CHALMERS

Stötbelastade träkonstruktioner

En studie av töjningshastighetseffekten hos trä

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Byggingenjör

ADAM HENRYSSON
SARA NERO

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Examensarbete ACEX20-17-1
Göteborg, Sverige 2017

EXAMENSARBETE ACEX20-17-1

Stötbelastade träkonstruktioner

En studie av töjningshastighetseffekten hos trä

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

ADAM HENRYSSON

SARA NERO

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2017

Stötbelastade träkonstruktioner
En studie av töjningshastighetseffekten hos trä

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

ADAM HENRYSSON

SARA NERO

© ADAM HENRYSSON & SARA NERO, 2017

Examensarbete ACEX20-17-1 / Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik,
Chalmers tekniska högskola 2017

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Stötbelastad träskiva vid maxdeformation.

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2017

Stötbelastade träkonstruktioner

En studie av töjningshastighetseffekten hos trä

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

ADAM HENRYSSON
SARA NERO
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

För bärande konstruktionselement i trä finns det i SS EN-1363-2 ett standardprov som ska utföras där ett bärande väggelement utsätts för en brandlast och sedan för en dynamisk last i form av en massa som ska falla från en viss höjd och stöta mot det bärande elementet.

När trä utsätts för hastig belastning uppvisar materialet en ökning av dess styvhet och hållfasthet. Den faktor, med vilken materialegenskaperna ökar vid dynamisk belastning jämfört med vid statisk belastning, benämns som den dynamiska förstoringsfaktorn. Denna rapport syftar till att förklara hur ett dynamiskt impulsbelastat väggelement i trä bör behandlas beräkningsmässigt och utreda den påverkan som töjningshastighetseffekten kan ha på respons och materialegenskaper.

Norconsult AB har på uppdrag av trävaruleverantören Martinsons tagit fram en beräkningsmetod för dynamisk belastning på deras krysslaminerade väggelementskivor, vilken visade sig vara konservativ då ingen hänsyn tagits till dynamiska förstoringsfaktorer. Efter litteraturstudier, utförda försök som liknade standardförsöket samt studier av den framtagna beräkningsgången har en töjningshastighet och en tid till maxtöjning tagits fram. Dessa har sedan använts för att få fram ett intervall för de dynamiska förstoringsfaktorerna genom olika metoder som sedan jämförts med försöksdata.

Efter litteraturstudier och utförda försök bör de dynamiska förstoringsfaktorerna rimligtvis hamna inom intervallet 1,30–1,80 för hållfastheten och 1,15–1,20 för elasticitetsmodulen för de undersökta krysslaminerade träskivorna hos Martinsons. Med hjälp av dessa värden har beräkningsgången nu fått en större noggrannhet, vilken kan användas för att beräkna inte bara om skivorna klarar standardkravet, utan även hur mycket dynamisk last väggelementen klarar av.

Nyckelord: Dynamisk förstoringsfaktor, DIF, SDOF, impulsbelastning, trä, krysslaminerat trä, töjningshastighet, töjningshastighetseffekt

Impact loaded timber structures

A study of the strain rate effect on wood

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

ADAM HENRYSSON
SARA NERO
Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Structural Engineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

For load bearing elements made of timber, there is a standard test in SS EN-1363-2 that should be carried out where the timber element is impacted by a fire load followed by a dynamic impact. The dynamic load is made of a mass, which is falling from a certain height and then make an impact on the load bearing timber element.

When timber is impacted by high rate impulse loading, the material is showing an increase of its stiffness and strength. The factor, with which the material's characteristics increase when impacted by high rate dynamic loading in comparison to static loading, is called the dynamic increase factor. This report's purpose is to investigate how a dynamic impulse loaded timber wall element mathematically should be handled and investigate how strain rate affects the material's response and characteristics.

Norconsult AB has on behalf of the timber manufacturing firm Martinsons made a calculation guide on dynamic impact to Martinsons's cross laminated timber, CLT, wall elements. When investigating the calculation guide further, it showed that it was conservative, because no dynamic increase factor had been taken to account. After literature studies, tests carried out similar to the standard and studies of the presented calculation guide a strain rate and a time to ultimate stress have been calculated. Later, they have been used to obtain a value of the dynamic increase factor with different methods, which then was later compared to test data.

As a result of the study, the dynamic increase factors were recommended to be somewhere in the intervals 1,30-1,80 for the strength and 1,15-1,20 for the elastic modulus for the CLT wall elements investigated. The determined values of the dynamic increase factors have resulted in a more accurate calculation guide for Martinsons. This calculation guide can be used not only to investigate if a wall element has enough capacity according to the standard, but also how much dynamic load a timber wall element can manage.

Key words: Dynamic increase factor, DIF, SDOF, impulse loading, wood, cross laminated timber, strain rate, strain rate effect

Innehåll

SAMMANFATTNING I
ABSTRACT II
INNEHÅLL III
FÖRORD VII
BETECKNINGAR VIII

1 INLEDNING 1
1.1 Bakgrund 1
1.2 Syfte 1
1.3 Avgränsningar 2
1.4 Precisering av frågeställning 2
1.5 Metod 2

2 IMPULSBELASTNING 3
2.1 Orientering 3
2.2 Acceleration och hastighet 3
2.3 Kraft och tryck 3
2.4 Rörelsemängd, kinetisk energi och impuls 3
2.5 Yttre och inre arbete 5
2.6 Enfrihetsgradssystem 6
2.7 Dynamiska grundekvationen 7
2.8 Respons 8
2.9 Ekvivalent statisk last 10
2.10 Stötteori 11
2.11 Ekvivalent statisk last vid plastisk stöt 12

3 TRÄ 14
3.1 Materialegenskaper 14
3.1.1 Orientering 14
3.1.2 Styvhet och hållfasthet hos trä 14
3.1.3 Karakteristisk hållfasthet 14
3.1.4 Lastvaraktighet 15
3.1.5 Fukt 16
3.1.6 Hänsyn till lastvaraktighet och fukt enligt Eurocode 5 16
3.2 Temperatur och brand 17
3.3 Krysslaminerat trä 18
3.4 Skiva till balk 19

3.5 Materialrespons vid dynamisk stöt 22
3.5.1 Orientering 22
3.5.2 Impulsbelastning 22
3.5.3 Hänsyn till belastningshastighet 22
3.6 Töjningshastighet 23
3.6.1 Orientering 23
3.6.2 Härledning 23
3.6.3 Utförda experiment 24

4 FÖRSÖK PÅ STÖTBELASTADE VÄGGELEMENT I TRÄ 31
4.1 Orientering 31
4.2 Försöksuppställning 31
4.2.1 Utförande enligt standarden 31
4.2.2 Utförande hos Martinsons vid försöksomgång 1 33
4.2.3 Utförande hos Martinsons vid försöksomgång 2 35
4.2.4 Avvikelser från standarden 36
4.2.5 Statiska försök 37
4.3 Resultat 39
4.3.1 Orientering 39
4.3.2 Framtagning av elasticitetsmodul 39
4.3.3 Deformationsmätningar 40
4.3.4 Resultat av statiska försök 47
4.3.5 Beräkningsgång 51
4.3.6 Resultat av deformationsberäkningar 53
4.3.7 Resultat av böjhållfasthetsberäkningar 56
4.3.8 Resultat av lastkapacitetsberäkningar 57

5 FRAMTAGNING AV DIF FÖR STANDARDFÖRSÖK 60
5.1 Orientering 60
5.2 Framtagning av töjningshastighet 60
5.2.1 Orientering 60
5.2.2 Enfrihetsgradsmodellering 60
5.2.3 Resultat 63
5.2.4 Jämförelse med tvåfrihetsgradsmodellering 66
5.3 Jämförelser 67
5.3.1 Madisonkurvan 67
5.3.2 Eurocode 5 68
5.3.3 Lacroix och Doudaks graf 69
5.3.4 Elmendorfs försök 69
5.4 Försöksomgång 1 71
5.5 Försöksomgång 2 76
5.6 Sammanställning 87

6 DISKUSSION 89

7 SLUTSATS OCH FORTSATTA STUDIER 91
7.1 Slutsats 91
7.2 Rekommendationer till fortsatta studier 91

8 REFERENSER 92

BILAGA A EXEMPELRÄKNING A1

BILAGA B BERÄKNINGSARK FÖR FÖRSÖKSOMGÅNG 1 B1

BILAGA C SKIVANALYS C1

BILAGA D MATLABKOD D1

BILAGA E KOMPENSATION FÖR DEFORMATIONSMÄTNINGAR E1

BILAGA F BERÄKNINGSARK FÖR FÖRSÖKSOMGÅNG 2 F1

BILAGA G FÖRSÖKSDATA VID FÖRSÖKSOMGÅNG 1 G1

BILAGA H FÖRSÖKSDATA VID FÖRSÖKSOMGÅNG 2 H1

BILAGA I BERÄKNINGSARK FÖR STATISKA FÖRSÖK I1

Förord

Detta examensarbete har utförts under hösten 2017 som en slutlig examination för högskoleingenjörsprogrammet byggingenjör vid Chalmers tekniska högskola. Examensarbetet omfattar 15 högskolepoäng och har skrivits vid avdelningen för konstruktionsteknik.

Examensarbetet utfördes tillsammans med avdelningen för Bro och Analys vid Norconsult AB i Göteborg. Vi vill rikta ett särskilt tack till vår handledare Bruno Antona Palacios och vår examinator Morgan Johansson som varit väldigt stöttande och lagt ner mycket tid på att hjälpa oss under hela arbetets gång. Dessutom vill vi tacka övriga Norconsult AB för ett varmt välkomnande och omhändertagande. Slutligen vill vi även passa på att rikta ett stort tack till Peter Jacobsson m.fl. från Martinsons i Skellefteå, där försök genomfördes under två dagar.

Foton som presenteras i rapporten är tagna av författarna själva om inget annat anges.

Göteborg, november 2017
Adam Henrysson & Sara Nero

Beteckningar

Latinska versaler

A	area
DIF	dynamisk förstoringsfaktor Dynamic Increase Factor
DIF_E	dynamisk förstoringsfaktor med avseende på elasticitetsmodul
DIF_f	dynamisk förstoringsfaktor med avseende på böjhållfasthet
DIF_G	dynamisk förstoringsfaktor med avseende på skjuvmodul
E	elasticitetsmodul
E_k	kinetisk energi
E_p	potentiell energi
F	kraft
G	skjuvmodul
I	impuls, tröghetsmoment
I_k	karaktäristisk impuls
M_{Rd}	momentkapacitet
Q	ekvivalent statisk last
R	inre kraft, kapacitet
R_{Rd}	lastkapacitet
Spv	spännvidd
T	periodtid
W	arbete, böjmotstånd
W_i	inre arbete
W_y	yttre arbete
$Ø$	diameter

Latinska gemener

a	acceleration
b	bredd
b_{eff}	effektiv bredd
c	dämpning
f	frekvens, hållfasthet
$f_{m,d}$	dimensionerande böjhållfasthet
g	tyngdaccelerationskonstanten
h	höjd
k	styvhet
k_b	styvhet med hänsyn till böjning
k_{mod}	omräkningsfaktor med hänsyn till lastvaraktighet och fukt
k_s	styvhet med hänsyn till skjuvning
l	längd, spännvidd
m	massa
m_b	massa balk
m_{Ed}	moment hos en skiva per meter
p	rörelsemängd
t	tid
u	förskjutning, fuktkvot
u_{el}	elastisk förskjutning
$\dot{u}$	hastighet
$\ddot{u}$	acceleration
v	hastighet

z avstånd från tyngdpunkten

Grekiska tecken

α_M utnyttjandegrad av bredd hos skiva vid balkteori
β konstant för skjuvspänning
γ_M partialkoefficienten för material
ε töjning
$\dot{\varepsilon}$ töjningshastighet
η_f kontroll av böjspänning
η_R kontroll av lastkapacitet
η_u kontroll av deformation
κ_F transformationsfaktor för last
κ_m transformationsfaktor för massa
κ_{mF} transformationsfaktor för massa och last
ρ densitet
σ spänning
φ vinkel
ω vinkelfrekvens

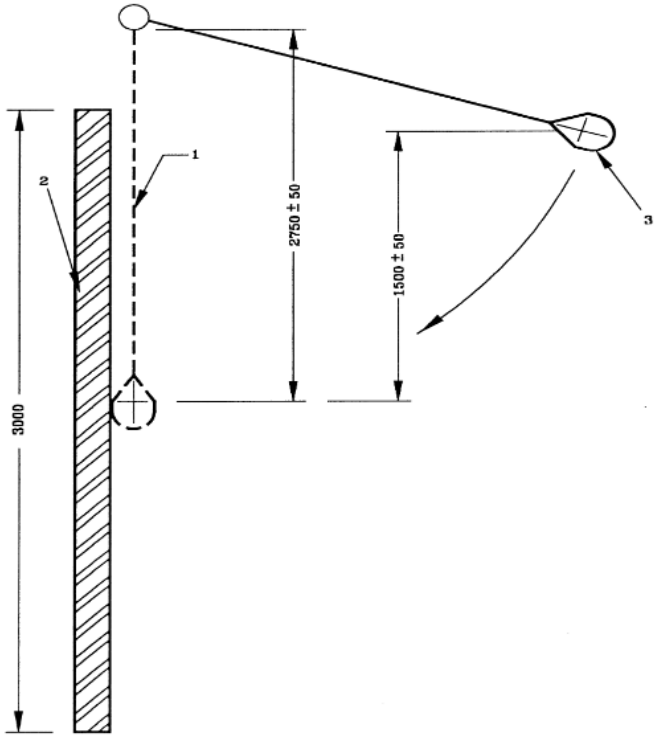
Index

1 kropp 1
2 kropp 2
d dimensionerande
dyn dynamisk
ekv ekvivalent
el elastisk
k karaktäristisk
max maximal
sta statisk
tot total

1 Inledning

1.1 Bakgrund

För bärande konstruktionselement i trä finns enligt standarden SS EN-1363-2 ett standardprov, se (SIS, 1999), som ska utföras där ett bärande väggelement utsätts för en brandlast och sedan för en massa som ska falla från en viss höjd och stöta mot det bärande elementet, se Figur 1.1.



Figur 1.1 *Lastuppställning för standardprov av väggelement som utsätts för en stötlast från en säck med blykulor med en massa på 200 kg, som träffar konstruktionen från en fallhöjd på 1,5 meter (SIS, 1999).*

För att i förväg kunna dimensionera för detta har en enklare beräkningsmetod tagits fram av Norconsult AB på uppdrag av trävaruleverantören Martinsons. Efter jämförelse med försöksdata från Martinsons visade sig denna beräkningsmetod vara väl konservativ och därför finns utrymme att arbeta vidare med denna. I beräkningsmetoden tas ingen hänsyn till töjningshastighetseffekten i trä, något som förstärker träets hållfasthet och styvhet vid snabb belastning jämfört med långvarig statisk belastning.

1.2 Syfte

Detta examensarbete syftar till att förklara hur en dynamiskt impulsbelastad träskiva kan behandlas beräkningsmässigt och därigenom utreda den påverkan som töjningshastighetseffekten kan ha på respons och materialegenskaper som styvhet och hållfasthet. I detta ingår även att undersöka om det är möjligt att implementera en dynamisk förstoringsfaktor, DIF, i beräkningsgången som Norconsult tagit fram för att få beräkningar att stämma bättre överens med försöksdata.

1.3 Avgränsningar

Studien avser att endast undersöka och utföra beräkningar för fritt upplagda konstruktioner med en impulslast i fältmitt, det vill säga den uppställning som finns i standardförsöket. Eftersom standardförsöket bedöms motsvara en plastisk stöt, utförs inte beräkningar på elastiska stötar. Trä uppvisar en linjärelastisk respons och därför beaktas ingen annan typ av respons. Hur variation av fukt och temperatur påverkar förstoringsfaktorn DIF behandlas inte i beräkningarna.

1.4 Precisering av frågeställning

Studiens främsta mål är att bestämma ett värde för de dynamiska förstoringsfaktorerna för hållfastheten och elasticitetsmodulen för de undersökta träskivorna. För att komma fram till ett värde för dessa faktorer beaktas ett antal frågeställningar som

- Hur påverkas träets egenskaper av töjningshastigheten vid dynamiska laster?
- Vid vilken belastningshastighet börjar det bli relevant att korrigera beräkningar med hänsyn till töjningshastighetseffekten?

1.5 Metod

Arbetet inleddes genom litteraturstudier för att få en ökad förståelse för vad som sker när konstruktionselement utsätts för dynamiska laster samt hur dessa kan beräknas som ekvivalenta statiska laster. Fortsättningsvis studerades belastningshastighetens inverkan på materialet närmare för att se vid vilken belastningshastighet det börjar bli relevant att korrigera beräkningar med hänsyn till töjningshastighetseffekten. I denna del av arbetet ingick även att närmare studera töjningshastighetseffekten för att bättre förstå vilken inverkan den har på strukturresponsen hos stötbelastade träkonstruktioner.

Försöksdata från tidigare utförda experiment hos Martinsons analyserades. Den tillhörande beräkningsgången som är framtagen för dessa försök studerades och förklarades. Dels vilka fysikaliska principer den utgick ifrån, men också de antaganden som är gjorda beskrevs. Hur materialegenskaper förändras för trä vid brand studerades, då skivorna i försöket först utsatts för en fiktiv brandlast innan den dynamiska lasten. En stor del i arbetet kretsade också kring att analysera och förstå försöken som utförts, dels hur försöken satts upp men också genom jämförelse mellan försöksdata och beräkningsdata. Fler försök utfördes även i samarbete med Martinsons för att få mer underlag att jämföra med och dra slutsatser kring.

2 Impulsbelastning

2.1 Orientering

För att förstå vad som sker när en träkonstruktion utsätts för en dynamisk stöt är det nödvändigt att först förstå grundläggande mekaniska och dynamiska samband och begrepp. I den här sektionen kommer därför en grundläggande, övergripande introduktion till grundprinciperna att presenteras hämtat från (Johansson & Laine, 2012).

2.2 Acceleration och hastighet

Hastighet, v, definieras som den sträcka, u, en kropp rört sig över en viss tid, t

$$v = \frac{u}{t} \tag{2.1}$$

Om sedan tidsintervallet som kroppen rör sig över anses vara oändligt litet, dvs. $t \rightarrow 0$, kommer hastigheten, v, att definieras som ändringen av en kropps position i ett specifikt ögonblick enligt

$$v = \frac{du}{dt} = \dot{u} \tag{2.2}$$

Ändringen av en kropps hastighet över tid i ett visst ögonblick definieras sedan som accelerationen, a,

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d\dot{u}}{dt} = \ddot{u} \tag{2.3}$$

2.3 Kraft och tryck

Kraft kan beskrivas som förmågan att accelerera en kropps massa. Det mekaniska sambandet mellan kraft, F, massa, m, och acceleration, a, beskrivs i Newtons andra lag som

$$F = m \cdot a \tag{2.4}$$

För att definiera kraft per area A används den fysikaliska storheten tryck, P, och beskrivs som

$$P = \frac{F}{A} \tag{2.5}$$

2.4 Rörelsemängd, kinetisk energi och impuls

En stor del av beräkningarna i denna rapport utgår från sambanden mellan rörelsemängd, kinetisk energi samt potentiell energi. Sambanden mellan dessa kan sedan användas för att beräkna yttre arbete.

Rörelsemängden, p, hos en kropp med massan m och hastigheten v beskrivs som

$$p = m \cdot v \tag{2.6}$$

Den kinetiska energin, E_k, som också benämns som rörelseenergin, hos en kropp med massan m i rörelse med hastigheten v definieras som

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \tag{2.7}$$

Den potentiella energin, E_p, hos en kropp med massan m beskrivs som

$$E_p = m \cdot g \cdot h \tag{2.8}$$

där h är höjden och g är tyngdaccelerationskonstanten. Om en kropp med en rörelsemängd p_0 utsätts för en yttre kraft F under tiden $t_0 \leq t \leq t_1$, fås en förändring i rörelsemängd enligt

$$p_1 = p_0 + \int_{t_0}^{t} F(t)\, dt \tag{2.9}$$

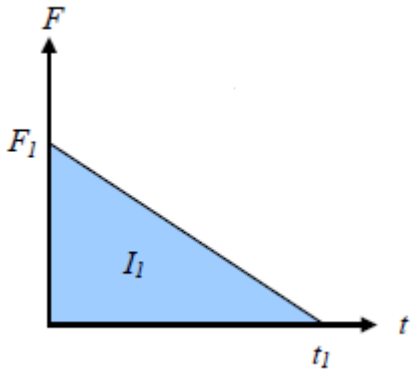
som tillsammans med ekvation (2.7) kan skrivas om till

$$m \cdot v_1 = m \cdot v_0 + \int_{t_0}^{t} F(t) dt \tag{2.10}$$

där den tillsatta rörelsemängden benämns impuls, I, och definieras som

$$I = \int_{t_0}^{t} F(t) dt \tag{2.11}$$

vilken kan beskrivas som arean under ett kraft-tidsdiagram, se Figur 2.1.



Figur 2.1 Grafisk beskrivning av impuls (Johansson & Laine, 2012).

Impuls kan också beskrivas genom sambandet

$$I = m \cdot v \tag{2.12}$$

Genom att kombinera ekvation (2.7) och (2.12) kan uttrycket för kinetisk energi skrivas om enligt

$$E_k = \frac{I^2}{2 \cdot m} \tag{2.13}$$

2.5 Yttre och inre arbete

När en kraft, F, verkar mot en kropp som resulterar i att kroppen förflyttas en viss sträcka, u, uträttas ett arbete. Det utförda arbetet, W, definieras då som

$$W = F \cdot u \tag{2.14}$$

Det yttre arbetet, W_y, när en kropp 1 med massan m faller mot kropp 2, kan, om lastens varaktighet är tillräckligt kort, approximativt ansättas till

$$W_y = E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \tag{2.15}$$

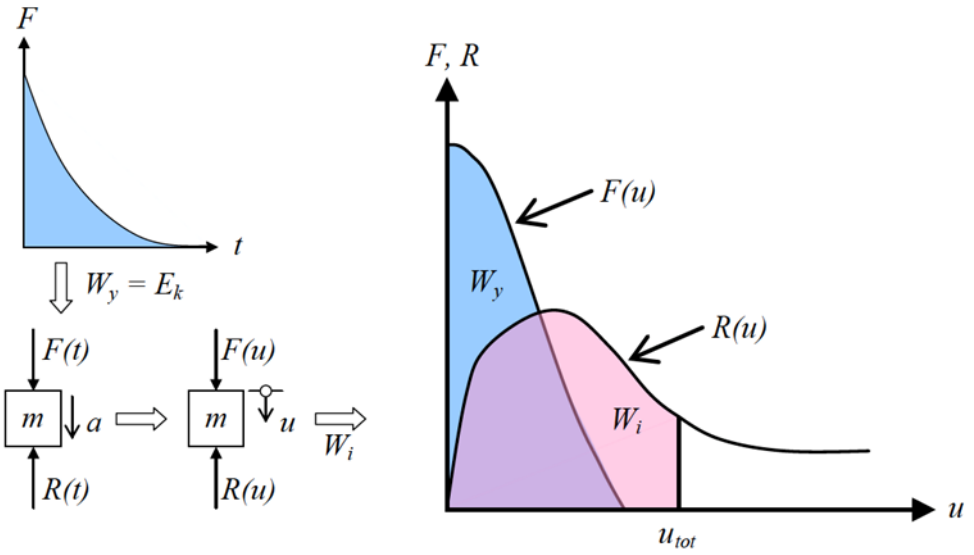
vilket är konservativt. Det inre arbetet, W_i, när kropp 1 träffar kropp 2 beskrivs med hjälp av styvheten och deformationen i kropp 2 enligt

$$W_i = \frac{k \cdot u^2}{2} \tag{2.16}$$

där k är styvheten och u är deformationen hos kropp 2.

