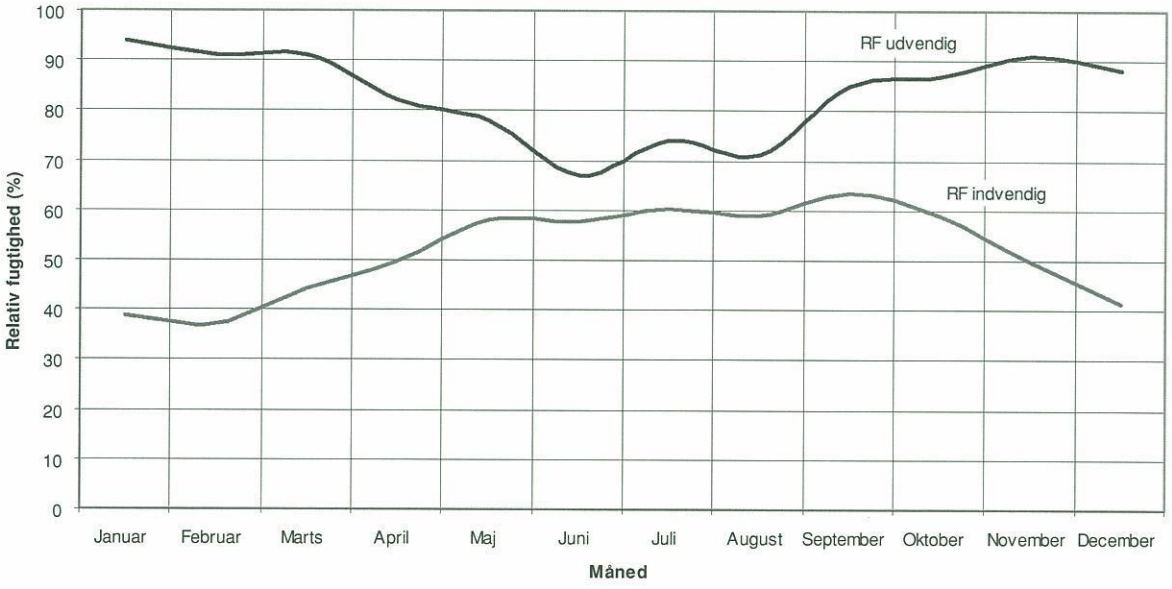
c_{inde} (g/m^3) er vanddampkoncentrationen indvendig.
c_{inde} (g/m^3) er mætnings vanddampkoncentrationen indvendig, som afhænger af temperaturen.

Vanddampkoncentrationen indvendig c_{inde} afhænger af:

- *Fugtindholdet i udeluften.*
- *Fugtproduktionen i rummet.*
- *Ventilation i rummet.*
- *Sorptionsegenskaberne af den omsluttende overflade.*
- *Fugttransporten gennem ydervægge og tag.*

c_{inde} kan ifølge (Nevander et al, 1994) tilnærmelsesvis bestemmes som:

$$c_{inde} = c_{ude} + \frac{G}{n \cdot V}$$



Figur 3.39: Variation af den relative fugtighed udvendig (TRY) og indvendig i en bolig med 3-4 personer.

Ved at kende fugtindholdet i udeluften, fugtproduktionen, ventilation samt byggeriets volumen kan fugtindholdet indendørs og dermed den relative fugtighed bestemmes. I tabel 3.15 er angivet værdier hørende til et traditionelt boligbyggeri med 3-4 personer i den daglige husholdning.

Tabel 3.15: Data vedrørende fugtproduktion i traditionelt boligbyggeri med 3 - 4 beboere.

Ude	$T_{jan.-dec.}$	=	Dansk reference år TRY
	$RF_{jan-.dec.}$	=	Dansk reference år TRY
	$c_{ude,jan.-dec.}$	=	Dansk reference år TRY
Inde	G	=	10 kg/d
	V	=	350 m^3
	$n_{jan.-maj,okt.-dec.}$	=	0,50 1/h
	$n_{juni,sep.}$	=	0,55 1/h
	$n_{juli,aug.}$	=	0,60 1/h
	$T_{jan.-maj,okt.-dec.}$	=	20 °C
	$T_{juni,sep.}$	=	22 °C
	$T_{juli,aug.}$	=	23 °C

Optegnes den beregnede relative fugtighed indendørs får følgende tilnærmet variation gennem året, se figur 3.39.

Som det fremgår af figur 3.39 bevæger den indvendige relative fugtighed sig i intervallet 35-65% for det viste eksempel, dvs. med ændringer på omkring 30% set over hele året. Ved denne simple bestemmelse af den indvendige relative fugtighed er der ikke taget højde for de anvendte materialers egenskaber til at akkumulere fugten, og dermed hvordan de virker som fugtbuffer, der kan ujævne variationer i den indvendige relative fugtighed, ikke kun set over hele året, men også i kortere perioder, eksempelvis på dagsbasis.
Ved anvendelse af hygroskopiske materialer som eksempelvis massive træelementer åbnes der mulighed at fremme denne buffervirkning og dermed udjævne variationerne i den relative fugtighed i indeklimaet. Effekten af at benytte hygroskopiske materialer herunder massive træelementer som fugtbuffer er et område, som endnu ikke er helt afklaret og der foregår en del forskning på emnet, blandt andet i Schweiz på EPFL.
Tor Lundström, IBOIS-EPFL, Lausanne i Schweiz er i gang med en undersøgelse af massive træelementers varmeakkumuleringsegenskaber. De indledende arbejder og undersøgelser er afsluttet. Tor Lundström har stillet følgende delresultater af forprojektet til rådighed:

- Massive træelementer kan udjævne den relative fugtighed i bygningen med +/- 20% indenfor få timer. Undersøgelsen er baseret på et luftskifte mellem 0,3/h – 0,5/h i bygningen samt et minimum på 40 mm trækerne i massive træelementer.
- Massive træelementer kan, under hensyn til bygningstype og geografisk placering, indebære en reduktion på 10-20% af de totale energiomkostninger til opvarmning/afkøling. Minimum tykkelse på trækerne i undersøgelsen 60 mm.
- Massive træelementer indebærer et så relativt lille varmetab ved kuldebrovirkning ved kontakt med gulve og andre bygningsdele, at den indvendige temperatur i bygningen med kan sænkes op til 2 grader.

3.8 BEREGNINGSPROGRAM - HENVISNING

Projekteringsprocedurer

De definerede geometrier samt fastlagte laster i henhold til lastdiagrammet indtastes vægvis i beregningsprogrammet, og når alle vægge er defineret og indtastet, foretager programmet den endelige beregning og udarbejder dxf-filer til indsættelse i en Autocadtegning med opstalter af bygningsdelene samt skærepakke og produktionslister. Før skærepakke- og produktionslister kan anvendes indsættes et nummereringssystem til anvendelse for produktion-og montagearbejder.

Elementbestilling

De udarbejdede skære- og pakke- og produktionslister, sendes til producenten enten som print af projektet, eller kan sendes som en e-mail.

Andre punkter

Dxf-filerne indsat i en Autocadtegning danner grundlag for udarbejdelse af opstalt- og montageplaner.