Det yttre arbetet W_y utförs av den påtryckande yttre kraften, $F(u)$, som skapar en deformation. Det inre arbetet W_i uppkommer av den inre mothållande och deformationsberoende kraften $R(u)$. Ett viktigt fysikaliskt samband är att det yttre arbetet alltid är lika stort som det inre arbetet, detta kallas energibalans, se ekvation (2.17). Med hjälp av energibalansen kan sedan den slutliga deformationen, u_{tot}, bestämmas, se Figur 2.2.

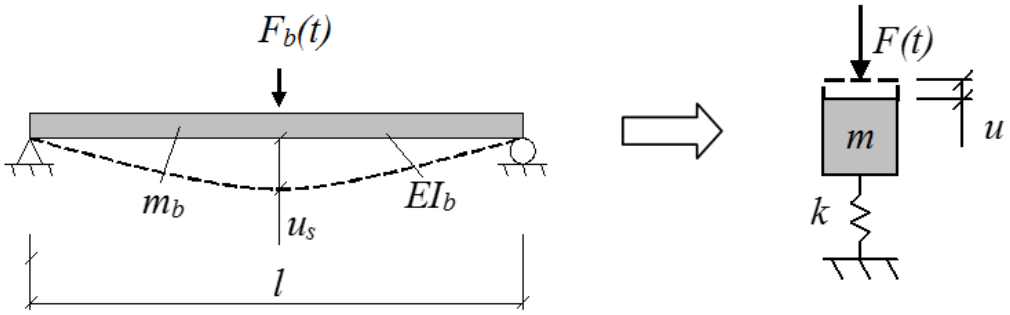
$$W_y = W_i \tag{2.17}$$



Figur 2.2 *Grafisk beskrivning av energibalans i en kropp när den utsätts för ett yttre arbete W_y (Johansson & Laine, 2012).*

2.6 Enfrihetsgradssystem

Vid beräkning av deformationer med tidsberoende laster kan en balk transformeras till ett massa-fjäder system för att sedan beräkna deformationer med hjälp av ett enfrihetsgradssystem, på engelska single degree of freedom, SDOF, se Figur 2.3.



Figur 2.3 Omvandling av en balk till ett massa-fjäder system (Johansson, 2014).

För att beräkna deformationer med denna metod på en balk måste balkens elasticitetsmodul, skjuvmodul samt tvärsnitt vara känt. Styvheten på en balk går att beräkna via olika elementarfall som beaktar randvillkor och lastvillkor. I ekvation (2.18) och (2.20) beskrivs styvheten med hänsyn för böjning respektive skjuvning för en fritt upplagd balk med en punktlast i fältmitt. Styvheten med hänsyn till böjning, k_b, tecknas som

$$k_b = \frac{48 \cdot EI}{l^3} \tag{2.18}$$

där E motsvarar materialets elasticitetsmodul, I beskriver tvärsnittets tröghetsmoment och l är balkens spännvidd. För ett rektangulärt tvärsnitt beskrivs tröghetsmomentet som

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \tag{2.19}$$

där b är bredden och h är höjden i meter. Styvheten med hänsyn till skjuvning, k_s, beskrivs som

$$k_s = \frac{4 \cdot GA}{\beta \cdot l} \tag{2.20}$$

där G är materialets skjuvmodul, A är tvärsnittets area och β är en faktor som beror av tvärsnittets form. Vid ett rektangulärt tvärsnitt är $\beta = 1{,}2$. Dessa kan sedan gemensamt uttryckas som balkens totala styvhet genom

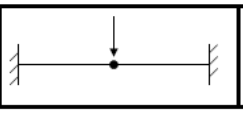
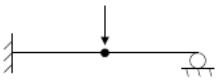
$$k_{tot} = \frac{R}{u} = \frac{1}{\frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_s}} \tag{2.21}$$

där k_{tot} motsvarar balkens totala styvhet i N/m.

När denna balk transformeras till ett massa-fjäder system görs sedan korrigeringar för att ta hänsyn till hur stor lastspridningen blir. Balken modifieras då med avseende på medverkande bredd med hjälp av tranformationsfaktorerna för massa, κ_m, last, κ_F,

eller för massa och last, κ_{mF}. Se Tabell 2.1 för vilka värden som gäller vid olika randvillkor och lastvillkor.

Tabell 2.1 Sammanställning av transformationsfaktorer vid punktlast (Johansson & Laine, 2012).

	Punktlast			
				
	Utböjningskurva elastiskt fall			
κ_m	0,486	0,371	0,445	0,236
κ_F	1,000	1,000	1,000	1,000
κ_{mF}	0,486	0,371	0,446	0,236
	Utböjningskurva plastiskt fall			
κ_m	0,333	0,333	0,333	0,333
κ_F	1,000	1,000	1,000	1,000
κ_{mF}	0,333	0,333	0,333	0,333

Den effektiva massan med hänsyn för medverkande bredd beräknas med transformationsfaktorn κ_{mF} enligt

$$m = \kappa_{mF} \cdot m_b \tag{2.22}$$

där balkens massa m_b beräknas enligt

$$m_b = \rho \cdot b \cdot h \cdot l \tag{2.23}$$

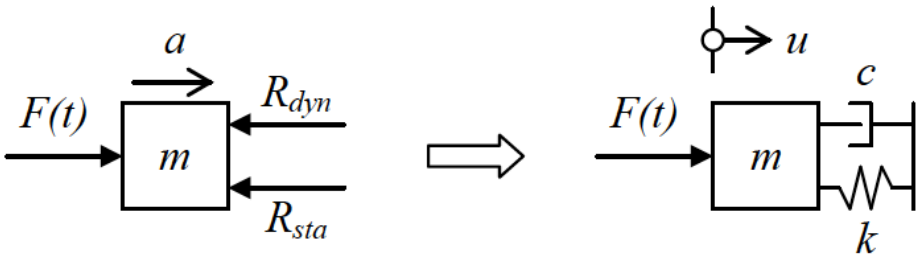
där ρ är densiteten, b är bredden, h är höjden och l är spännvidden.

2.7 Dynamiska grundekvationen

För att kunna beskriva uppförandet av en kropps förflyttning i förhållande till tid används den dynamiska grundekvationen som är baserad på Newtons andra lag, ekvation (2.4). De krafter som verkar på en kropp i ett enfrihetsgradssystem kan delas upp som en yttre tidsberoende kraft, $F(t)$, samt den inre statiska kraften, R_{sta}, och den dynamiska kraften, R_{dyn}, enligt

$$F(t) - \left(R_{sta} + R_{dyn}\right) = m \cdot a \tag{2.24}$$

Detta blir enkelt representerat med en massa-fjäder uppställning, se Figur 2.4.



Figur 2.4 *En kropp som utsätts för en tidsberoende last vilket resulterar i acceleration och deformation (Johansson & Laine, 2012).*

Vid linjärelastisk respons beror den inre statiska kraften på fjäderstyvheten, k, och deformationen, u, enligt

$$R_{sta} = k \cdot u \tag{2.25}$$

På samma sätt beror den inre dynamiska kraften av dämpningskonstanten, c, och kroppens hastighet, $\dot{u}$, enligt

$$R_{dyn} = c \cdot \dot{u} \tag{2.26}$$

Genom att kombinera ekvation (2.25) och (2.26) kan därför ekvation (2.24) skrivas om till

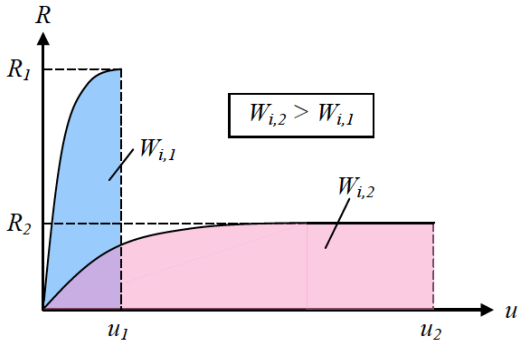
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) \tag{2.27}$$

vilket är den dynamiska grundekvationen där $\ddot{u}$ står för accelerationen. Denna ekvation förutsätter linjärelastisk respons i materialet. Denna rapport kommer att behandla impulsbelastning, och dämpningseffekten kan då på ett konservativt sätt uteslutas ur den dynamiska grundekvationen. Detta för att belastningshastigheten är snabb, men även för att endast maxdeformationen sökes, som inträffar strax efter pålastningen, då dämpningen inte hunnit inverka. Ekvation (2.27) kan då reduceras till

$$m\ddot{u} + ku = F(t) \tag{2.28}$$

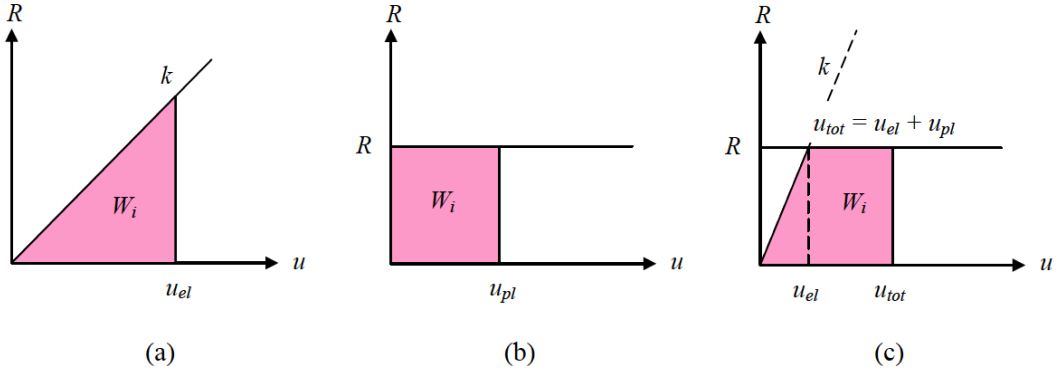
2.8 Respons

En konstruktion får olika respons vid statisk belastning jämfört med vid impulsbelastning. Vid statisk belastning är konstruktionens bärförmåga tillsammans med begränsade deformationer normalt av intresse. Utsätts en konstruktion för en impulslast är det istället energiupptagningsförmågan som är av intresse. Energiupptagningsförmågan beror av ett samspel mellan styvheten och deformationsförmågan hos konstruktionen. En mer eftergivlig konstruktion, det vill säga en lägre styvhet i kombination med en högre deformationsförmåga, kan därför ha en högre energiupptagningsförmåga än en styvare konstruktion med lägre deformationsförmåga, detta illustreras i Figur 2.5.



Figur 2.5 *Energiupptagningsförmågan hos två olika konstruktioner med olika styvhet och deformationsförmåga (Johansson & Laine, 2012).*

När en konstruktions respons studeras är det vanligt att utgå från en förenklad respons för att beskriva styvhet, hållfasthet och deformationsförmåga utifrån tre olika responser; linjärelastisk, plastisk och elastoplastisk. Vilken typ av respons som inträffar beror på materialet. Trä uppvisar till exempel endast linjärelastisk respons medan till exempel stål, beroende på tvärsnittsklass, kan ha en elastoplastisk eller linjärelastisk respons vid belastning. En linjärelastisk respons har konstant styvhet k samt att deformationen u_{el} återgår till noll om konstruktionen blir obelastad, med undantag för om brott inträffat. Vid plastisk respons blir deformationen u_{el} permanent om lasten F uppgår till kapaciteten R. Elastoplastisk respons är en kombination av de båda tidigare och uppvisar elastiskt beteende upp till lastkapaciteten R och därefter ett plastiskt beteende, se Figur 2.6.



Figur 2.6 *Strukturell respons vid antagande om a) linjärelastisk respons b) plastisk respons c) elastoplastisk respons (Johansson & Laine, 2012).*

Denna rapport syftar till att beskriva vad som sker vid stötbelastade träkonstruktioner. Därför kommer beräkningsgången endast behandla på linjärelastisk respons. Vad som sker vid plastisk och elastoplastisk respons beskrivs beräkningsmässigt i (Johansson & Laine, 2012).

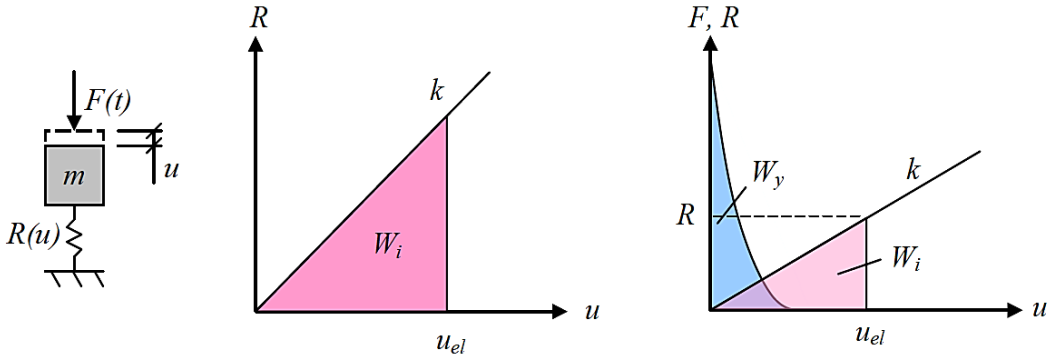
Vid belastning av ett linjärelastiskt material betecknas den inre mothållskraften, $R(u)$, som

$$R(u) = k \cdot u \tag{2.29}$$

där k är en konstant som betecknar styvhet och u är deformationen. Ur detta samband kan det inre arbetet i ekvation (2.16) för balken beskrivas som

$$W_i = \frac{R(u_{el}) \cdot u_{el}}{2} = \frac{k \cdot u_{el}^2}{2} \tag{2.30}$$

där u_{el} är den elastiska deformationen som uppkommer för att ge mothåll för det yttre arbetet, se Figur 2.7.



(a) (b) (c)

Figur 2.7 *a) enfrihetsgradssystem. b) linjärelastiskt systems respons vid pålastning, lutningen på linjen hör ihop med styvheten k. c) inre och yttre arbete (Johansson & Laine, 2012).*

Den elastiska deformationen, u_{el}, kan efter kombination av ekvation (2.13) och (2.30) beskrivas som

$$u_{el} = \frac{I_k}{m \cdot \omega} \tag{2.31}$$

där ω är egenvinkelfrekvensen och definieras som

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.32}$$

Egenvinkelfrekvensen kan också uttryckas i frekvens, f, med perioden 2π eller med hjälp av periodtiden, T, enligt

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T} \tag{2.33}$$

2.9 Ekvivalent statisk last

Eftersom de flesta ingenjörer är mer vana vid att arbeta med statiska laster, beräknas dynamiska impulslaster ofta om till ekvivalenta statiska laster. Detta görs genom att beräkna en ekvivalent statisk last, Q, som utför samma yttre arbete som impulslasten utför på konstruktionen.

Den ekvivalenta statiska lasten, Q, i ett elastiskt system kan beskrivas med hjälp av det yttre arbetet, W_y, enligt

$$W_y = \frac{Q \cdot u_{el}}{2} \tag{2.34}$$

där Q kan uttryckas i styvheten, k, och den elastiska deformationen, u_{el}, enligt

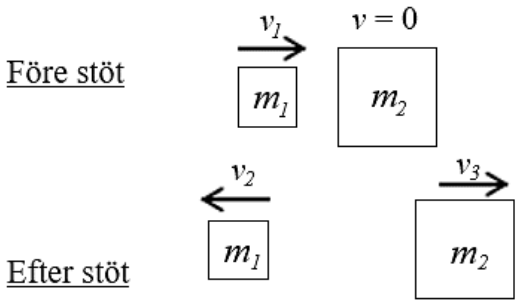
$$Q = k \cdot u_{el} \tag{2.35}$$

Ekvation (2.13), (2.31) och (2.34) kan sedan uttryckas som den ekvivalenta statiska lasten, Q, uttryckt i impulsen, I, och egenvinkelfrekvensen, ω, enligt

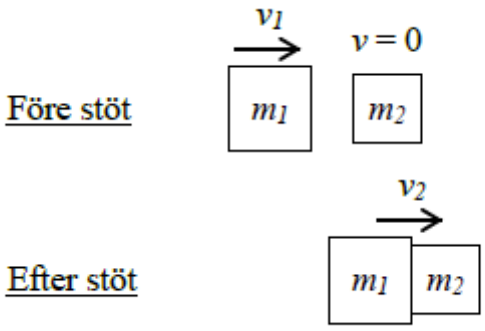
$$Q = I \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = I \cdot \omega \tag{2.36}$$

2.10 Stötteori

När en kropp med en massa m_1 och hastigheten v_1 stöter in i en stillastående kropp med massan m_2 kan olika typer av stötar uppstå, där de två ytterlighetsfallen kan beskrivas som en elastisk stöt respektive en plastisk stöt. Vid en elastisk stöt bevaras både den kinetiska energin och rörelsemängden, medan det vid en plastisk stöt endast är rörelsemängden som bevaras och den totala kinetiska energin minskar (Johansson, 2014). En schematisk bild för hur en elastisk stöt ser ut visas i Figur 2.8. I standardförsöket, som studeras i denna rapport, antas en plastisk stöt ske och därför är det den grundläggande teorin bakom plastisk stöt som mer detaljerat presenteras i detta avsnitt. Figur 2.9 visar en plastisk stöt, då de båda kropparna följs åt efter stöten i samma riktning och med gemensam hastighet.



Figur 2.8 Elastisk stöt mellan två kroppar med massorna m_1 och m_2.



Figur 2.9 Plastisk stöt mellan två kroppar med massorna m_1 och m_2. Efter stöten får kropparna en gemensam hastighet v_2 (Johansson & Laine, 2012).

Med hjälp av definitionen för rörelsemängd enligt ekvation (2.6) kan ett uttryck för rörelsemängden före, p_1, och efter en plastisk stöt, p_2, tecknas enligt följande

$$p_1 = m_1 \cdot v_1 \tag{2.37}$$

$$p_2 = (m_1 + m_2) \cdot v_2 \tag{2.38}$$

Rörelsemängden är oförändrad vid en stöt, vilket innebär att rörelsemängderna före och efter stöt kan beskrivas enligt

$$p_1 = p_2 \tag{2.39}$$

som i kombination med ekvation (2.37) och (2.38) kan uttryckas som

$$m_1 \cdot v_1 = (m_1 + m_2) \cdot v_2 \tag{2.40}$$

som uttryckt i hastigheten efter stöt v_2 blir

$$v_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1 \tag{2.41}$$

Den kinetiska energin, E_k, för kropparna kommer dock att förändras vid en plastisk stöt. Den kinetiska energin före stöt, $E_{k,1}$, definieras med ekvation (2.7) som

$$E_{k,1} = \frac{m_1 \cdot {v_1}^2}{2} \tag{2.42}$$

och den kinetiska energin efter en plastisk stöt beskrivs som

$$E_{k,2} = \frac{(m_1 + m_2) \cdot {v_2}^2}{2} \tag{2.43}$$

som efter härledningen för v_2 i ekvation (2.41) kan utvecklas som

$$E_{k,2} = \frac{m_1 + m_2}{2} \cdot \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2}\right)^2 \cdot {v_1}^2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot \frac{m_1 \cdot {v_1}^2}{2} \tag{2.44}$$

Detta kan sedan uttryckas i den kinetiska energin innan stöt, $E_{k,1}$, samt en faktor uttryckt i massorna m_1 och m_2 enligt

$$E_{k,2} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot E_{k,1} \tag{2.45}$$

Den kinetiska energin efter en plastisk stöt är alltså mindre än den kinetiska energin före stöt.

2.11 Ekvivalent statisk last vid plastisk stöt

Eftersom den kinetiska energin inte är den samma före och efter en plastisk stöt, kommer den ekvivalenta statiska lasten beräknas på annat vis än tidigare beskrivet i avsnitt 2.9. Det yttre arbetet motsvarar den kinetiska energin efter stöt i ekvation (2.46).

$$W_y = E_{k,2} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot E_{k,1} \tag{2.46}$$

Energibalans råder, dvs. yttre och inre arbete är lika

$$W_y = W_i \tag{2.17}$$

Från detta kan den resulterande deformationen, u_{el}, beräknas med ekvation (2.17) och (2.30) genom

$$u_{el} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_y}{k}} \tag{2.47}$$

Sedan kan den ekvivalenta statiska lasten, Q, beräknas som

$$Q = k \cdot u_{el} = \sqrt{2 \cdot W_y \cdot k} \tag{2.48}$$

3 Trä

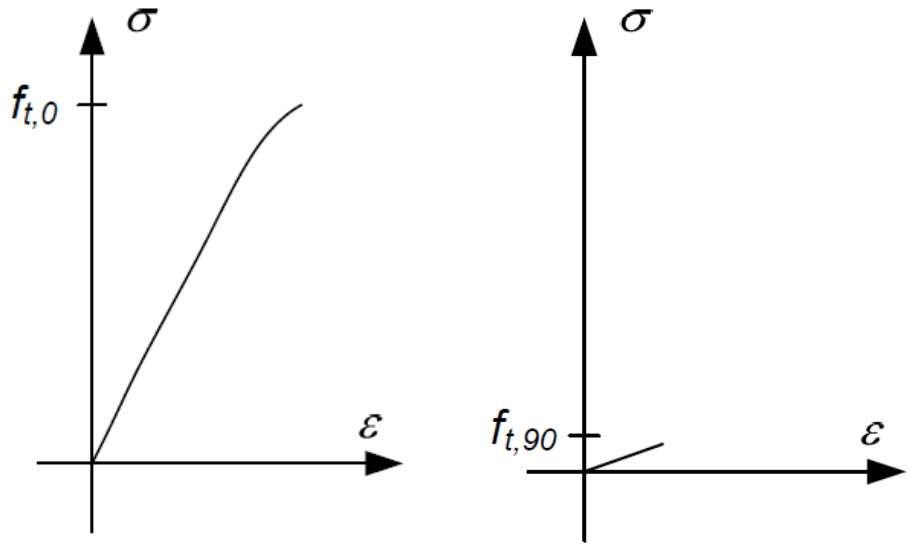
3.1 Materialegenskaper

3.1.1 Orientering

Trä är ett levande material som är uppbyggt av vedceller (Al-Emrani, Engström, Johansson, & Johansson, 2013). Det är även ett naturligt kompositmaterial som är uppbyggt utav cellulosa, hemicellulosa och lignin. Detta innebär att trä inte har en homogen uppbyggnad, vilket exempelvis stål har. Det här får inverkan på egenskaper hos träet så som styvhet, hållfasthet och beständighet. Trä är uppbyggt av fibrer som växer i trädets längdriktning och eftersom de är orienterade i en specifik riktning har trä olika styvhet och hållfasthet i olika riktningar. Vid dimensionering av träkonstruktioner tas hänsyn till att det är ett levande material. Bland annat tas hänsyn till fukt och lastvaraktighet, då det är parametrar som påverkar hållfastheten.

3.1.2 Styvhet och hållfasthet hos trä

Styvheten och hållfastheten hos trä varierar med belastningsriktningen. Trä är styvare och starkare vid belastning parallellt med fibrerna jämfört med belastning vinkelrätt mot fibrerna. Detta illustreras för drag i Figur 3.1 där det går att se stora skillnader beroende på vilken riktning träet belastas i. Arbetskurvan för tryck ser liknande ut. Vid beräkning antas trä vara ett linjärelastiskt material. Detta skulle resultera i ett helt linjärt spännings-töjningssamband, vilket framgår av Figur 3.1, är ett rimligt antagande.

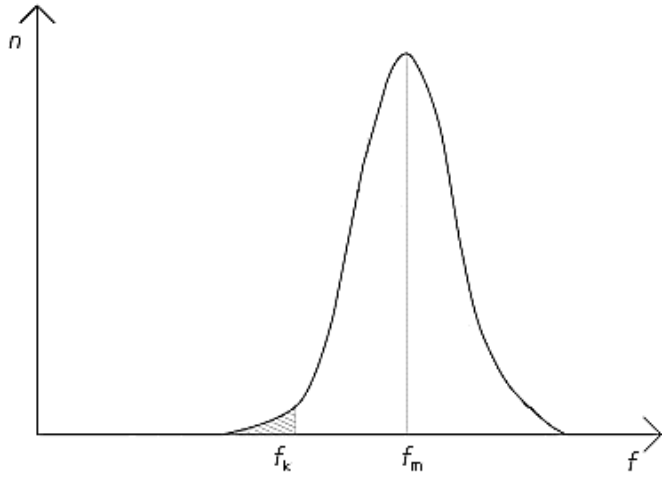


Figur 3.1 Töjnings-spänningssamband hos trä vid olika belastningsriktningar.

3.1.3 Karakteristisk hållfasthet

Vid bestämmande av dimensionerande hållfasthetsegenskaper hos ett material används en 5 % -fraktil (Al-Emrani, o.a., 2013). Detta innebär alltså att 95 % av materialet kommer ha en högre hållfasthet än detta värde. De karaktäristiska

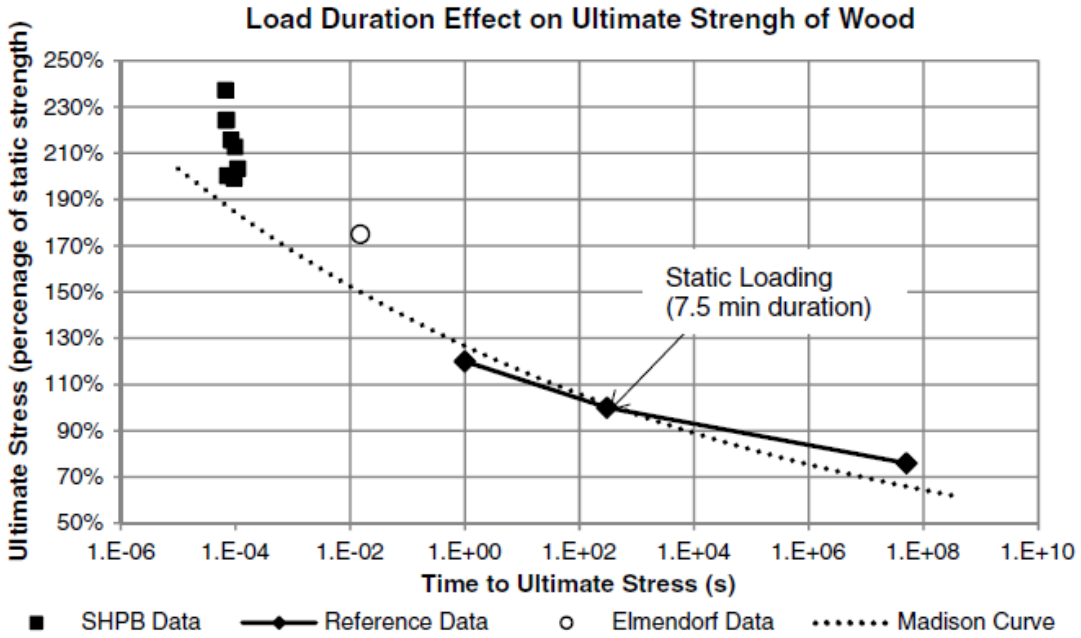
hållfasthetsvärdena bestäms ur ett stort antal prover där data sammanställs som en normalfördelning, se Figur 3.2. Baserat på normalfördelningen bestäms det hållfasthetsvärdet som 95 % av testerna klarar. Eftersom trä inte är ett homogent material, på grund av kvistar och liknande, får det en större spridning än vad stål och betong får vid liknande tester. Denna spridning minskar något hos limträ på grund av lamineringseffekten. Vid bärighetsdimensionering utgår man sedan från dessa karaktäristiska hållhasthetsvärden.



Figur 3.2 *Frekvensfördelning för träs hållfasthet där f_m representerar medelvärdet och f_k representerar 5 % -fraktilen (Al-Emrani, o.a., 2013).*

3.1.4 Lastvaraktighet

Försök har visat att lastens varaktighet har en inverkan på träets hållfasthet (Hoffmeyer, 2003). Vid Forest Products Laboratory i Madison, WI, USA, utfördes i mitten av 1900-talet tester på träbalkar i trepunktsböjning. Wood, som utförde försöken, sammanställde sedan sina resultat tillsammans med tidigare utförd forskning på lastvaraktighetens inverkan hos trä. Hans sammanställning ledde till vad som idag är känt som Madisonkurvan, se Figur 3.3. Madisonkurvan uttrycker tiden till maximal spänning i förhållande till en kvot, där spänningskvoten är 100 % när tiden till maximal spänning är 7,5 minuter. Madisonkurvan visar också tydligt sambandet med kort lastvaraktighet och hög hållfasthet. Hållfastheten hos trä ökar således ju kortare lastvaraktigheten är.



Figur 3.3 Madisonkurvan (Gilbertsson & Bulleit, 2013).

Ytterligare försök, efter det att Madisonkurvan presenterades på 1950-talet, har visat att virke av god kvalitet har stämt ganska bra med Madisonkurvan, medan virke av sämre kvalitet varit på säker sida (Al-Emrani, o.a., 2013). Det har också visats att även andra faktorer påverkar, där Madisonkurvan istället hamnar på osäker sida. Virkets fuktkvot är en av dessa faktorer.

3.1.5 Fukt

Träets materialegenskaper påverkas av fukt, både hållfasthet och elasticitetsmodul minskar vid ökande fuktinnehåll (Burström, 2007). När fukthalten i trä ökar binds fukten först till fibrerna i träet och när dessa sedan blir mättade börjar också hålrummen i träet att fyllas med vatten (Al-Emrani, o.a., 2013). För att beteckna hur mycket vatten som träet innehåller används fuktkvot, u, som beräknas enligt

$$u = \frac{vikt\ vatten}{vikt\ torrt\ trä} \cdot 100\ [\%] \tag{3.1}$$

3.1.6 Hänsyn till lastvaraktighet och fukt enligt Eurocode 5

Eftersom hållfastheten för trä försämras ju längre tid en last verkar på en träkonstruktion, har lastvaraktigheten i Eurocode 5 delats in i fem kategorier; permanent, lång tid, medellång tid, kort tid samt momentan, se Tabell 3.1 (SIS, Swedish Standards Institute, 2004).

Tabell 3.1 Lastvaraktighetsklasser (SIS, Swedish Standards Institute, 2004).

Lastvaraktighetsklass	Storleksordning för ackumulerad effekt av karakteristisk last
Permanent last	> 10 år
Lång tid	6 månader – 10 år
Medellång tid	1 vecka – 6 månader
Kort tid	Mindre än en vecka
Momentan	Olyckslast

Eftersom även fuktkvoten påverkar hållfastheten i trä definierar Eurocode 5 även tre klimatklasser, där klimatklass 1 har den lägsta fuktkvoten, ≤12 %, medan klimatklass 3 har den högsta fuktkvoten, ≥18 %. Lastvaraktighet och fuktförhållanden vägs sedan samman i normen till en omräkningsfaktor, k_{mod}. Dimensionerande hållfasthet vid inverkan av fukt och lastvaraktighet beräknas då enligt

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \tag{3.2}$$

där γ_M är partialkoefficienten för material och sätts till 1,3 för konstruktionsvirke och till 1,25 för limträ. I Tabell 3.2 presenteras värdena för k_{mod} enligt standarden SS-EN 1995-1-1 (SIS, Swedish Standards Institute, 2004).

Tabell 3.2 Omräkningsfaktorn k_{mod} för beräkning av hållfastheten hos konstruktionsvirke och limträ (SIS, Swedish Standards Institute, 2004).

Material	Klimat-klass	Lastvaraktighet				
		Permanent	Lång	Medellång	Kort	Momentan
Konstruktionsvirke	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Limträ	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

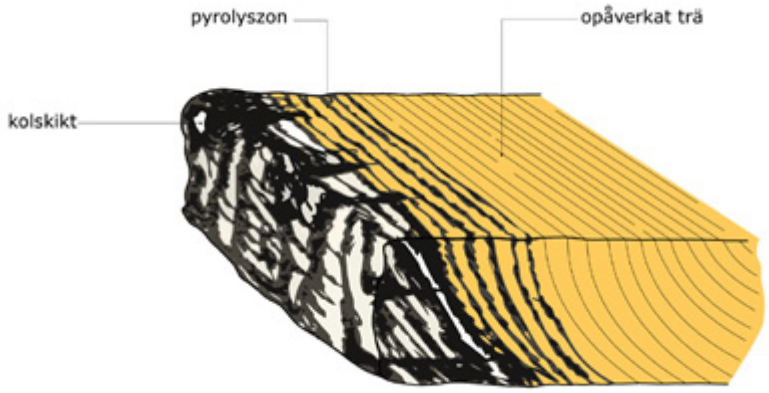
Av Tabell 3.2 framgår att vid en kortvarig momentan belastning och torrare fuktförhållanden fås en ökning utav den dimensionerande hållfastheten, k_{mod} >1,00, i övriga fall minskar hållfastheten för trä, k_{mod} <1,00.

3.2 Temperatur och brand

Vid ökande temperatur minskar både träets hållfasthet och elasticitetsmodul (Al-Emrani, o.a., 2013). Dock är minskningen så liten att inverkan av temperatur försummas vid beräkning på träkonstruktioner som inte långvarigt utsätts för temperaturer över 60°C (SIS, Swedish Standards Institute, 2004).

När trä fattar eld bildas ett kolskikt och förkolningshastigheten för ytskiktet är vanligen 0,6–1,0 mm/minut vid fullt utvecklad brand (Träguiden, 2016). Innanför det

förkolnade skiktet bildas pyrolyszonen, se Figur 3.4. I denna zon, som endast är någon millimeter tjock, plasticeras träet till följd av den höga temperaturen. I pyrolyszonen får alltså träet förändrade egenskaper, då deformationerna ökar vid konstant belastning.



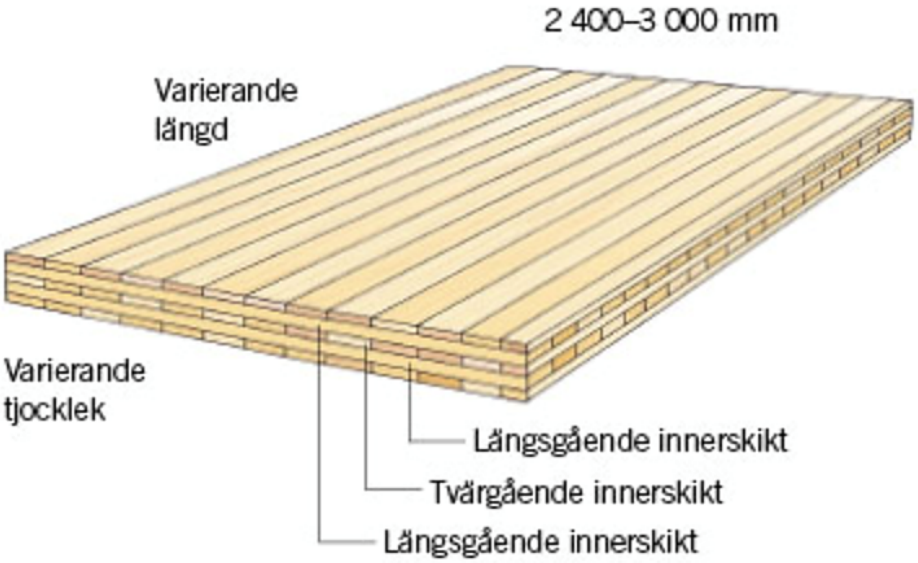
Figur 3.4 Olika skikt som bildas när trä utsätts för brand (Träguiden, 2016).

Innanför kolskiktet och pyrolyszonen är träets egenskaper oförändrade och bibehåller en lägre temperatur (Träguiden, 2016). Detta beror på att värmeledningsförmågan hos trä är låg samt att trä innehåller vatten, vilket resulterar i en hög värmekapacitet, då energi krävs för att förånga vattnet och som leder till sänkt temperatur kring materialet (Burström, 2007). Träkolskiktet som bildas har lägre värmeledningsförmåga än trä, vilket resulterar i ett brandskydd och verkar som värmeisolering för träet innanför kolskiktet. Det skyddande yttre kolskiktet leder till att den inre opåverkade delen av träet kan bibehålla sin bärförmåga vid brand (Träguiden, 2016).

Hållfastheten i den inre delen av träet som skyddas av kolskiktet förändras alltså inte vid brand, däremot förändras träbalkens tvärsnittsdimensioner på grund av förkolningen (Burström, 2007). Därför beräknas ett reducerat tvärsnitt fram efter brand med hjälp av eldens inträngningshastighet.

3.3 Krysslaminerat trä

De skivor som använts för att utföra försöken hos Martinsons är krysslaminerade träskivor. Krysslaminerat trä, KL-trä, är massiva träskivor som är uppbyggda av limmade träplankor i flera lager (Martinsons, 2017). Fiberriktningen för lagren varieras så att lager två läggs vinkelrätt mot lager ett osv., se Figur 3.5.

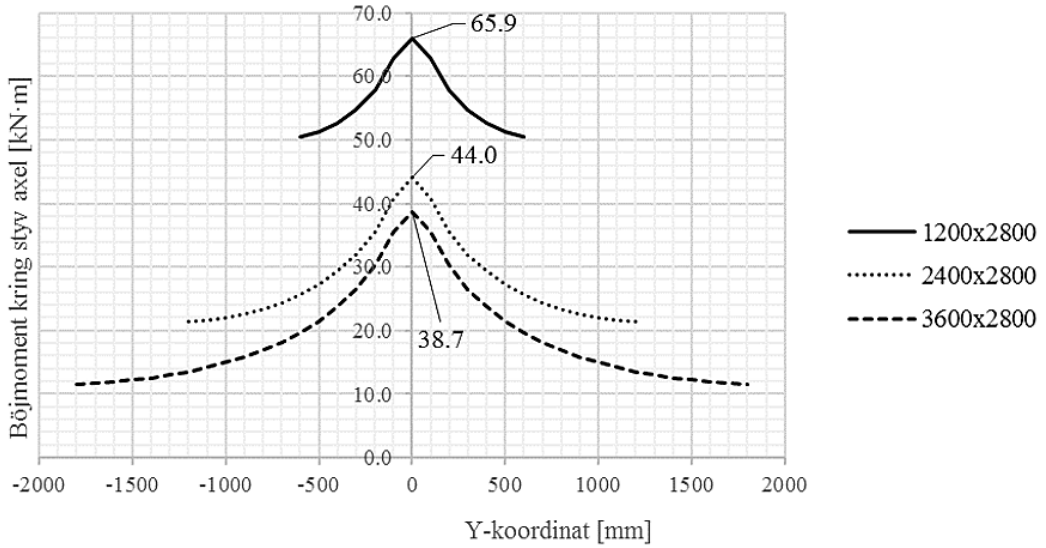


Figur 3.5 Krysslaminerad träskiva (Martinsons, 2017).

Skivorna blir därför stabila för böjning både i längdled och tvärled. Skivorna tillverkas efter användningsområde, ett väggelement har yttre lagren i tvärriktning och tvärtom för bjälklag då yttre lagren är i längdriktningen (Martinsons, 2017). Skivorna är uppbyggda av trä med två olika hållfasthetsklasser; C-24 och C-14. C-24 används i den styva riktningen och C-14 i den veka riktningen. KL-trä kan tillverkas med en längd på upp till 16 meter och med en bredd på mellan 2,4–3,0 m. Vid försök hos Martinsons används skivor som har en bredd på 1,2 meter.

3.4 Skiva till balk

Vid framtagen beräkningsgång av Norconsult AB modelleras skivorna som en 2D-balk. För att analysera hur väl detta överensstämmer med verkligheten så har Norconsult AB utfört en enklare FEM-analys av hur bredd och spännvidd påverkar responsen hos en skiva jämfört med en 2D-balk, se Bilaga C. Vid analysen fanns osäkerheter kring ingångsdata för skivmaterialet, då det har trä i olika fiberriktningar vilket gör att styvheten är olika i de olika riktningarna. Baserat på konstruktionsdata från Martinsons antogs elasticitetsmodulen i den styva riktningen vara 10 gånger större än elasticitetsmodulen i den veka riktningen. Elasticitetsmodulen i den styva riktningen sattes till 7,0 GPa respektive 0,7 GPa i den veka riktningen vid analysen. Skivorna som analyserades var 84 mm tjock. Tre olika bredder på skivan analyserades; 1200, 2400 och 3600 mm och spännvidden var 2800 mm. En last på 100 kN applicerades på skivorna, fördelad på 200 x 200 mm. Hur böjmomentet varierar med bredden hos skivan i fältmitt visas i Figur 3.6.



Figur 3.6 Böjmoment vid olika bredd på skivan.

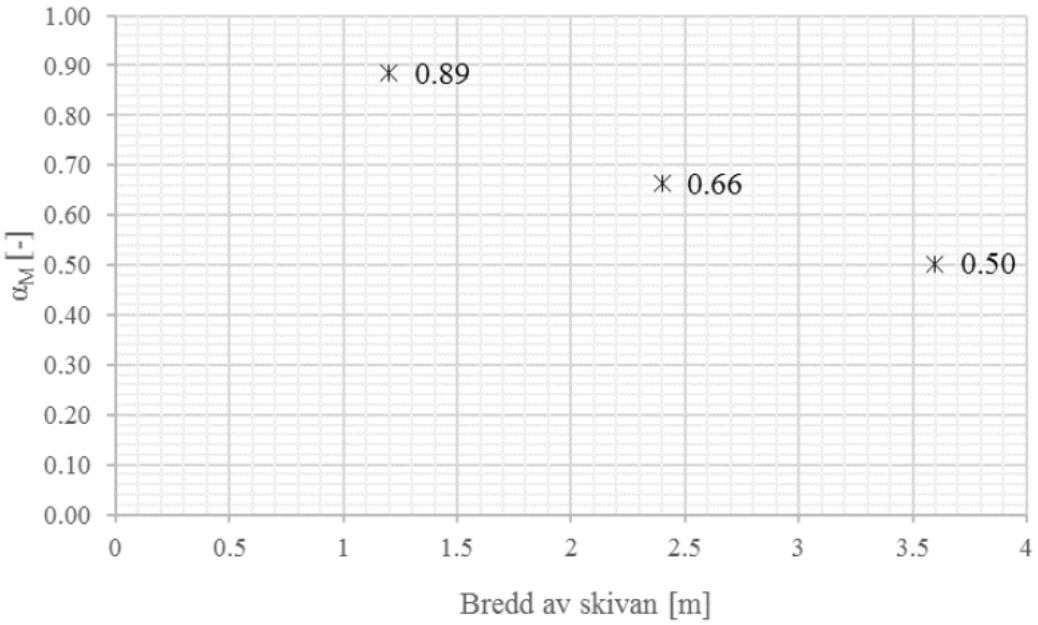
Det resulterande böjmomentet i den styva riktningen på skivan minskar med ökande bredd på skivan. Jämförs värdena mot en balk är motsvarande böjmoment 70 kNm vilket antyder att en skiva med bredden 1,2 m ger en liknande respons som en balk gör. Detta går att illustrera ännu bättre vid beräknande av effektiv bredd. Då jämförs skivans böjmoment med balkens för att se hur stor del av bredden som utnyttjas. Denna kvot beräknas genom att dividera maxmomentet enligt balkteori med maxmomentet i skivan per meter enligt

$$b_{eff} = \frac{M_{Ed}}{m_{Ed}} \tag{3.3}$$

där *M* är moment hos en balk och *m* är moment per meter hos en skiva. Detta går sedan att relateras till bredden på skivan genom en kvot

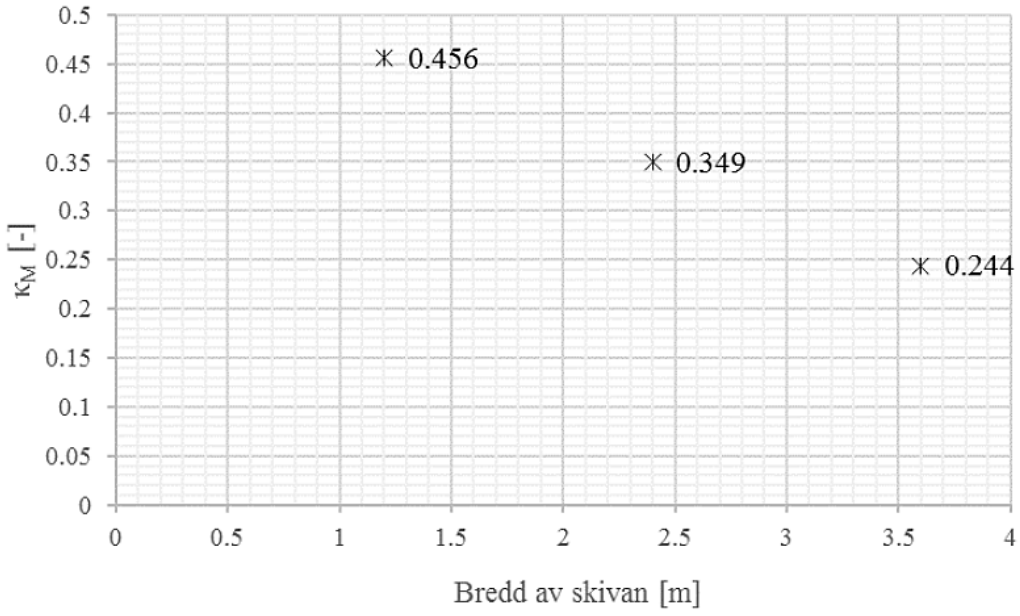
$$\alpha_M = \frac{b_{eff}}{b} \tag{3.4}$$

där α_M indikerar hur stor andel av bredden hos skivan som får utnyttjas om balkteori används. Hur värdet på α_M varierar med bredden på skivan presenteras i Figur 3.7.



Figur 3.7 Kvot mellan b_{eff} och b vid olika skivbredder.

Vid modellering av en balk som ett SDOF-system har en faktor $\kappa_{M,}$ räknats fram med hänsyn till hur stor del av massan som kan anses ha inverkan på responsen, effektiv massa. För de tre undersökta skivorna i denna modellering har denna κ_M-faktor också beräknats, vilket presenteras i Figur 3.8. Notera att dessa beräknade värden endast gäller för dessa skivor i detta exempel och är ingen generell beräkning för alla typer av skivor.



Figur 3.8 Faktor κ_M för effektiv massa i förhållande till skivans bredd.

För en fritt upplagd balk är κ_M = 0,486, se Tabell 2.1. För fullständig beskrivning av denna analys och resultat, se Bilaga C.

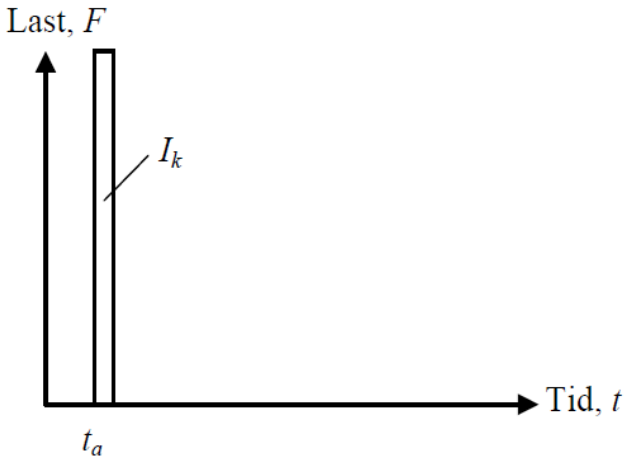
3.5 Materialrespons vid dynamisk stöt

3.5.1 Orientering

Responsen hos en konstruktion blir annorlunda vid en dynamisk last jämfört med en statisk last och framförallt om den dynamiska lasten är väldigt kortvarig (Johansson & Laine, 2012). Detta beror bland annat på att materialet får förändrade egenskaper vid snabb belastning; styvhet och hållfasthet ökar. Faktorn, med vilka dessa ökar, brukar benämnas som den dynamiska förstoringsfaktorn, på engelska Dynamic Increase Factor, *DIF*. Denna faktor beror på belastningshastigheten och töjningshastigheten i materialet.

3.5.2 Impulsbelastning

När belastningshastigheten är väldigt hög och kortvarig brukar detta benämnas en impulslast (Johansson & Laine, 2012). En impulslast brukar tidsmässigt relateras till utsvängningstiden *T*, eller egenperiodtiden, hos en konstruktion. Generellt brukar en last definieras som en impulslast om belastningstiden är kortare än *T*/4, alltså en fjärdedel av egenperioden (Hall & Kasper, 2017). För en struktur med en linjärelastisk respons kan egenperioden, *T*, beräknas genom ekvation (2.33). En ideal impuls-belastning är en impuls med oändligt högt tryck och oändligt kort varaktighet, se Figur 3.9.



Figur 3.9 Schematisk bild av en impulslast (Johansson & Laine, 2012).

Vid impulsbelastning sker responsen annorlunda än vid statisk belastning (Johansson & Laine, 2012). Vid kort belastningstid kan stora lokala deformationer uppstå innan informationen om att strukturen är belastad hunnit fördelas genom materialet. Dessa lokala deformationer breder sedan ut sig till globala deformationer i hela strukturen.

3.5.3 Hänsyn till belastningshastighet

Vid hastig belastning av en konstruktion förändras materialets egenskaper, så som styvhet och hållfasthet, jämfört med vid långsam statisk belastning. Därför bör det vid beräkningar av en hastig dynamisk last tas hänsyn till detta genom att använda en dynamisk förstoringsfaktor, Dynamic Increase Factor, *DIF*, enligt

$$E_{dyn} = DIF_E \cdot E_{sta} \tag{3.5}$$

$$f_{dyn} = DIF_f \cdot f_{sta} \tag{3.6}$$

där index *sta* betecknar materialegenskaperna vid statisk last och index *dyn* representerar egenskaperna vid dynamisk last.

3.6 Töjningshastighet

3.6.1 Orientering

Istället för att mäta belastningshastigheten vid stötbelastning av trä, kan det vara av större intresse att undersöka hur töjningen förändras med tiden. Detta kallas för töjningshastighet, på engelska strain rate.

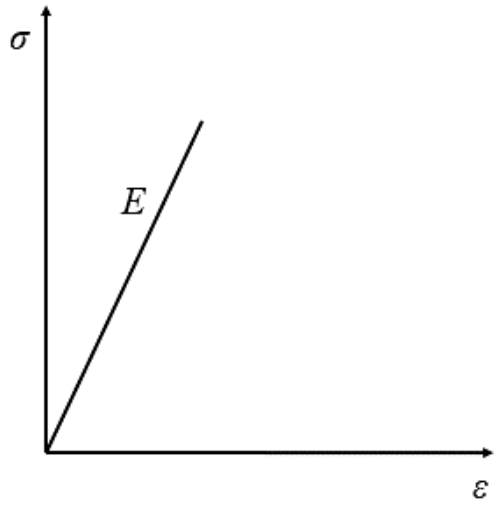
3.6.2 Härledning

Vid snabb belastning får töjningshastigheten inverkan på materialparametrarna hos trä (Gilbertsson & Bulleit, 2013). Många studier har utförts på vad som sker vid långvarig belastning av trä och hur krypningseffeker inträffar i träet. Vad som sker vid momentan belastning finns dock inte lika mycket studier på. För att bestämma vad som sker med materialparametrarna vid höga töjningshastigheter utförs experiment vanligtvis med en Split-Hopkinson Pressure Bar, SHPB, eller i en tryckvågskammare, ”shock-tube”. Båda testmetoderna använder sig av tryckluft, men i en SHPB förs kraften över via en stång, medan en shock-tube sänder ut en lufttryckvåg mot testexemplaret. Resultaten analyseras sedan vanligtvis med en iterativ SDOF-metod och jämförs mot resultat från statisk belastning.

Vid analys av impulslaster studeras ofta töjningshastigheten istället för belastnings-hastigheten. Töjningen, ε, vid ett böjmoment i ett linjärelastiskt material beräknas enligt Hookes lag genom

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{3.7}$$

där E är materialets elasticitetsmodul och σ är spänningen. Detta samband uttrycks grafiskt i Figur 3.10.



Figur 3.10 Spänning-töjningssamband för ett linjärelastiskt material.

Normalspänningen, σ, för en konstruktion som endast utsätts för böjmoment kring en axel beräknas enligt Naviers formel

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot z \tag{3.8}$$

där I är tröghetsmomentet, z är avståndet från tyngdpunkten och M är momentet. Maximal spänning uppstår vid tvärsnittets ytterkant. För ett rektangulärt tvärsnitt är avståndet från tyngdpunkten till maximal spänning $z = {}^{h}/_{2}$. Tröghetsmomentet, I, beräknas enligt ekvation (2.19) för ett rektangulärt tvärsnitt. Därför kan den maximala spänningen för ett rektangulärt tvärsnitt beräknas enligt

$$\sigma = \frac{M}{\frac{b \cdot h^3}{12}} \cdot \frac{h}{2} = \frac{M}{W} \tag{3.9}$$

där W är böjmotståndet för ett rektangulärt tvärsnitt och definieras enligt

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \tag{3.10}$$

Momentet, M, för en fritt upplagd balk med en punktlast i fältmitt beräknas enligt

$$M = \frac{F \cdot l}{4} \tag{3.11}$$

Töjningen vid maxdeformationen hos en balk kan då efter kombination av ekvation (2.25), (3.7), (3.9) och (3.11) skrivas till

$$\varepsilon_{max} = \frac{k \cdot u \cdot l}{4 \cdot W \cdot E} \tag{3.12}$$

där k är styvheten, u är deformationen och l är spännvidden.

När töjningen sedan divideras med tiden till maxdeformationen kan töjningshastigheten beskrivas och får då enheten s^{-1}

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{max}}{\Delta t} \tag{3.13}$$

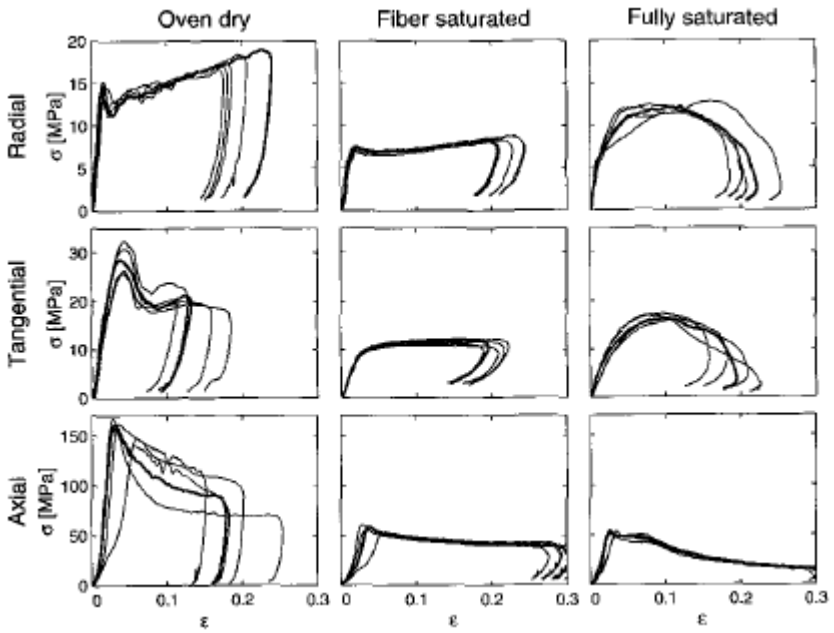
Töjningshastigheten brukar beskrivas på en $\log_{10}$-skala. Ett exempel på detta är en töjning på 0,2 som inträffar på 0,01 sekund skulle då beskrivas som

$$\dot{\varepsilon} = \frac{0{,}2}{0{,}01} = 20 = 2 \cdot 10^1 \ [s^{-1}]$$

3.6.3 Utförda experiment

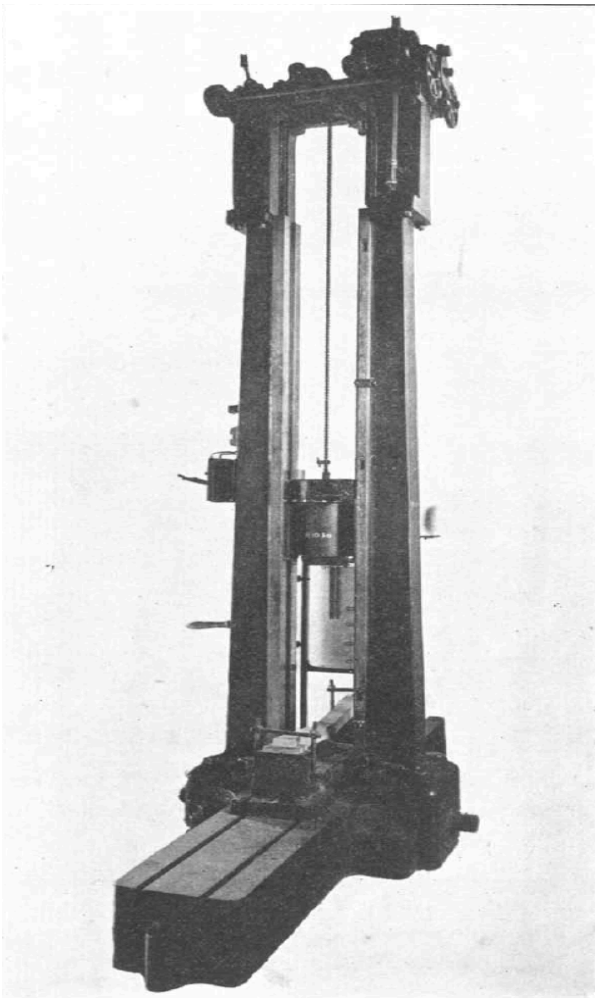
Vid försök utförda av Widehammar undersöktes det hur fuktkvot och töjningshastighet inverkar på trä (Widehammar, 2004). Widehammar använde tre olika fuktkvoter, nämligen helt torrt trä, trä vid fibermättnadsgränsen, dvs. när inget fritt vatten finns i träet utan allt är bundet till fibrerna, samt fullständigt mättat trä där träet bär så mycket vatten som är möjligt. Resultaten av hans försök visade tydligt att

fuktkvoten i träet spelar en viktig roll för hållfastheten. När träet är torrt har det som högst hållfasthet, se Figur 3.11.



Figur 3.11 Spänning-töjningsgrafer för trä vid snabb belastning i tryck för olika fuktkvoter och belastningsriktningar (Widehammar, 2004).

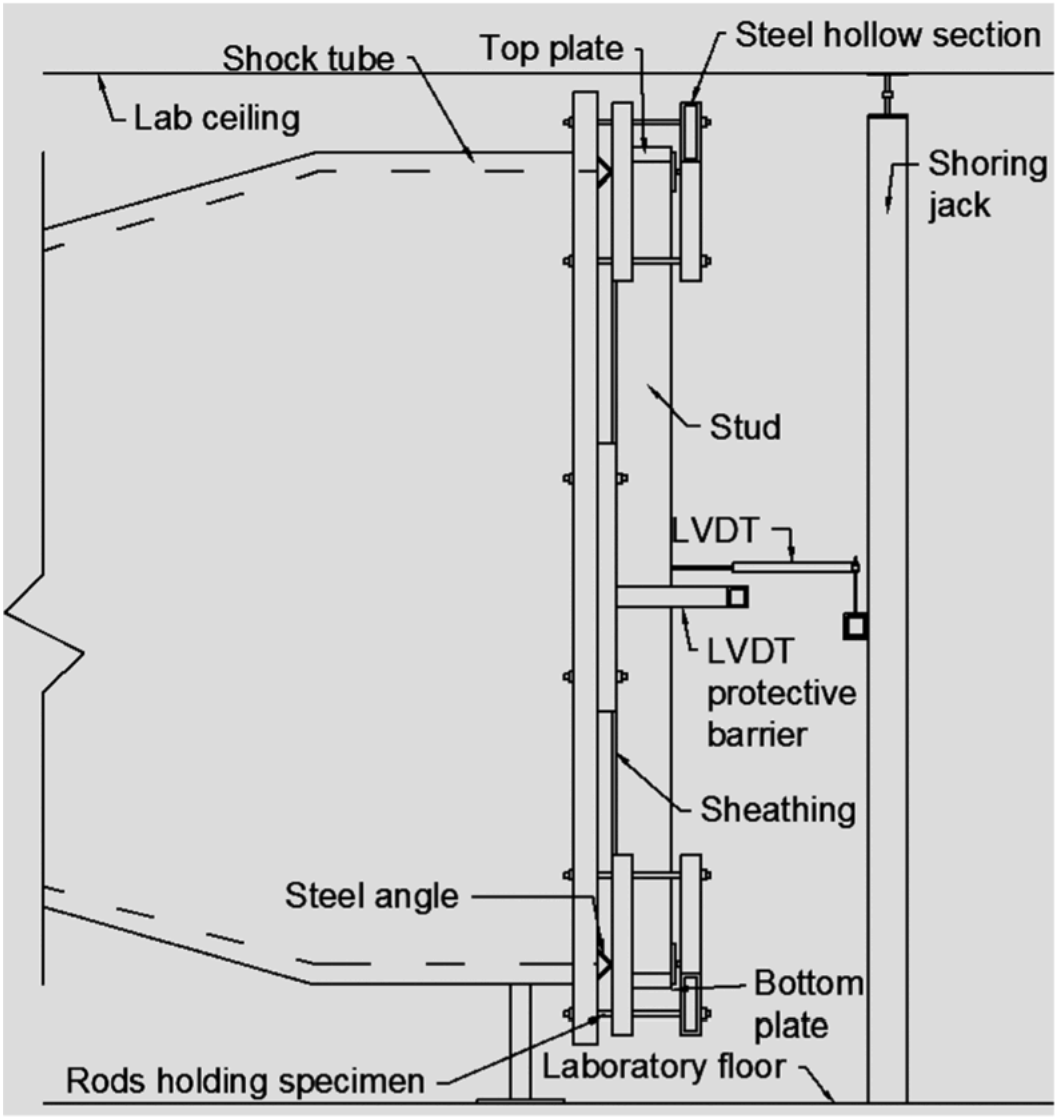
1916 utförde Armin Elmendorf ett tidigt experiment för att utvärdera vad som sker vid impulsbelastning av trä (Gilbertsson & Bulleit, 2013). Vid experimentet testades sex stycken träbalkar med en stötlast och fem stycken balkar med statisk belastning (Elmendorf, 1916). Vid båda testerna var det böjhållfastheten som undersöktes. För att få bra förutsättningar för experimentet var alla balkar tagna från samma träd. Resultaten efter stötförsöken analyserades sedan och jämfördes med data från de statiska försöken. Elmendorf kom då fram till ett förhållande för böjhållfasthet på 1,78 och ett elasticitetsmodulsförhållande på 1,20, maximal stötlast kontra statisk belastning. Vid försöket antogs belastningstiden vara cirka 0,015 s. Denna försöksdata användes sedan under 1950-talet när Madisonkurvan togs fram. Vid stötförsöken använde Elmendorf sig av en Hatt-Turner drop-testing maskin. Maskinen är enkelt utformad och lasten utgörs av en fallande vikt, se Figur 3.12.



Figur 3.12 Hatt-Turner drop-testing maskin (Elmendorf, 1916).

Maskinen ställdes sedan in efter en jämviktsnivå. Vid testerna registrerade maskinen ett deformations-tidsamband som en graf. Elmendorf differentierade kurvan två gånger för att få fram accelerationen vid försöken. Med accelerationen beräknades sedan den ekvivalenta statiska lasten fram. Den användes sedan för att jämföra hållfastheten vid dynamiska försöken med den statiska hållfastheten.

I försök utförda utav Lacroix och Doudak utvärderades töjningseffekter för hela väggelement vid explosionslaster (Lacroix & Doudak, 2014). Detta skiljde sig mot tidigare försök då fokus tidigare legat på att utvärdera små testbitar. I experimentet testades 20 stycken väggelement med olika ytskikt. Tio stycken regelväggar med OSB-skivor och tio stycken med plywoodskivor. Tio stycken väggelement, fem OSB-skivor och fem plywoodskivor, utsattes sedan för statisk belastning till brott uppstod. Vid den statiska belastningen utsattes väggelementen för fyrpunktsböjning. Liknande tillvägagångsätt utfördes vid impulsbelastningen. Väggelementen ställdes då framför en öppning till lufttryckvågskammare där de utsattes för en impulslast som ledde till brott. Öppningen i kammaren var 2032 x 2032 mm, se Figur 3.13.



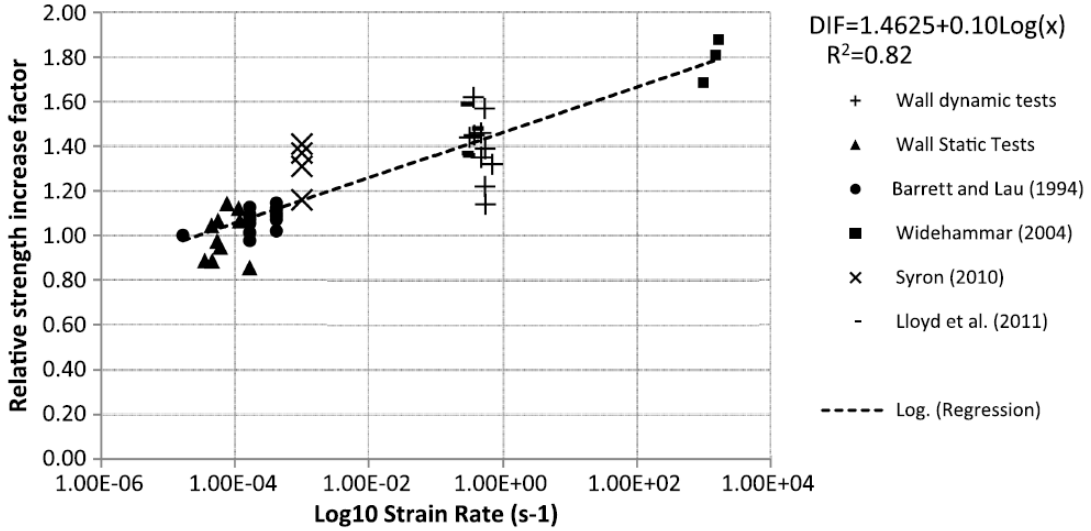
Figur 3.13 Lufttryckvågskammare och testuppställning (Lacroix & Doudak, 2014).

Efter mätningar kunde det fastställas att försöket hade en töjningshastighet på $6{,}2 \cdot 10^{-1}$ s^{-1}. Töjningshastigheten bestämdes efter försöken genom att medel-maxtöjningen för reglarna dividerades med tiden till maxtöjning, se ekvation (3.13).

Resultat analyserades sedan med SDOF-metoden och efter sammanställande av data drogs slutsatsen på försöken att förhållandet i hållfasthet och styvhet vid impulsbelastning kontra statisk belastning var 1,40 för hållfastheten och 1,18 för styvheten. Brottmoden för statisk och dynamisk belastning var böjning. Dock observerades skillnader i hur böjbrottet inträffade; vid statisk belastning uppkom brottet likt en fingerskarv som spreds längs fibrerna medan brottet vid den dynamiska belastningen skedde tvärs fibrerna och ett mer rakt brott inträffade. Detta illustreras i Figur 3.14.

Figur 3.14 *Brottmoder. Till vänster visas brottmod vid statisk belastning och till höger visas brottmod till följd av snabb dynamisk belastning (Lacroix & Doudak, 2014).*

Lacroix och Doudak sammanställde sedan sin data i en graf där de även sammanställt data från töjningshastighetsexperiment på trä utfört av andra. Efter sammanställningen av data anpassade de en trendlinje till resultatet. Ekvationen för trendlinjen och grafen med sammanställd data presenteras i Figur 3.15.



Figur 3.15 *Ökning av hållfasthet i förhållande till töjningshastighet (Lacroix & Doudak, 2014).*

Liknande försök utfördes av Jacques m.fl. där 30 stycken väggreglar med dimensionerna 38 mm x 140 mm x 2440 mm testades med fyrpunktsbelastning

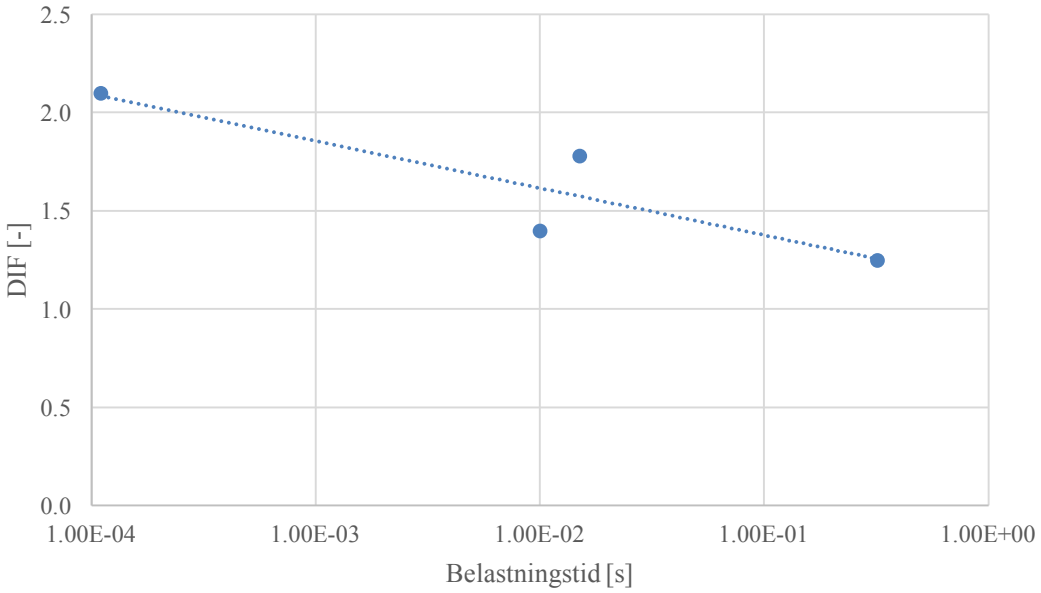
(Jacques , o.a., 2014). Vid experimentet utfördes försök med töjningshastigheterna $6 \cdot 10^{-6}$ s^{-1} vid statisk belastning och $4 \cdot 10^{-1}$ s^{-1} vid impulsbelastning. Impulsbelastningen skedde framför en lufttryckvågskammare som sedan förde över lasten via två punkter på balkarna. Denna uppställning liknar den som användes av Lacroix och Doudak. Töjningshastigheten bestämdes med ekvation (3.13) där Δt står för tiden fram till brott. Vid detta experiment drogs slutsatsen, liknande den som drogs av Lacroix och Doudak, att hållfastheten ökade med en faktor 1,40 och styvheten ökade med 1,14 vid höga töjningshastigheter.

Vid experiment utförda av Markwardt och Liska drogs en annorlunda slutsats (Markwardt & Liska , 1956). De utförde försök på fyra olika träslag, två hårda och två mjuka, och tiden till brott varierades från 320 ms till 550 s. Vid sammanställning av data drogs slutsatsen att en dynamisk förstoringsfaktor för hållfasthet kunde bestämmas till 1,25 för mjuka träslag och 1,10 för hårda träslag. Dock kunde de inte påvisa någon märkbar styvhetsökning hos materialet, något som skiljer sig från de andra försöken.

Tabell 3.3 Sammanställning av resultat från tidigare utförda försökstudier på den dynamiska förstoringsfaktorn för trä.

Utfört av	Antal impulslast försök	Belastnings-hastighet [s]	Töjnings-hastighet [s^{-1}]	DIF_E [-]	DIF_f [-]
(Lacroix & Doudak, 2014)	10	0,010	$6{,}2 \cdot 10^{-1}$	1,18	1,40
(Gilbertsson & Bulleit, 2013)	64	0,00011	$7 \cdot 10^{1}$-$3 \cdot 10^{2}$	-	2,10
(Elmendorf, 1916)	6	0,015	-	1,20	1,78
(Markwardt & Liska , 1956) Mjuka träslag	-	0,32	-	1,00	1,25
(Jacques , o.a., 2014)	18	-	$4 \cdot 10^{-1}$	1,14	1,41

Tabell 3.3 visar att trä uppvisar en förstärkning i hållfasthet samt en ökad styvhet vid snabb belastning och höga töjningshastigheter. Resultat presenterade av Markwardt och Liska har betydligt längre belastningstid än övriga i sammanställningen. Jämfört med Elmendorf skiljer sig deras belastningshastighet med en faktor 21. Spridningen är liten för DIF_E medan värdena för DIF_f har större variation. DIF_f från Gibertsson och Bulleit har fått en stor ökning i hållfasthet vid dynamiska tester jämfört med statiska försöksdata. Hur DIF_f förändras i de olika studierna som har en angiven belastningshastighet illustreras i Figur 3.16, vilken visar att kortare belastningstid resulterar i högre dynamisk förstoringsfaktor.



Figur 3.16 Graf av DIF_f från tre tidigare studier baserat på belastningshastighet.

4 Försök på stötbelastade väggelement i trä

4.1 Orientering

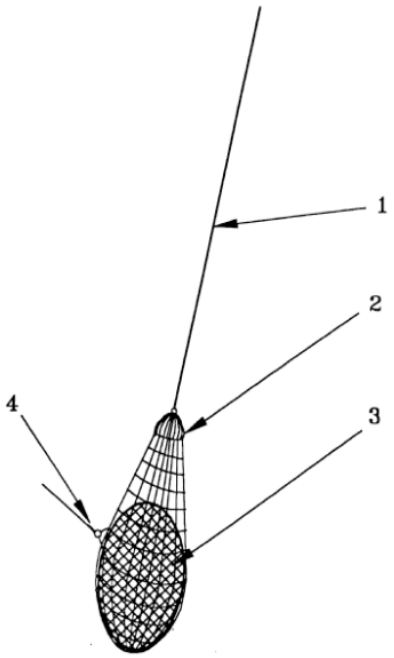
I SS-EN 1363-2 (SIS, 1999) presenteras ett standardförsök där väggelement i trä utsätts för dynamisk stötlast. Försök på krysslaminerade träskivor har sedan utförts i två försöksomgångar i samarbete med trävaruleverantören Martinsons, med vissa avvikelser från utförandet som presenteras i standarden. I detta kapitel presenteras hur försöket ska utföras enligt standarden, hur försöken har utförts av Martinsons samt resultaten av försöken. Vidare så redovisas en sammanställning av de teoretiska beräkningarna från beräkningsgången som beskrivs i avsnitt 4.3.5 samt en jämförelse mellan beräkningsresultat och testresultat.

4.2 Försöksuppställning

4.2.1 Utförande enligt standarden

Uppställningen av försöket är en del av den europeiska standarden och presenteras i SS-EN 1363-2 (SIS, 1999). Syftet är att studera en brandavskiljande bärande eller icke-bärande vägg som utsätts för en stötlast från ett annat element som förlorat sin funktion på grund av brand. Stöten utförs av en säck med blykulor som i en pendelrörelse träffar väggelementet.

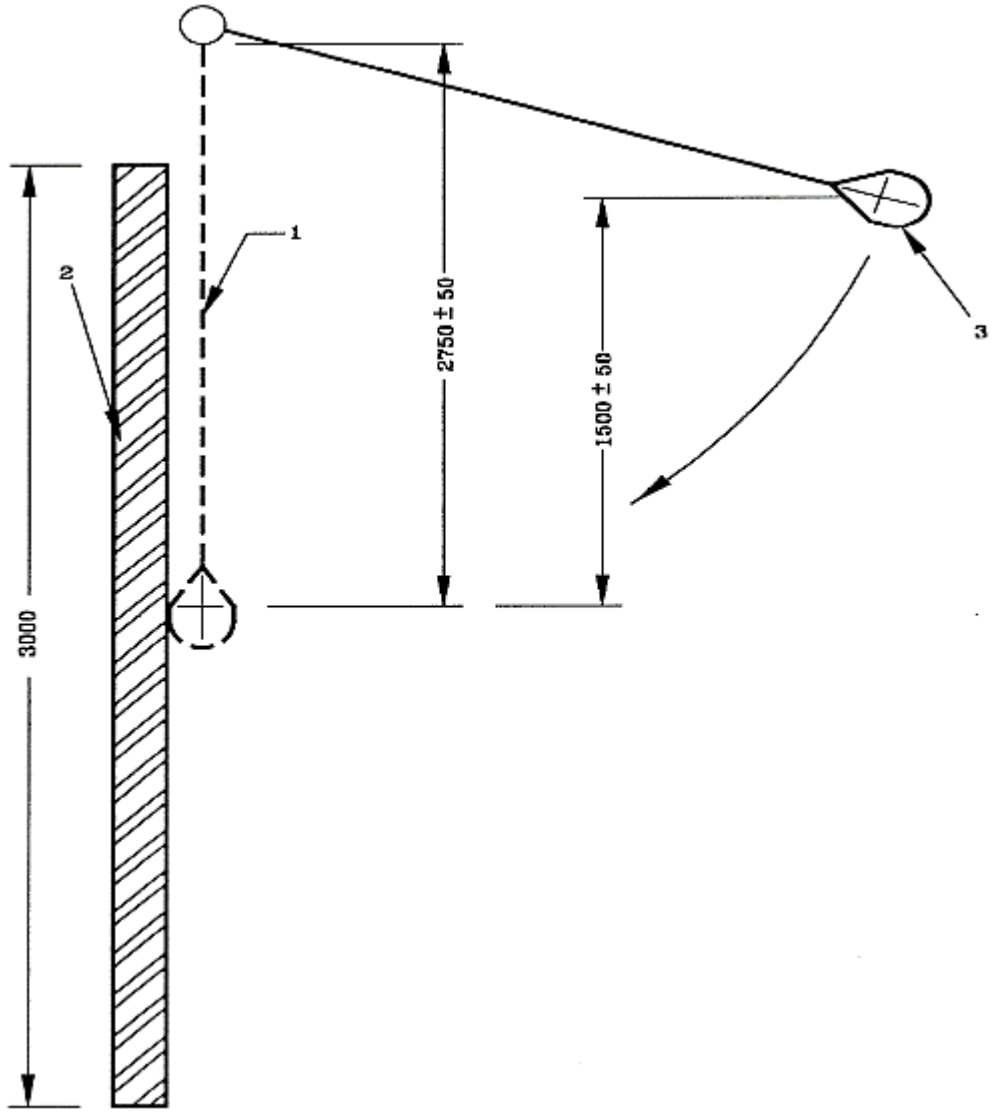
När säcken är tom är den 650 mm x 1200 mm stor. Denna fylls sedan med små 10 kg-säckar fyllda med blykulor som har en diameter på 2–3 mm och den stora säcken knyts sedan samman med ett stålband, se Figur 4.1. Den fyllda säcken är omgiven av ett ståltrådsnät med 50 mm x 50 mm stora maskor och hela nätet har en mantelarea på 1200 mm x 1200 mm. Ståltrådens diameter är angiven till 5 mm. Den totala massan för säcken är 200 kg.



Figur 4.1 *Stötkroppen i standardförsöket där ett väggelement utsätts för en stötlast av en säck med blykulor. 1) stålkabel Ø 10 mm 2) stålband Ø 5 mm 3) säck fylld med blykulor 4) stålkabel Ø 6 mm (SIS, 1999).*

Stötkroppen, dvs. säcken med blykulor, är upphängd i en stålkabel, Ø 10 mm, som är fäst i en fast punkt på ett sådant sätt att den i vila precis nuddar väggelementet i den punkt där impulslasten kommer att ske. Denna punkt ska vara i väggelementets centrum. Längden på pendeln från infästningspunkten till mitten av säcken ska vara 2750 ± 50 mm, se Figur 4.2.

Stötkroppen förflyttas till sin startposition genom användning av lämpligt lyftanordning. Två stycken stålband med en diameter på 6 mm viras därför tätt runt mitten på säcken och är utrustade med en ring som sedan används för att fästa säcken i lyftanordningen, se anvisning 4 i Figur 4.1. Höjden, från vilken stötkroppen släpps, ska vara 1,5 meter, se Figur 4.2, vilket i stötögonblicket motsvarar en energi på ungefär 3000 Nm.



Figur 4.2 *Försöksuppställning enligt standarden där ett väggelement utsätts för en stötlast av en säck med blykulor. 1) stålkabel Ø 10 mm 2) väggelement 3) stötkropp. Randvillkor för väggelementet framgår ej. (SIS, 1999)*

Väggelementet ska bli utsatt för tre stycken stötar inom ett tidsspann om fem minuter och ska då inte gå sönder. För bärande väggelement ska de två första stötarna utföras när en testlast fortfarande belastar väggelementet och den tredje stöten ska utföras när testlasten tagits bort. I båda fallen ska observationer och mätningar vara gjorda inom två minuter. Väggelementen ska utsättas för en värmebelastning och denna värmebelastning på väggelementet ska bibehållas till dess att observationerna är färdiga.

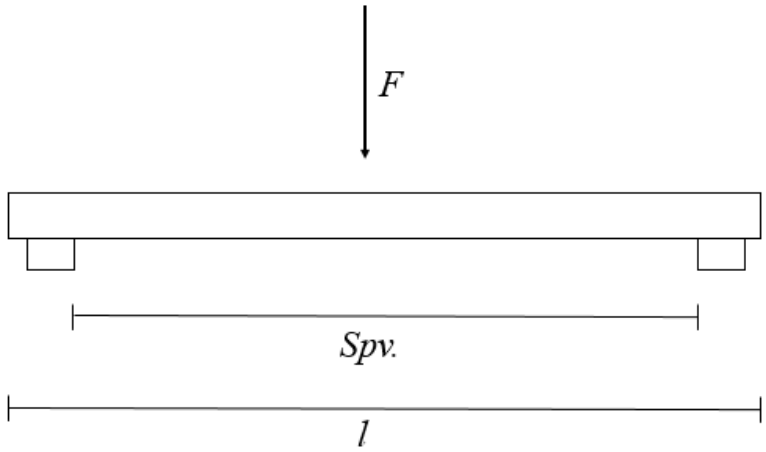
4.2.2 Utförande hos Martinsons vid försöksomgång 1

Vid utförandet hos Martinsons användes en stötkropp i form av en säck fylld med sand med den totala massan 200 kg. Väggelementen utgjordes av krysslaminerat trä i tre lager med tvärsnittsdimensionerna 1 200 mm x 84 mm. Virket hade densiteten $\rho = 436$ kg/m^3 och fuktkvoten $u = 16$ %.

De krysslaminerade träskivorna testades fritt upplagda mellan två stöd, se Figur 4.3. Under skivan i fältmitt placerades tre stycken givare som mätte maximal deformation, se Figur 4.5. En givare placerades i centrum och de andra två 200 mm från respektive kant.

Figur 4.3 *Försöksuppställning vid utförande vid försöksomgång 2 som motsvarar den försöksuppställningen som användes vid försöksomgång 1.*

Vid det första försökstillfället testades tre stycken träskivor. Träskiva 1 lades med en fri längd mellan upplagen på 3,0 meter och träskiva 2 och 3 studerades med en längd på 3,2 meter. Vid både försöksomgång 1 och försöksomgång 2 har spännvidden definierats som sträckan mellan insidan av de två upplagen, se Figur 4.4.



Figur 4.4 *Vid försöken definieras spännvidden som sträckan mellan insidan av de två upplagen.*

Ingen yttre statisk last verkade på skivorna. Säcken med sand lyftes sedan med lämplig lyftanordning till testhöjden, vilken varierade vid varje stöt, se
Tabell 4.1. Sedan läts säcken falla rakt ned och träffa väggelementet i centrum. Tre skivor testades till brott varav den första skivan utsattes för flest stötar. Mätningar och observationer utfördes efter varje stöt.

Tabell 4.1 *Sammanställning av fallhöjder för respektive väggelement vid första försökstillfället.*

Skivnr.	Fallhöjd (m)							
	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4
1	x	x	x	x	x	x		x
2						x		x
3						x	x	x

Figur 4.5 Uppställning av deformationsgivare.

Väggelementen som testades hos Martinsons var inte utsatta för någon värme- eller brandbelastning. Istället användes en approximativ metod för att ta hänsyn till brand. De skivor som planeras att användas är femlagersskivor, men för att ta hänsyn till minskat tvärsnitt efter brand användes istället trelagersskivor vid testerna, då det kan tänkas att två lager blivit förkolnade och inte längre ingår i det effektiva tvärsnittet. Detta bedöms vara konservativt eftersom massan av de två brandskadade skivlagren inte beaktas i försöken.

4.2.3 Utförande hos Martinsons vid försöksomgång 2

Vid det andra försökstillfället utsattes fem stycken skivor för dynamiska tester och fem stycken skivor utsattes för statiska tester, totalt testades alltså tio skivor. Vid det andra försökstillfället var testuppställningen för de dynamiska testerna liknande som den som användes vid det första tillfället, se Figur 4.3. Den enda skillnaden mellan försöken var att vid försöksomgång 2 användes en något större säck för att utföra försöken, dock fortfarande innehållande 200 kg sand. Testsäcken från försöksomgång 1 var då placerad inuti den större säcken. Upphängningen skedde således i den större säcken samt att spännband för att behålla formen vid stöt placerades utanför den större säcken. Vid det andra försökstillfället utfördes styvhetsmätningen för skivan precis före de dynamiska försöken genom att en lastpall med massan 705 kg fick vila på skivan varpå deformationerna avlästes och sedan beräknades en elasticitetsmodul fram på samma sätt som vid försöksomgång 1. Skivorna var inte identiska mellan försöksomgång 1 och 2; de nya skivorna var tunnare med en tjocklek på 70 mm

jämfört med 84 mm vid försöksomgång 1 samt hade spännvidden 2,8 m. Skivorna hade samma densitet som vid försöksomgång 1 men en lägre fuktkvot, u = 11 %.

De dynamiska testerna i försöksomgång 2 utfördes efter att annat testschema. Fem skivor testades, varav de tre första testades med regelbunden fallhöjdsökning till brott. De två sista skivorna testades sedan tre gånger vardera på samma fallhöjd, vilken motsvarade 80–90 % av förväntad brotthöjd. Om skivan klarade av de tre upprepade stötarna från samma höjd, ökades fallhöjden till brott uppstod. En summering av fallhöjderna presenteras i Tabell 4.2. Denna metod ger ett större statistiskt underlag för att kunna bestämma de dynamiska förstoringsfaktorerna på skivorna.

Tabell 4.2 Sammanställning av fallhöjder för respektive väggelement vid andra försökstillfället.

Skivnr.	Fallhöjd (m)									
	0,60	0,90	1,20	1,50	1,65	1,80	2,00	2,10	2,20	2,30
1	x	x	x	x		x	x		x	
2			x	x						
3			x	x		x				
4				xxx	x	x	x		x	
5				xxx		x		x		x

4.2.4 Avvikelser från standarden

Försöken som utfördes i samarbete med trävaruleverantören Martinsons skiljde sig på vissa punkter från hur standarden presenterar utförandet. Väggelementen som testas är bärande väggelement, men utsätts inte för någon statisk vertikal testlast. Vid försöken var inte väggelementen stående, utan låg på två stöd, likt en fritt upplagd balk. Stötkroppen kom därför inte i en pendelbåge vid stöten, utan föll rakt uppifrån och träffade sedan väggelementen i centrum. Uppbyggnaden av stötkroppen skiljde sig, exempelvis består den i standarden utav blykulor och i de utförda försöken utav sand, men de båda hade ändå samma massa i standarden som i de utförda försöken. Varje väggelement utsattes inte för exakt tre stötar, utan antal stötar varierade för olika väggelement, beroende på när brott inträffade. Dessutom varierade höjderna, då höjden hela tiden ökades efter varje stöt på respektive skiva, med skiva 4 och 5 i försöksomgång 2 som undantag. Detta på grund av att Martinsons var intresserade av att veta vid vilken fallhöjd som brott kan förväntas för skivan, samt få resultat att jämföra med framtagen beräkningsmetodik. Skivorna som testas hos Martinsons utsattes inte för en brand-eller värmebelastning, utan istället användes en approximativ metod där två lager av skivorna hypotetiskt var förkolnande och skivor i tre lager utsattes för tester.

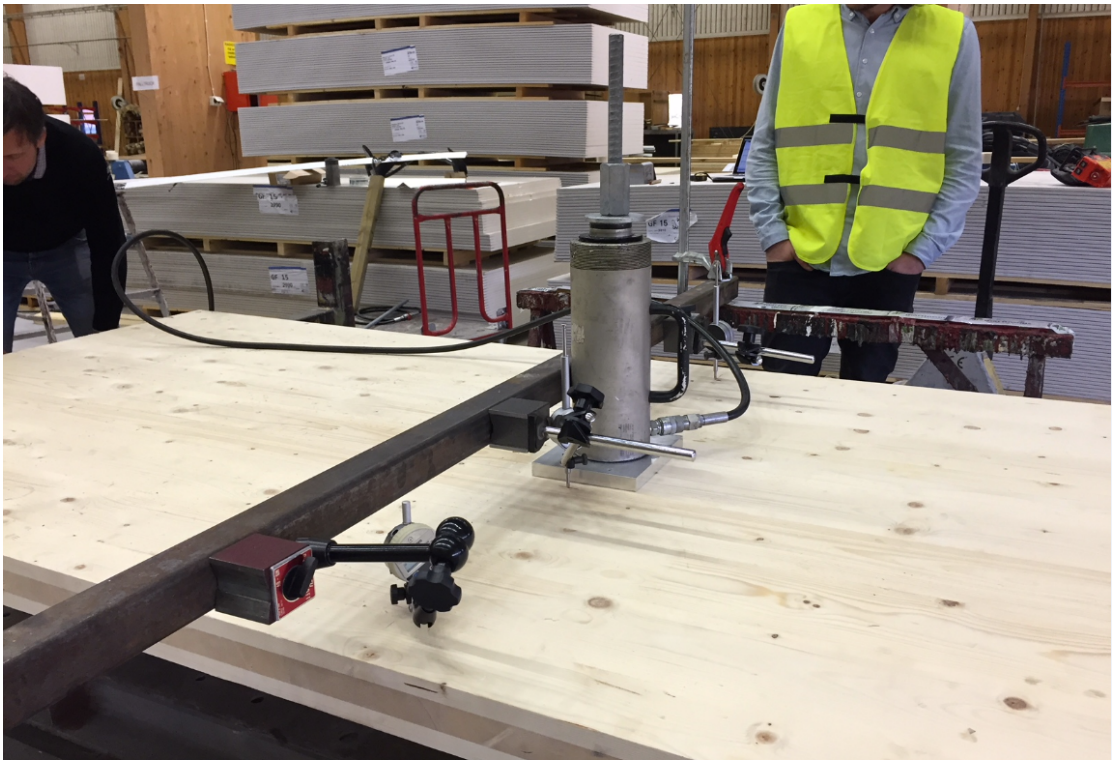
När en beräkningsmetodik där energi, rörelsemängd och arbete används, blir inte resultaten annorlunda i teorin vid en liggande försöksuppställning jämfört med en stående försöksuppställning. Därför anses den använda försöksuppställningen representativ för standardförsöket vid användning av den aktuella beräkningsgången.

4.2.5 Statiska försök

För att få relevanta värden för kapaciteten hos skivelementen vid statisk belastning utfördes vid försöksomgång 2 även statiska tester på skivorna. Fem stycken skivor utsattes då för en statisk last tills dess att brott uppstod. Skivorna belastades med en punktlast i fältmitt upplagd på två stålbalkar, se Figur 4.6. Lastanordningen bestod av en hydraulisk domkraft med tryckgivare och lasten lästes av manuellt, se Figur 4.8. Deformationerna avlästes också manuellt med två deformationsgivare 100 mm från respektive kant, se Figur 4.6, placerade 200 mm från fältmitt.

Skiva 1 belastades med en punktlast i form av hydraulkraften centrerad på skivan utan att vara upplagd på två stålbalkar, se Figur 4.7. Dessutom sattes till en början tre deformationsmätare upp, men en utav dem hade inte tillräckligt stor slaglängd för att mäta deformationerna, vilket gjorde att den togs bort. Dessa mätte deformationerna i fältmitt. Brottet i skiva 1 uppstod lokalt under domkraften, vilket gjorde att försöksuppställningen ändrades för resterande skivor till den som visas i Figur 4.6.

Figur 4.6 Försöksuppställning vid statiska försök.



Figur 4.7 Försöksuppställning vid statiska försök på skiva 1.

Figur 4.8 Försöksuppställning vid statiska försök med manuell lastavläsning från tryckgivaren.

Det fanns ingen mätutrustning som kunde registrera last-deformationssamband, vilket ledde till att lasten och deformationerna istället lästes av manuellt vid fyra tillfällen innan skivan belastades till brott. När brott uppstod lästes endast lasten av. De fyra avläsningspunkterna för varje skiva gör att en uppskattning av hur stor elasticitetsmodulen är för skivorna kan göras.

4.3 Resultat

4.3.1 Orientering

Försöken som är utförda i samarbete med trävaruleverantören Martinsons är utförda enligt metoden som beskrivs i avsnitt 4.2. Martinsons är inte enbart intresserade av ifall skivorna är godkända av standarden, utan även av hur stor impulslast som skivorna klarar av. Testerna som är gjorda har därför också till syfte att ta reda på vid vilken fallhöjd som brott uppstår, vilket förklarar anledningen till fallhöjder över standardens angivna fallhöjd på 1,5 meter. Dessutom önskas att med hjälp av testerna få tillräckligt mycket data för att kunna ta fram en pålitlig beräkningsgång där det kan beräknas vilka dynamiska laster som väggelementen klarar av.

4.3.2 Framtagning av elasticitetsmodul

Vid försökstillfälle 1 hos Martinsons utfördes först tester på KL-skivorna för att kunna bestämma elasticitetsmodulen på skivorna. Skivorna belastades då med en statisk last på 8,3 kN varpå deformationen i fältmitt uppmättes via tre givare. Denna uppmätta nedböjning jämfördes sedan med uppmätt nedböjning i obelastat tillstånd. Elasticitetsmodulen för respektive skiva beräknades sedan med ekvation (2.18) och (2.25) och har avrundats till ett jämnt hundratal. Resultaten från denna elasticitetsmodulsmätning presenteras i Tabell 4.3.

Tabell 4.3 Sammanställning av resultat vid elasticitetsmodulsmätning vid försökstillfälle 1.

Skiva nr	Tjocklek [m]	Spv [m]	Bredd [m]	Last [N]	Def. [mm]	Styvhet k [kN/m]	Fiktiv E-modul [MPa]
1	0,084	3,0	1,2	8300	11,8	703	6700
2	0,084	3,2	1,2	8300	14,5	572	6600
3	0,084	3,2	1,2	8300	13,6	610	7000

Anledningen att styvhetsvärdena skiljer sig markant mellan skiva 1 och skiva 2 och 3 är för att skiva 1 hade en spännvidd på 3,0 meter och skiva 2 och 3 hade en spännvidd på 3,2 meter vid försöksomgång 1. Vid fortsatta beräkningar används de individuella värdena på elasticitetsmodulen för respektive skiva, alltså beräknas inget gemensamt medelvärde.

Vid försökstillfälle 2 utfördes dessa tester på samma sätt. Lasten utgjordes av en pall med massan 705 kg som placerades på en lastspridande planka på skivan för att lasten skulle föras över som en punktlast. Deformationerna uppmättes sedan i fältmitt på undersidan med två deformationsgivare med en säkerhet på 0,1 millimeter. Testuppställningen illustreras i Figur 4.9.

Figur 4.9 *Testuppställning för elasticitetsmodulsmätning av dynamiskt belastade träskivor.*

Resultaten av testerna presenteras i Tabell 4.4.

Tabell 4.4 *Sammanställning av resultat vid elasticitetsmodulmätning vid försökstillfälle 2.*

Skiva nr	Tjocklek [m]	Spv [m]	Bredd [m]	Last [N]	Def. [mm]	Styvhet k [kN/m]	Fiktiv E-modul [MPa]
1	0,07	2,8	1,2	6900	11,3	613	8200
2	0,07	2,8	1,2	6900	11,2	621	8300
3	0,07	2,8	1,2	6900	11,3	615	8200
4	0,07	2,8	1,2	6900	11,8	589	7900
5	0,07	2,8	1,2	6900	10,7	650	8700

Elasticitetsmodulen hos skivorna vid försökstillfälle 2 hade liten spridning mellan resultaten. Skivorna var även något styvare än vid första tillfället. Det var förväntat av Martinsons eftersom skivorna inte var identiska mellan de båda försökstillfällena.

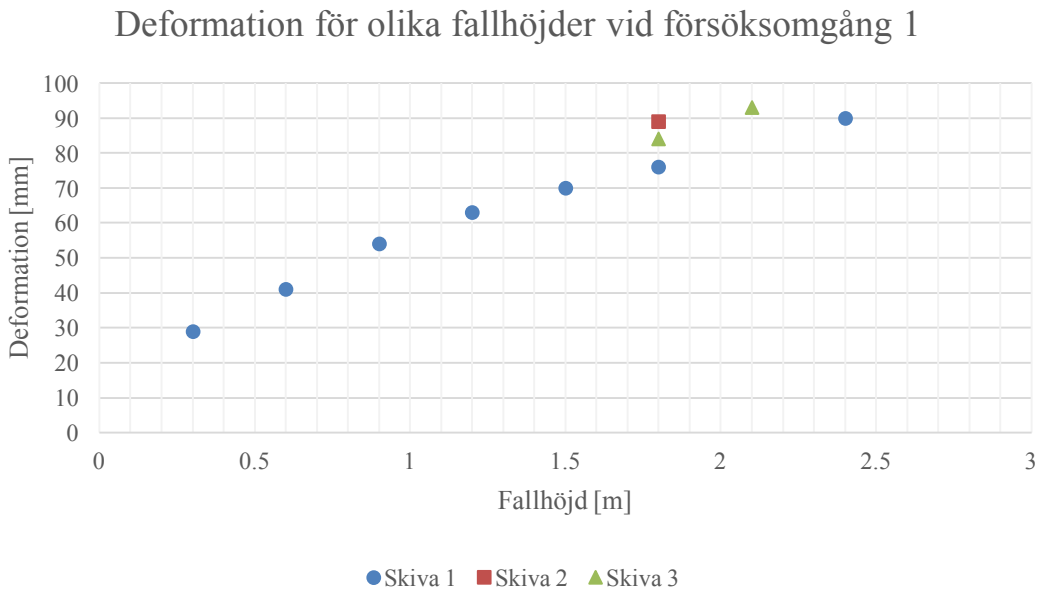
4.3.3 Deformationsmätningar

KL-skivorna belastades med stötar från olika höjd och med varierande antal stötar beroende på när brott uppstod. Efter varje stöt noterades om brott hade skett och deformationerna från de tre givarna lästes av. Resultatet av försöken vid försöksomgång 1 redovisas i Tabell 4.5 och presenteras grafiskt i Figur 4.10.

Tabell 4.5 Sammanställning av försöksdata vid försöksomgång 1.

Skiva nr	Försök nr	Fallhöjd [m]	Spv. [m]	Brott (ja/nej)	Def. 1 kant [mm]	Def. 2 centrisk [mm]	Def. 3 kant [mm]	Def. Medel [mm]
1	1.1	0,3	3,0	Nej	34	29	24	29
1	1.2	0,6	3,0	Nej	40	42	42	41
1	1.3	0,9	3,0	Nej	55	54	52	54
1	1.4	1,2	3,0	Nej	67	64	59	63
1	1.5	1,5	3,0	Nej	68	71	70	70
1	1.6	1,8	3,0	Nej	75	77	77	76
1	1.7	2,4	3,0	Ja[1]	85	85	100	90
2	2.1	1,8	3,2	Ja[2]	96	90	81	89
2	2.2	2,4	3,2	Ja[3]	-	-	-	-
3	3.1	1,8	3,2	Nej	86	85	82	84
3	3.2	2,1	3,2	Nej	90	94	94	93
3	3.3	2,4	3,2	Ja[3]	-	-	-	-

[1] Brott vid kant, läge 3, fortfarande lasttagande
[2] Initialt brott, fortfarande lasttagande
[3] Rejält brott, max last passerad



Figur 4.10 Deformation för olika fallhöjder vid försöksomgång 1.

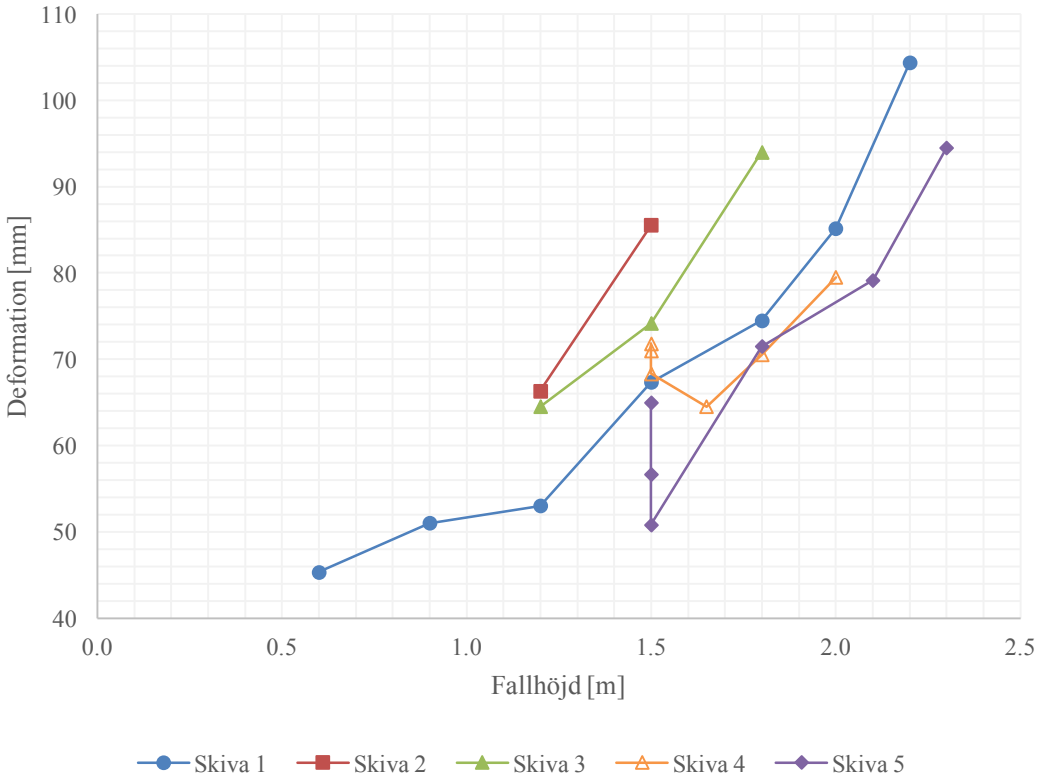
Resultaten som framgår i Tabell 4.5 visar att variationerna för mätvärdena är små i de flesta försöken. Det är främst när brott sker som mätvärdena skiljer sig markant mellan de tre olika givarna. Värt att påpeka är att även vid försök 1.1 och försök 2.1 är variationerna större mellan mätvärdena, se respektive uppmätt kantdeformation för dessa försök i Tabell 4.5. Möjlig förklaring till detta kan vara att stöten inte träffat i centrum på skivan vid de två försöken.

Resultatet från testerna i försöksomgång 2 presenteras i Tabell 4.6 och illustreras grafiskt i Figur 4.11.

Tabell 4.6 Sammanställning av försöksdata vid försöksomgång 2.

Skiva nr	Försök nr	Fallhöjd [m]	Spv. [m]	Brott (ja/nej)	Def. 1 kant [mm]	Def. 2 centrisk [mm]	Def. 3 kant [mm]	Def. Medel [mm]
1	1.1	0,6	2,8	Nej	44	48	44	45
1	1.2	0,9	2,8	Nej	49	54	50	51
1	1.3[A]	1,2	2,8	Nej	49	54	56	53
1	1.4	1,5	2,8	Nej	61	70	71	67
1	1.5	1,8	2,8	Nej	70	77,5	76	75
1	1.6	2,0	2,8	Nej	83	88,5	84	85
1	1.7[A]	2,2	2,8	Ja[1]	90	100	123	104
2	2.1	1,2	2,8	Nej	76	69	54	66
2	2.2[A]	1,5	2,8	Ja[2]	109	84,5	63	86
3	3.1	1,2	2,8	Nej	63	67,5	63	65
3	3.2	1,5	2,8	Ja[3]	72	77,5	73	74
3	3.3[A]	1,8	2,8	Ja[2]	111	92	79	94
4	4.1	1,5	2,8	Nej	65	75,5	75	72
4	4.2	1,5	2,8	Ja[4]	71	76	66	71
4	4.3	1,5	2,8	Ja[4]	66	73	66	68
4	4.4[A]	1,65	2,8	Ja[4]	62	70,5	61	65
4	4.5[A]	1,8	2,8	Ja[4]	68	76,5	67	71
4	4.6	2,0	2,8	Ja[4]	73	88,5	77	80
4	4.7[A]	2,2	2,8	Ja[1]	-	-	-	-
5	5.1	1,5	2,8	Nej	58	68	69	65
5	5.2[A]	1,5	2,8	Nej	58	60	52	57
5	5.3[A]	1,5	2,8	Nej	52	53,5	47	51
5	5.4	1,8	2,8	Nej	72,5	75	67	72
5	5.5	2,1	2,8	Nej	77	83,5	77	79
5	5.6[A]	2,3	2,8	Ja[1]	79	88,5	116	95

[1] Rejält brott, max last passerad
[2] Brott vänster, fortfarande lasttagande, men klarar inte en ytterligare stöt
[3] Fingerskarvsbrott i mittlamell
[4] Fingerskarvsbrott i mitt, fortfarande lasttagande
[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.



Figur 4.11 Deformation för olika fallhöjder vid försöksomgång 2.

Vid vissa försök träffar inte säcken helt centrisk, vilket syns i exempelvis försök 1.3 och 1.4, då deformationen på höger kant är betydligt större än kantdeformationen till vänster. Försök 1.7 visar stora skillnader i deformationer från kant till kant, vilket beror på att brott uppstått och deformationsmätningarna är därför inte helt representativa eftersom mätvärdena varierar mycket från ena kanten av skivan till den andra.

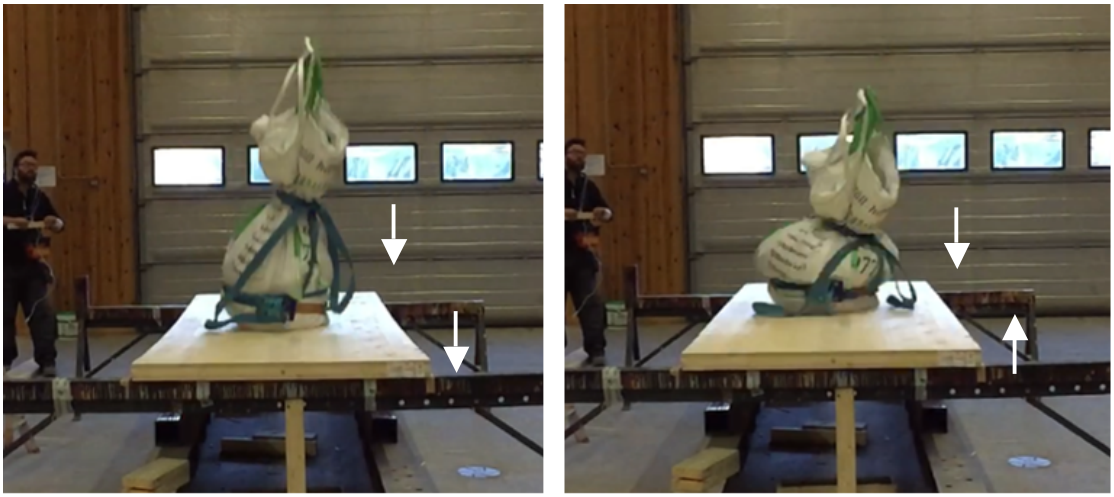
Mätvärdena för skiva 2 är väldigt ojämna. Stöten bedöms ha varit centrisk placerad, men ändå har skivan givit mycket större deformation i vänster kant än i höger. Vad detta beror på är oklart. Dessutom har skiva 2 gått till brott vid låg fallhöjd i förhållande till de andra skivorna. Precis som för brottvärdena på skiva 1 vid försök 1.7 så är deformationsvärdena på försök 2.2 inte representativa, eftersom medelvärdet är missvisande.

Skiva 3 har jämna deformationsvärden fram till dess att brott uppstår i försök 3.3 där brottet sker till vänster i skivan, något som också visas på de ojämna deformationsvärdena. Medeldeformationen i försök 3.3 är därför missvisande.

Första träffen på skiva 4 konstaterades via videoanalys ha skett till höger om centrum, vilket även deformationsmätningen visade. Vid nästa stöt, försök 4.2, på samma fallhöjd, 1,5 meter, inträffar ett brott i fingerskarven i centrum av skivan, se Figur 4.12. Skivan är ändå fortsatt lasttagande och efter fingerskarvsbrottet uppvisar försök 4.3 deformationsvärden jämna med tidigare värden på samma fallhöjd.

Figur 4.12 Fingerskarvsbrott i fältmitt efter försök 4.2.

Vid försök 4.4 och 4.5, där fallhöjderna har ökat till 1,65 m respektive 1,8 m, visas inte ökning i deformation som förväntat, utan är kvar på samma värden som deformationerna vid 1,5 meter. Efter videoanalys syns hur säcken visar ett ”svampbeteende” där hela energin i säcken inte bedöms hunnit överföras till skivan före deformationen har hunnit vända och är på väg tillbaka upp igen, se Figur 4.13. Alltså är delar av säckens massa på väg neråt medan responsen hos skivan har vänt och den är på väg tillbaka mot startpunkten. Enligt beräkningsmodellen så antas det att en impulslast inträffar, där det kan räknas som en impulslast om den verkar kortare än *T/4* (Hall & Kasper, 2017). Eftersom responsen hos skivan är på väg tillbaka medan delar av säcken fortfarande är på väg neråt och tid till maxdeformation är *T/4*, kan det påvisas att lastöverföringen vid ”svampbeteende” är längre än *T/4* vilket innebär att beräkningsgången inte överensstämmer med dessa testvärden. Säcken formar sig som en svamp, där sand väller över spännbanden. Den dämpning som därmed sker i säcken bidrar till att deformationerna inte blir lika stora, då den verkande lasten inte blir lika stor, vilket är en förklaring till att värdena för deformationerna vid försök 4.4 och 4.5 är mindre. Dessa missvisande värden syns även i grafen i Figur 4.11. Efter försöken på skiva 4 justerades säcken för att motverka ”svampbeteendet”.



Figur 4.13 *Svampbeteendet på stötkroppen som uppstår vid vissa stötar, här visas stöten från försök 5.3. Till vänster syns säcken precis i stötögonblicket och till höger syns säcken precis efter stötögonblicket, där delar av säckens massa fortfarande är på väg neråt medan skivan är på väg upp från maximal deformation.*

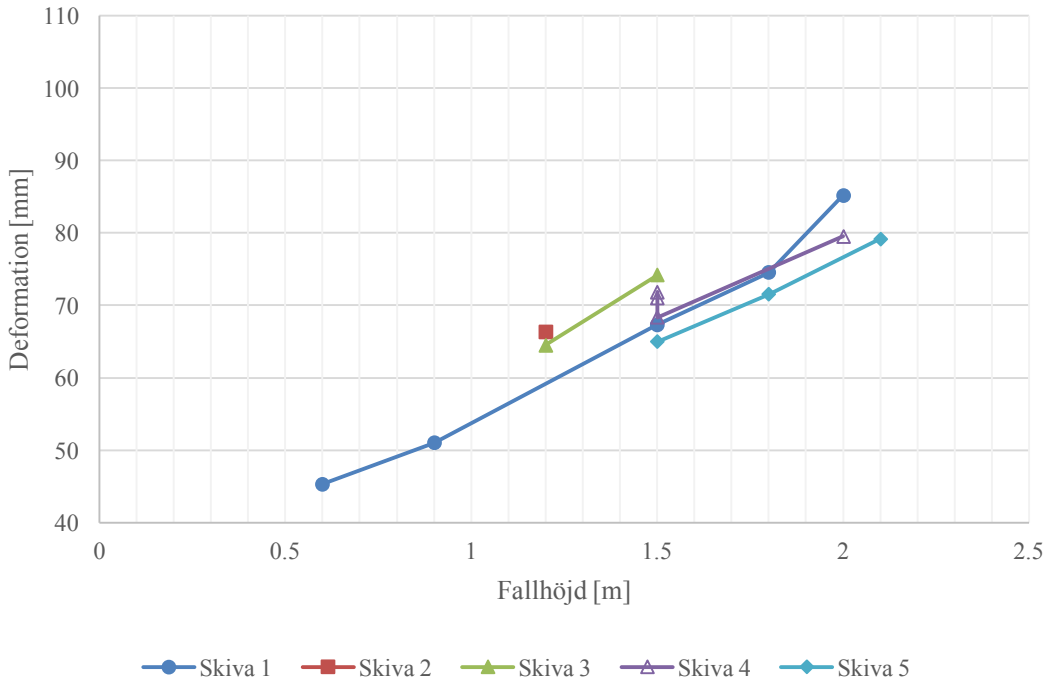
För skiva 5 så uppstår återigen ”svampbeteende” vilket syns tydligt i försök 5.3, där fallhöjden är samma som vid försök 5.1 och 5.2 men uppvisar mycket lägre deformationer. Säcken justeras efter denna stöt och skiva 5 går sedan till brott vid fallhöjden 2,3 meter. Precis som för brottvärdena på skiva 1 vid försök 1.7 så är medelvärdet av deformationsvärdena på försök 5.5 inte representativt eftersom brott skett på ena sidan av skivan där deformationerna är mycket större än på den andra sidan av skivan.

På grund av svampbeteendet som sker vid vissa stötar i försöksomgång 2 samt missvisande medelvärden vid brotthöjden justeras Tabell 4.6 och grafen i Figur 4.11 där dessa missvisande mätvärden utesluts. De värden som i Tabell 4.6 märkts med fotnot A är bortkorrigerade och den nya grafen visas i Figur 4.14.

Tabell 4.7 *Sammanställning av försöksdata vid försöksomgång 2 där missvisande värden tagits bort.*

Skiva nr	Försök nr	Fallhöjd [m]	Spv. [m]	Brott (ja/nej)	Def. 1 kant [mm]	Def. 2 centrisk [mm]	Def. 3 kant [mm]	Def. Medel [mm]
1	1.1	0,6	2,8	Nej	44	48	44	45
1	1.2	0,9	2,8	Nej	49	54	50	51
1	1.4	1,5	2,8	Nej	61	70	71	67
1	1.5	1,8	2,8	Nej	70	77,5	76	75
1	1.6	2,0	2,8	Nej	83	88,5	84	85
2	2.1	1,2	2,8	Nej	76	69	54	66
3	3.1	1,2	2,8	Nej	63	67,5	63	65
3	3.2	1,5	2,8	Ja[3]	72	77,5	73	74
4	4.1	1,5	2,8	Nej	65	75,5	75	72
4	4.2	1,5	2,8	Ja[4]	71	76	66	71
4	4.3	1,5	2,8	Ja[4]	66	73	66	68
4	4.6	2,0	2,8	Ja[4]	73	88,5	77	80
5	5.1	1,5	2,8	Nej	58	68	69	65
5	5.4	1,8	2,8	Nej	72,5	75	67	72
5	5.5	2,1	2,8	Nej	77	83,5	77	79

[3] Fingerskarvsbrott i mittlamell
[4] Fingerskarvsbrott i mitt, fortfarande lasttagande

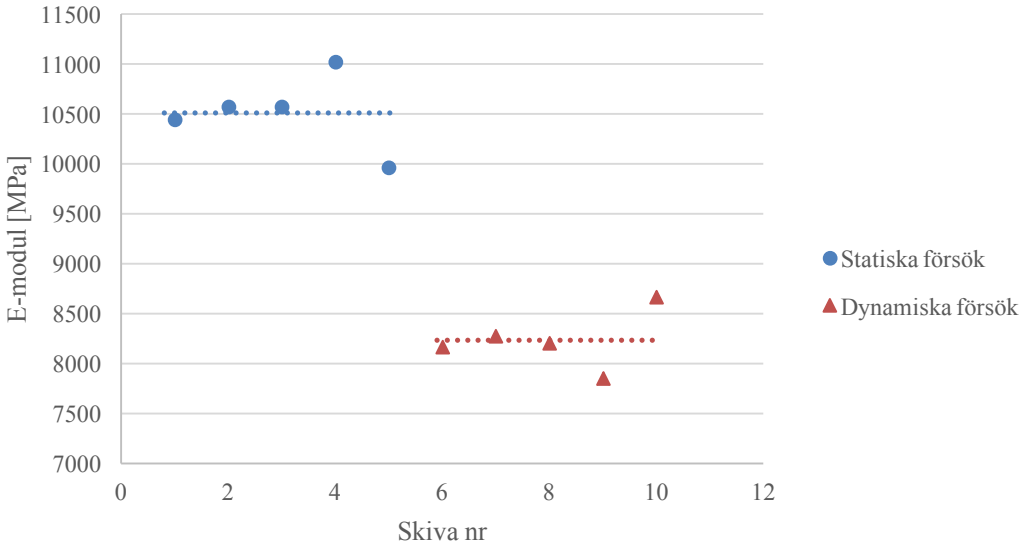


Figur 4.14 *Justerade deformationsvärden vid försöksomgång 2 där försöken som uppvisat svampbeteende samt missvisande medeldeformation vid brott har uteslutits.*

4.3.4 Resultat av statiska försök

Vid sammanställning av data från de statiska försöken gick det att se en skillnad i elasticitetsmodul mellan det statiska försöket och det dynamiska försöket, se Figur 4.15. Data från respektive test hade liten spridning mellan punkterna och kunde ses som en samlad grupp. När de jämfördes med varandra gick det att se en spridning mellan grupperna. Detta illustreras i Figur 4.15 där värdena är helt okorrigerade och kraften vid de statiska försöken är framräknad enligt ekvation (2.5) där arean är den angivna cylinderarean för domkraften. Medelvärdet för elasticitetsmodulen vid de statiska testerna är 10 500 MPa och medelvärdet för elasticitetsmodulen vid de dynamiska testerna är 8 200 MPa. Skillnaden mellan de två medelvärdena från försöken är alltså 22 %, vilket anses vara högt. Eftersom de separata grupperna är samlade finns det anledning att utreda ifall det är något systematiskt fel vid försöken som är orsaken till spridningen mellan försöksmetoderna. På grund av detta utfördes en kontroll av försöksutrustningen i efterhand för att utvärdera felkällor. De felfaktorer som spridningen anses kunna bero på är:

- Randvillkor
- Fel på våg vid bestämning av egenvikt av last
- Domkraft
- Noggrannhet vid mätningsavläsning



Figur 4.15 Graf av beräknade elasticitetsmoduler från de olika typerna av försök.

Vid genomgång av foton från testtillfällena går det att påvisa att spännvidden har varit densamma vid båda försöken. Alltså går det att utesluta att randvillkoren har varit olika mellan de olika försöken. För att ta hänsyn till att testuppställningen för de statiska försöken mätte deformationerna 200 mm från fältmitt av skivan, går det via elementarfall att beräkna att deformationen 200 mm från fältmitt är 97 % av deformationen i fältmitt, se Bilaga E. Denna faktor är sedan beaktad vid beräkning av elasticitetsmodulen.

Martinsons har efter försöket genomfört en kontroll på vågen som användes vid försöket. Säcken, som vägde 200 kg med vågen från försöken som hade en precision

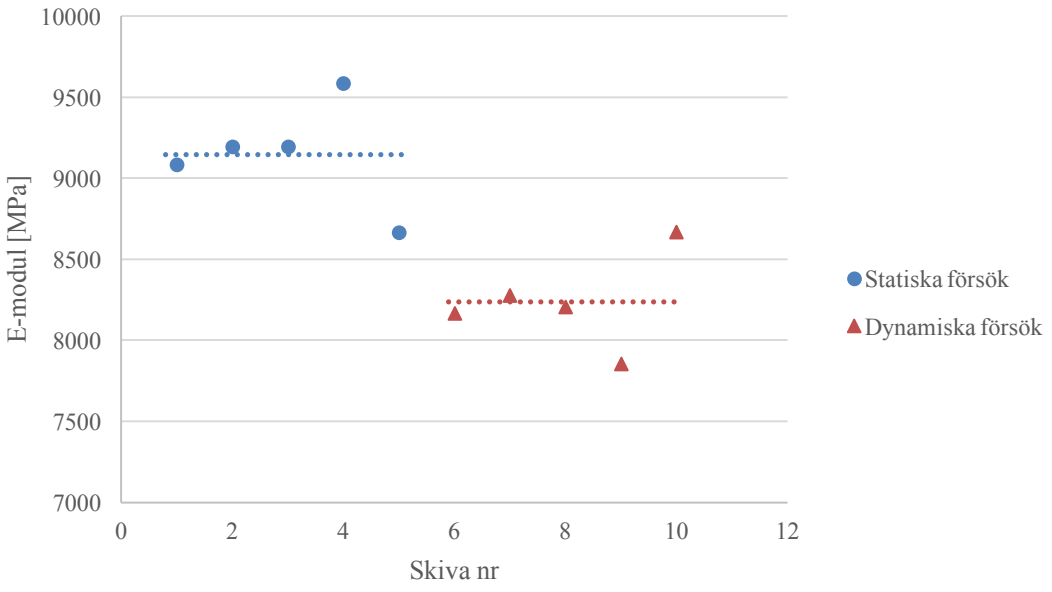
på ±5 kg, vägdes om med en våg som hade en precision på ±0,5 kg. Vid kontrollen vägde säcken 203,5 kg. Detta anses vara inom tolerans och detta är sannolikt inte källan till felet.

Vid de statiska försöken användes en hydraulisk domkraft. Martinsons utförde i efterhand försök för att kunna utvärdera friktionsförlusterna hos domkraften. Vid detta försök drogs slutsatsen att cirka 13 % av trycket försvinner på grund av friktion gentemot trycket som visas på mätaren. Denna domkraft mätte trycket i bar (1 bar = 0,1 MPa) och cylindern hade en area på 36,4 cm^2. Genom att mäta trycket i den hydrauliska domkraften samt att veta dess area kan lasten som verkar på skivan bestämmas. För att bestämma hur stora friktionsförlusterna var hos domkraften användes en fritt upplagd balk med domkraften placerad i fältmitt. Ett utav stöden var sedan en våg som mätte vikten som domkraften gav upphov till vid ett visst tryck. Genom att dubblera denna vikt för att ta hänsyn till reaktionskraften i det andra stödet och sedan multiplicera med gravitationskonstanten går det att beräkna den last som domkraften ger upphov till. Denna kraft jämfördes sedan med den beräknade kraften för domkraften vid det angivna trycket. Resultatet från denna kontroll presenteras i Tabell 4.8.

Tabell 4.8 Sammanställning av kontrollförsök för domkraft.

Manometer Bar	Beräknad kraft [N]	Våg [kg]	Vågx2 [kg]	Uppmätt kraft [N]	Kvot
35	12 740	555	1110	10 900	0,855
42,9	15 616	700	1400	13 748	0,880
48,3	17 581	800	1600	15 712	0,893

Medelvärdet av friktionsförlusterna antas därför ligga på 13 %. När denna faktor justerar kraften leder detta till att medelvärdena för elasticitetsmodul mellan de olika testerna fortfarande skiljer med 11 %. Detta illustreras i Figur 4.16.



Figur 4.16 Elasticitetmodul korrigerad för friktionsförluster och placering av lägesgivare

Vid mätning av de statiska testerna gjordes avläsningen i hela millimeter. Detta för att det var ett litet tryckfall i domkraften, vilket gjorde det svårt att genomföra avläsning med högre precision. Alltså kan mätvärdena här skilja som högst 0,5 mm från ansatt värde. För att korrigera beräkningarna för detta mätfel så har presenterad elasticitetsmodul utgått från den sista deformationsavläsningen på respektive skiva. Detta skulle innebära att mätfelet bara skulle ha 2 % betydelse på elasticitetsmodulen, vilket här anses vara försumbart. Vid mätningarna för de dynamiska testerna avlästes mätarna med en precision på 0,1 millimeter, vilket gör att detta också anses som en försumbar orsak till spridningen mellan grupperna.

Trots att det är korrigerat efter kontrollen har grupperna fortfarande en förhållandevis stor spridning. Det anses dock vara högst osannolikt att de inbördes värdena skulle vara så jämna men att medelvärdet för respektive grupp skiljer sig så mycket.

Efter genomförda korrigeringar kvarstår en spridning mellan medelvärdena på 11 %, vilken fortfarande anses vara för stor. Detta för att det verkar vara ett systematiskt fel mellan de olika testerna som kan bero på testutrustningen. Trots att en kontroll utförts på domkraften anser författarna av denna rapport att det är störst sannolikhet att det är hos domkraften som det systematiska felet ligger. Alltså anses det vara större friktionsförluster än 13 % på systemet och att den uppmätta lasten bör minskas med ytterligare 11 %. Resultaten från den dynamiska testuppställningen anses ha mindre sannolikhet för fel och av denna anledning kommer fortsatta beräkningar i denna rapport utgå från att felet ligger hos domkraften och korrigera lasten med en faktor 22 % för att medelvärdet av Elasticitetsmodulen ska bli samma i båda testgrupperna.

Det som önskas beräknas vid de statiska testerna är elasticitetsmodulen samt böjhållfastheten f_{md}. Styvheten, som behövs för att beräkna elasticitetsmodulen beräknas med ekvation (2.29).

$$R(u) = k \cdot u \tag{2.29}$$

Sedan beräknas elasticitetsmodulen med ekvation (2.18), som är ekvationen som definierar styvheten med hänsyn till böjning.

$$k_b = \frac{48 \cdot EI}{l^3} \tag{2.18}$$

Den justerade lasten med hänsyn till friktionsförluster beräknas sedan enligt

$$F_{just} = \alpha \cdot F \tag{4.1}$$

Där α är korrigeringsfaktorn för skillnaderna i elasticitetsmodul mellan testgrupperna och beräknas enligt

$$\alpha = \frac{E_{medel,dyn}}{E_{medel,sta}} \tag{4.2}$$

Slutligen beräknas böjhållfastheten som spänningen vid brott med ekvation (3.9) och (3.11) enligt

$$\sigma = \frac{M}{W} \tag{3.9}$$

$$M = \frac{F_{just} \cdot l}{4} \tag{3.11}$$

Resultaten från de fem skivorna presenteras i tabellerna nedan, där lasterna korrigerats för friktionsförluster på 22 %. Dessa statiska tester genomfördes i samband med försöksomgång 2 och fem skivor testades.

Tabell 4.9 Sammanställning av resultat för statiska försök för skiva 1.

Försöksnr.	Tryck [bar]	Last [N]	Medeldef. [mm]	E-modul [MPa]	Spänning [MPa]
1.1	13,7	3 900	5,0	10 000	2,8
1.2	23,0	6 500	11,7	7 200	4,6
1.3	41,2	11 600	18,5	8 100	8,3
1.4	54,9	15 500	24,8	8 100	11,1
1.5	125,0	35 200	-	-	25,2

Vid försök på skiva 1 användes en mindre lastspridningsplatta än vid försök på skiva 2–5. Denna mindre platta gjorde att ett mer lokalt brott skedde kring plattan hos skiva 1. Vid försöksutförande på skiva 2–5 användes en stålbalk för att sprida lasten över hela bredden hos skivorna. Det lokala brottet som skedde på skiva 1 kan relateras till den lastkapacitet på cirka 40 kN som skivan hade och som var den skiva som uppvisade lägst lastkapacitet.

Tabell 4.10 Sammanställning av resultat för statiska försök för skiva 2.

Försöksnr.	Tryck [bar]	Last [N]	Medeldef. [mm]	E-modul [MPa]	Spänning [MPa]
2.1	13,0	3 700	5,5	8 600	2,6
2.2	28,0	7 900	13,5	7 600	5,6
2.3	40,0	11 300	17,5	8 300	8,1
2.4	55,0	15 500	24,5	8 200	11,1
2.5	170,0	47 900	-	-	34,2

Tabell 4.11 Sammanställning av resultat för statiska försök för skiva 3.

Försöksnr.	Tryck [bar]	Last [N]	Medeldef. [mm]	E-modul [MPa]	Spänning [MPa]
3.1	12,8	3 600	7,0	6 700	2,6
3.2	26,0	7 300	12,0	7 900	5,2
3.3	40,0	11 300	17,5	8 300	8,1
3.4	55,0	15 500	24,5	8 200	11,1
3.5	145,0	40 900	-	-	29,2

Tabell 4.12 Sammanställning av resultat för statiska försök för skiva 4.

Försöksnr.	Tryck [bar]	Last [N]	Medeldef. [mm]	E-modul [MPa]	Spänning [MPa]
4.1	13,0	3 700	4,5	10 500	2,6
4.2	27,0	7 600	10,5	9 400	5,4
4.3	40,0	11 300	16,5	8 800	8,1
4.4	55,0	15 500	23,5	8 500	11,1
4.5	182,0	51 300	-	-	36,6

Tabell 4.13 Sammanställning av resultat för statiska försök för skiva 5.

Försöksnr.	Tryck [bar]	Last [N]	Medeldef. [mm]	E-modul [MPa]	Spänning [MPa]
5.1	13,0	3 700	6,0	7 900	2,6
5.2	27,0	7 600	13,0	7 600	5,4
5.3	40,0	11 300	19,0	7 700	8,1
5.4	55,0	15 500	26,0	7 800	11,1
5.5	130,0	36 600	-	-	26,2

Medelvärdet av elasticitetsmodulen för skivorna är 8 200 MPa. Medelvärdet av spänningen vid brott är 30,4 MPa. Detta medelvärde kommer att användas som ingångsvärde för skivornas hållfasthet i den beräkningsgång som är framtagen. Denna böjhållfasthet för skivorna kommer att jämföras mot de beräknade spänningarna vid de dynamiska testerna och kommer ligga till grund för framtagning av DIF_f.

4.3.5 Beräkningsgång

Vid beräkningar i detta avsnitt har antagande om plastiskt stöt gjorts. Modellering av en plastisk stöt vid stötbelastning av betongbalkar med en stålvikt ger en representativ fysikalisk beskrivning av vad som inträffar (Loven & Svavarsdottir, 2016). Av denna anledning utreder denna rapport endast plastisk stöt då en sandsäcks egenskaper kontra stålets egenskaper gör att detta antagande hamnar på konservativ sida i beräkningarna (Johansson, Personlig kommunikation. Norconsult AB., 2017). Skivan med b = 1,2 m bedöms approximativt kunna beaktas som en balk i här utförda beräkningar.

Det yttre arbetet som fallvikten utsätter träskivan för beräknas med hjälp av ekvationen för potentiell energi enlig

$$W_y = m \cdot g \cdot h \tag{4.3}$$

Med antagande om plastisk stöt reduceras det yttre arbetet enligt

$$W_{y,red} = W_y \cdot \frac{m_1}{m_1 + m_2} \tag{4.4}$$

där m_1 är massan hos stötkroppen och m_2 är den effektiva massan för balken och beräknas enligt ekvation (2.22) och (2.23).

Resulterande elastisk utböjning, u_{el}, i träbalken efter stöten från fallvikten beräknas i enighet med ekvation (2.47) enligt

$$u_{el} = \sqrt{2 \cdot \frac{W_{y,red}}{k_{tot}}} \tag{4.5}$$

där k_{tot} är den totala styvheten för balken och beräknas enligt ekvation (2.21). Den ekvivalenta statiska lasten, Q, från lastfallet med en dynamisk stöt beräknas då i enighet med ekvation (2.35) till

$$Q = k_{tot} \cdot u_{el} \tag{4.6}$$

För att beräkna lastkapaciteten hos träskivan med hänsyn till böjning används momentkapaciteten, M_{Rd}, vilken för ett trätvärsnitt kan beräknas som

$$M_{Rd} = f_{m,d} \cdot W \tag{4.7}$$

där $f_{m,d}$ representerar materialets dimensionerande böjhållfasthet och W är balkens böjmotstånd, vilket för ett rektangulärt tvärsnitt beräknas enligt ekvation (3.10). I denna rapport representeras $f_{m,d}$ som ett medelvärde och inte som en 5%-fraktil. Genom momentkapaciteten, M_{Rd}, kan lastkapaciteten, R_{Rd}, för en fritt upplagd balk på två stöd med en punktlast i fältmitt beräknas som

$$R_{Rd} = \frac{4 \cdot M_{Rd}}{l} \tag{4.8}$$

R_{Rd} motsvarar alltså den totala maximala lasten som balken kan klara av från en punktlast med hänsyn till böjning. För att kontrollera om balken klarar stöten från den dynamiska lasten jämförs den beräknade ekvivalenta statiska lasten, Q, och lastkapaciteten, R_{Rd}, enligt

$$\eta_R = \frac{Q}{R_{Rd}} \tag{4.9}$$

Om η_R <1,0 ska balken klara av stöten utan att gå till brott.

Den ekvivalenta böjspänningen, $f_{m,ekv}$, hos träbalken beräknas med hjälp av den uppmätta deformationen, u_{max}, enligt

$$f_{m,ekv} = \frac{R_{ekv} \cdot l}{4 \cdot W} = \frac{k_{tot} \cdot u_{max} \cdot l}{4 \cdot W} \tag{4.10}$$

där R_{ekv} är den ekvivalenta inre motståndskraften hos träskivan med härledning av uppmätt deformation och definieras av ekvation (2.29). Denna böjhållfasthet jämförs sedan med balkens dimensionerade böjhållfasthet, $f_{m,d}$, enligt

$$\eta_f = \frac{f_{m,ekv}}{f_{m,d}} \tag{4.11}$$

På samma sätt ställs den uppmätta medeldeformationen i fältmitt, u_{max}, mot den beräknade elastiska deformationen, u_{el}, enligt

$$\eta_u = \frac{u_{max}}{u_{el}} \tag{4.12}$$

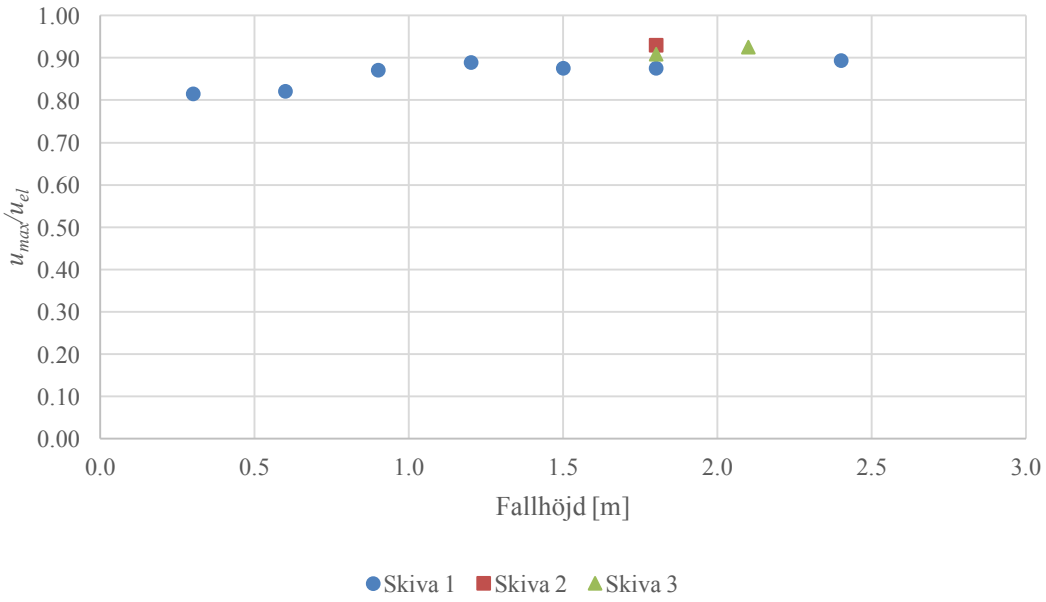
För exempelräkning av en träskiva, se Bilaga A.

4.3.6 Resultat av deformationsberäkningar

Efter beräkning av förväntad elastisk deformation för respektive försök enligt given beräkningsgång i avsnitt 4.3.5 kan dessa jämföras med de uppmätta deformationerna vid försöken, enligt ekvation (4.12). En sammanställning av dessa resultat för första försöksomgången presenteras i Tabell 4.14.

Tabell 4.14 Sammanställning av beräknad förväntad elastisk deformation samt uppmätt medeldeformation i fältmitt vid försöksomgång 1.

Försöksnr.	Fallhöjd [m]	Medeldeformation i fältmitt u_{max} [m]	Beräknad deformation u_{el} [m]	Kvot u_{max}/u_{el}
1.1	0,3	0,029	0,036	0,81
1.2	0,6	0,041	0,050	0,82
1.3	0,9	0,054	0,062	0,87
1.4	1,2	0,063	0,071	0,89
1.5	1,5	0,070	0,080	0,87
1.6	1,8	0,076	0,087	0,88
1.7	2,4	0,090	0,101	0,89
2.1	1,8	0,089	0,096	0,93
2.2	2,4	-	0,111	-
3.1	1,8	0,084	0,093	0,91
3.2	2,1	0,093	0,100	0,92
3.3	2,4	-	0,107	-



Figur 4.17 Jämförelse mellan beräknad och uppmätt deformation vid försöksomgång 1.

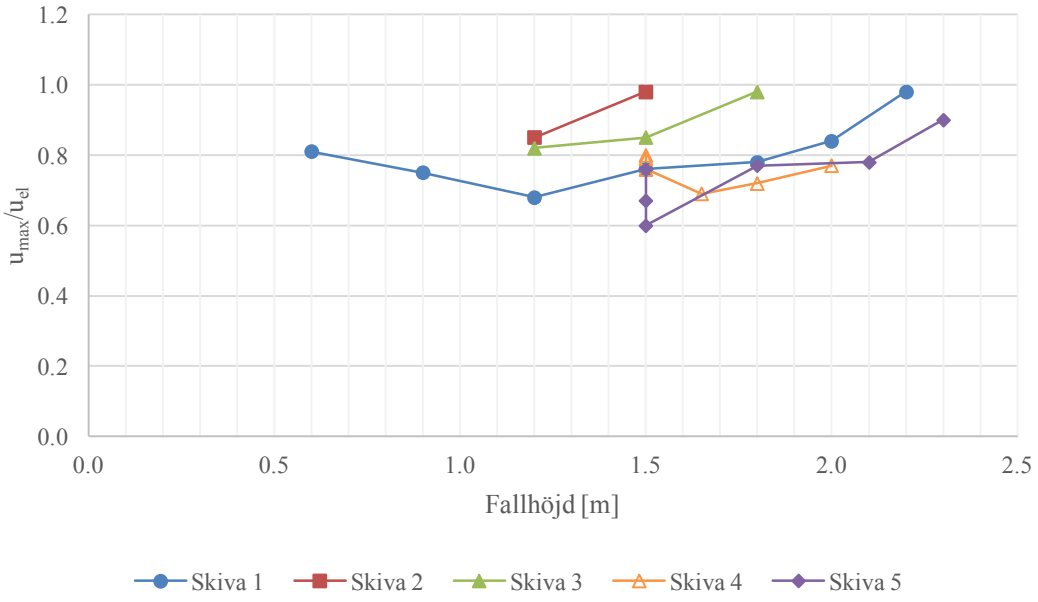
Resultaten som framgår i Figur 4.17 och Tabell 4.14 visar att deformationerna uppmätta i försök är lägre än de beräknade deformationerna, kvot ≤ 1,00. Detta innebär att materialet varit styvare än vad som antagits i beräkningen. Figur 4.17 illustrerar även att mätdata från försöksomgång 1 har liten spridning.

Förväntad elastisk deformation beräknades och jämfördes på samma sätt för skivorna som undersöktes i försöksomgång 2. En sammanställning av dessa resultat presenteras i Tabell 4.15. I Figur 4.18 presenteras också resultaten grafiskt där förhållandet mellan u_{max} och u_{el} visas i förhållande till fallhöjden.

Tabell 4.15 Sammanställning av beräknad förväntad elastisk deformation samt uppmätt medeldeformation i fältmitt vid försöksomgång 2.

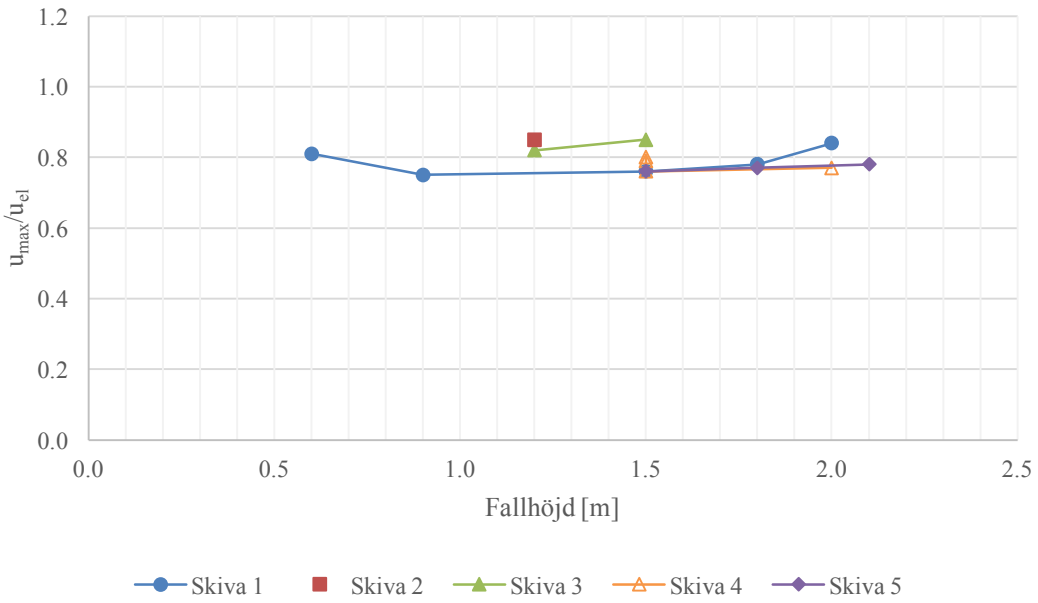
Försöksnr.	Fallhöjd [m]	Medeldeformation i fältmitt u_{max} [m]	Beräknad deformation u_{el} [m]	Kvot u_{max}/u_{el}
1.1	0,6	0,045	0,055	0,81
1.2	0,9	0,051	0,068	0,75
1.3[A]	1,2	0,053	0,078	0,68
1.4	1,5	0,067	0,088	0,76
1.5	1,8	0,075	0,096	0,78
1.6	2,0	0,085	0,101	0,84
1.7[A]	2,2	0,104	0,106	0,98
2.1	1,2	0,066	0,078	0,85
2.2[A]	1,5	0,086	0,087	0,98
3.1	1,2	0,065	0,078	0,82
3.2	1,5	0,074	0,087	0,85
3.3[A]	1,8	0,094	0,096	0,98
4.1	1,5	0,072	0,089	0,80
4.2	1,5	0,071	0,089	0,79
4.3	1,5	0,068	0,089	0,76
4.4[A]	1,65	0,065	0,094	0,69
4.5[A]	1,8	0,071	0,098	0,72
4.6	2,0	0,080	0,103	0,77
4.7[A]	2,2	-	0,108	-
5.1	1,5	0,065	0,085	0,76
5.2[A]	1,5	0,057	0,085	0,67
5.3[A]	1,5	0,051	0,085	0,60
5.4	1,8	0,072	0,093	0,77
5.5	2,1	0,079	0,101	0,78
5.6[A]	2,3	0,095	0,105	0,90

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.



Figur 4.18 Jämförelse mellan beräknad och uppmätt deformation vid försöksomgång 2.

På grund av svampbeteendet som sker i säcken vid vissa stötar i försöksomgång 2, samt missvisande medelvärden vid brotthöjden, justeras grafen i Figur 4.18 där missvisande mätvärden utesluts. Se avsnitt 4.3.3 för resonemang kring uteslutning av missvisande värden samt vilka försök som uteslutits. Den nya grafen visas i Figur 4.19.



Figur 4.19 Justerad jämförelse mellan beräknad och uppmätt deformation vid försöksomgång 2.

När de missvisande värdena har uteslutits visar den nya grafen i Figur 4.19 att förhållandet mellan alla mätvärden och teoretiska förväntade värden är jämna med en kvot runt 0,8. Denna kvot önskas vara 1,0 för att teorin ska motsvara det som sker i verkligheten, en justering som undersöks vidare i kapitel 5 där den dynamiska förstoringsfaktorn för elasticitetsmodulen för de aktuella skivorna studeras.

4.3.7 Resultat av böjhållfasthetsberäkningar

Träskivorna i försöksomgång 1 har en förväntad statisk böjhållfasthet på $f_{m,sta}$ = 22,0 MPa (Jacobsson, 2017). Denna har tagits fram genom medelvärdesberäkning från Martinsons och den är således inte angiven som 5 %-fraktil. Vid dynamisk belastning kan en ekvivalent statisk inre mothållskraft, R_{ekv}, i materialet beräknas med ekvation (2.29), där u sätts till den uppmätta medeldeformationen i fältmitt, u_{max}. Genom ekvation (4.10) kan sedan en ekvivalent böjspänning vid dynamisk stöt, $f_{m,ekv}$, beräknas. I Tabell 4.16 visas en sammanställning av resultaten från dessa beräkningar.

Tabell 4.16 Sammanställning av given statisk böjhållfasthet samt beräknad ekvivalent statisk böjspänning efter försöksomgång 1.

Försöksnr.	Fallhöjd [m]	Given böjhållfashet $f_{m,sta}$ [MPa]	Beräknad ekvivalent böjspänning $f_{m,ekv}$ [MPa]	Kvot $f_{m,ekv}/f_{m,sta}$ [-]
1.1	0,3	22,0	10,8	0,49
1.2	0,6	22,0	15,4	0,70
1.3	0,9	22,0	20,1	0,91
1.4	1,2	22,0	23,7	1,08
1.5	1,5	22,0	26,0	1,18
1.6	1,8	22,0	28,5	1,30
1.7	2,4	22,0	33,6	1,53
2.1	1,8	22,0	28,9	1,31
2.2	2,4	22,0	-	-
3.1	1,8	22,0	29,2	1,33
3.2	2,1	22,0	32,1	1,46
3.3	2,4	22,0	-	-

Av Tabell 4.16 framgår att den beräknade ekvivalenta böjspänningen, som är baserad på de uppmätta deformationerna från dynamiska laster, är högre än den givna hållfastheten för träskivorna vid samtliga fallhöjder över 0,9 meter.

Vid det andra försökstillfället genomfördes först statiska tester där en genomsnittlig statisk böjhållfasthet beräknades till 30,4 MPa, se avsnitt 4.3.4. På samma sätt som för skivorna i den första försöksomgången kan en jämförelse göras med beräknad ekvivalent böjspänning vid de dynamiska försöken. I Tabell 4.17 visas en sammanställning av dessa beräkningar.

Tabell 4.17 Sammanställning av given statisk böjhållfasthet samt beräknad ekvivalent statisk böjspänning efter försöksomgång 2.

Försöksnr.	Fallhöjd [m]	Given böjhållfashet $f_{m,sta}$ [MPa]	Beräknad ekvivalent böjspänning $f_{m,ekv}$ [MPa]	Kvot $f_{m,ekv}/f_{m,sta}$
1.1	0,6	30,4	19,7	0,65
1.2	0,9	30,4	22,3	0,73
1.3[A]	1,2	30,4	23,2	0,76
1.4	1,5	30,4	29,3	0,96
1.5	1,8	30,4	32,8	1,08
1.6	2,0	30,4	37,2	1,22
1.7[A]	2,2	30,4	45,5	1,50
2.1	1,2	30,4	29,4	0,97
2.2[A]	1,5	30,4	37,9	1,25
3.1	1,2	30,4	28,3	0,93
3.2	1,5	30,4	32,6	1,07
3.3[A]	1,8	30,4	41,3	1,36
4.1	1,5	30,4	30,2	0,99
4.2	1,5	30,4	29,9	0,98
4.3	1,5	30,4	28,7	0,95
4.4[A]	1,65	30,4	27,4	0,90
4.5[A]	1,8	30,4	29,7	0,98
4.6	2,0	30,4	33,5	1,10
4.7[A]	2,2	30,4	-	-
5.1	1,5	30,4	30,2	0,99
5.2[A]	1,5	30,4	26,5	0,87
5.3[A]	1,5	30,4	23,7	0,78
5.4	1,8	30,4	33,4	1,10
5.5	2,1	30,4	36,7	1,21
5.6[A]	2,3	30,4	44,1	1,45

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

Av Tabell 4.17 framgår att försöken har en stor spridning vilket diskuteras i avsnitt 4.3.3. Exempelvis har försök 4.4 en lägre beräknad ekvivalent böjspänning än alla tidigare försök på samma skiva, trots att fallhöjden är högre.

4.3.8 Resultat av lastkapacitetsberäkningar

För att undersöka de dynamiska egenskaperna hos skivorna har den dynamiska lasten beräknats om till en ekvivalent statisk last i beräkningsgången. Denna last har sedan jämförts med lastkapaciteten hos skivorna vid statisk belastning i enlighet med ekvation (4.9). Dessa resultat, som fås genom beräkningsgången, för försöksomgång 1 redovisas i Tabell 4.18.

Tabell 4.18 Kontroll av lastkapaciteten hos testade träskivor vid dynamisk belastning vid försöksomgång 1.

Försöksnr	Ekv. statisk last Q [kN]	Lastkapacitet R_{Rd} [kN]	Kvot Q/R_{Rd} [-]	Kontroll
1.1	25,0	41,4	0,60	Ok
1.2	35,4	41,4	0,86	Ok
1.3	43,4	41,4	1,05	Ej ok
1.4	50,1	41,4	1,21	Ej ok
1.5	56,0	41,4	1,35	Ej ok
1.6	61,3	41,4	1,48	Ej ok
1.7	70,8	41,4	1,71	Ej ok[1]
2.1	54,8	38,8	1,41	Ej ok[2]
2.2	63,3	38,8	1,63	Ej ok[1]
3.1	56,6	38,8	1,46	Ej ok
3.2	61,2	38,8	1,58	Ej ok
3.3	65,4	38,8	1,68	Ej ok[1]

[1] Rejält brott
[2] Initialt brott

Att skiva 1 har högre lastkapacitet än skriva 2 och 3 beror på att dess spännvidd är kortare. Kontrollen visar att försök 1.3–1.6 samt försök 3.1–3.2 har gått över den teoretiska lastkapaciteten för den ekvivalenta statiska lasten. Vid dessa försök har dock brott inte uppstått, alltså har lastkapaciteten i praktiken varit större vilket innebär att hållfastheten har ökat.

På samma sätt har lastkapaciteten kontrollerats för resultaten i försöksomgång 2. Dessa resultat presenteras i Tabell 4.19.

Tabell 4.19 Kontroll av lastkapaciteten hos testade träskivor vid dynamisk belastning vid försöksomgång 2.

Försöksnr	Ekv. statisk last Q [kN]	Lastkapacitet R_{Rd} [kN]	Kvot Q/R_{Rd} [-]	Kontroll
1.1	34,0	42,6	0,80	Ok
1.2	41,6	42,6	0,98	Ok
1.3[A]	48,1	42,6	1,13	Ej ok
1.4	53,7	42,6	1,26	Ej ok
1.5	58,9	42,6	1,38	Ej ok
1.6	62,0	42,6	1,46	Ej ok
1.7[A]	65,1	42,6	1,53	Ej ok[1]
2.1	48,3	42,6	1,14	Ej ok
2.2[A]	54,0	42,6	1,27	Ej ok[1]
3.1	48,1	42,6	1,13	Ej ok
3.2	53,8	42,6	1,26	Ej ok
3.3[A]	58,9	42,6	1,38	Ej ok[1]
4.1	52,6	42,6	1,24	Ej ok
4.2	52,6	42,6	1,24	Ej ok
4.3	52,6	42,6	1,24	Ej ok
4.4[A]	55,2	42,6	1,30	Ej ok
4.5[A]	57,7	42,6	1,36	Ej ok
4.6	60,8	42,6	1,43	Ej ok
4.7[A]	63,8	42,6	1,50	Ej ok[1]
5.1	55,3	42,6	1,30	Ej ok
5.2[A]	55,3	42,6	1,30	Ej ok
5.3[A]	55,3	42,6	1,30	Ej ok
5.4	60,6	42,6	1,42	Ej ok
5.5	65,4	42,6	1,54	Ej ok
5.6[A]	68,5	42,6	1,61	Ej ok[1]

[1] Rejält brott

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

I försöksomgång 2 hade alla skivor samma spännvidd vilket gör att lastkapaciteten, R_{Rd}, är lika stor för alla skivor. Kontrollen visar att de flesta försök har gått över kapaciteten, med undantag för försök 1.1 och 1.2. I verkligheten är det dock endast i försök 1.7, 2.2, 3.3, 4.7 samt 5.6 som brott initierades. Övriga försök bör alltså ha en kvot som är lägre 1,00 och vara godkända, eftersom brott inte uppstått. Återigen har alltså böjspänningen varit högre i praktiken än i teorin och hur det kan korrigeras för detta i beräkningsgången undersöks i kapitel 5.

5 Framtagning av DIF för standardförsök

5.1 Orientering

Det framgår av tidigare presenterade resultat att trä uppträder styvare och mer hållfast vid snabb belastning. Huvudfaktorerna som påverkar detta är belastningshastighet samt töjningshastighet. Detta kapitel syftar till att ta fram ett siffervärde på den dynamiska förstoringsfaktorn för styvhet, DIF_E, respektive hållfasthet, DIF_f, genom att modellera stöten, ta fram en töjningshastighet samt jämföra med försök och litteratur.

5.2 Framtagning av töjningshastighet

5.2.1 Orientering

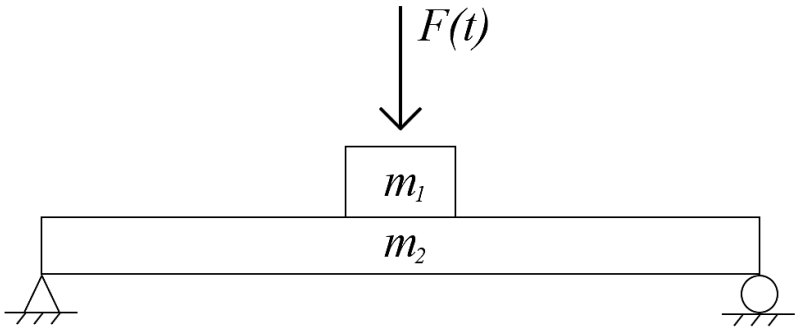
För att kunna beräkna töjningshastigheten har tiden till maximal spänning beräknats med ett enfrihetsgradssystem, SDOF. Vid modellering av ett enfrihetsgradssystem sker omvandlingen till ett massa-fjädersystem enligt avsnitt 2.6. För att modellera responsen hos skivan antas att en impulslast inträffar. Dessa SDOF-beräkningar jämförs sedan med tidigare beräkningar med ett tvåfrihetsgradssystem utförda av Norconsult AB.

5.2.2 Enfrihetsgradsmodellering

Vid modellering av Martinsons lastfall som ett enfrihetsgradssystem illustreras den fallande kroppen istället som en tidsberoende kraft. Eftersom antagande om plastisk stöt görs kommer kropp 1, stötkroppen, och kropp 2, väggelementet, förflyttas med gemensam hastighet och riktning precis efter stötögonblicket. När systemet sedan transformeras till ett massa-fjädersystem ses den totala massan hos systemet som massan hos kropp 1 plus massan hos kropp 2. Detta innebär att konstruktionen kommer få andra dynamiska egenskaper jämfört med om endast massan hos kropp 2 hade beaktats. Konstruktionen kommer få en förändrad egenvinkelfrekvens på grund av detta tillskott av massa. Den förändrade egenvinkelfrekvensen beräknas enligt

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_1 + m_2}} \tag{5.1}$$

där m_2 är effektiv massa hos balken. Figur 5.1 illustrerar hur massorna m_1 och m_2 ses som en gemensam massa samt hur konstruktionen sedan påverkas av en yttre tidsberoende kraft.



Figur 5.1 Schematisk försöksuppställning av kropp 1 och kropp 2 vid enfrihetsgradsmodellering.

För att kunna beskriva responsen matematiskt antas att belastningstiden är kortare än *T/4* och beaktas då som en impulslast likt tidigare beskrivet. Den tidsberoende deformationen beräknas sedan enligt

$$u(t) = \frac{\int_{t_0}^{t} F(t)dt}{m_{tot} \cdot \omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \tag{5.2}$$

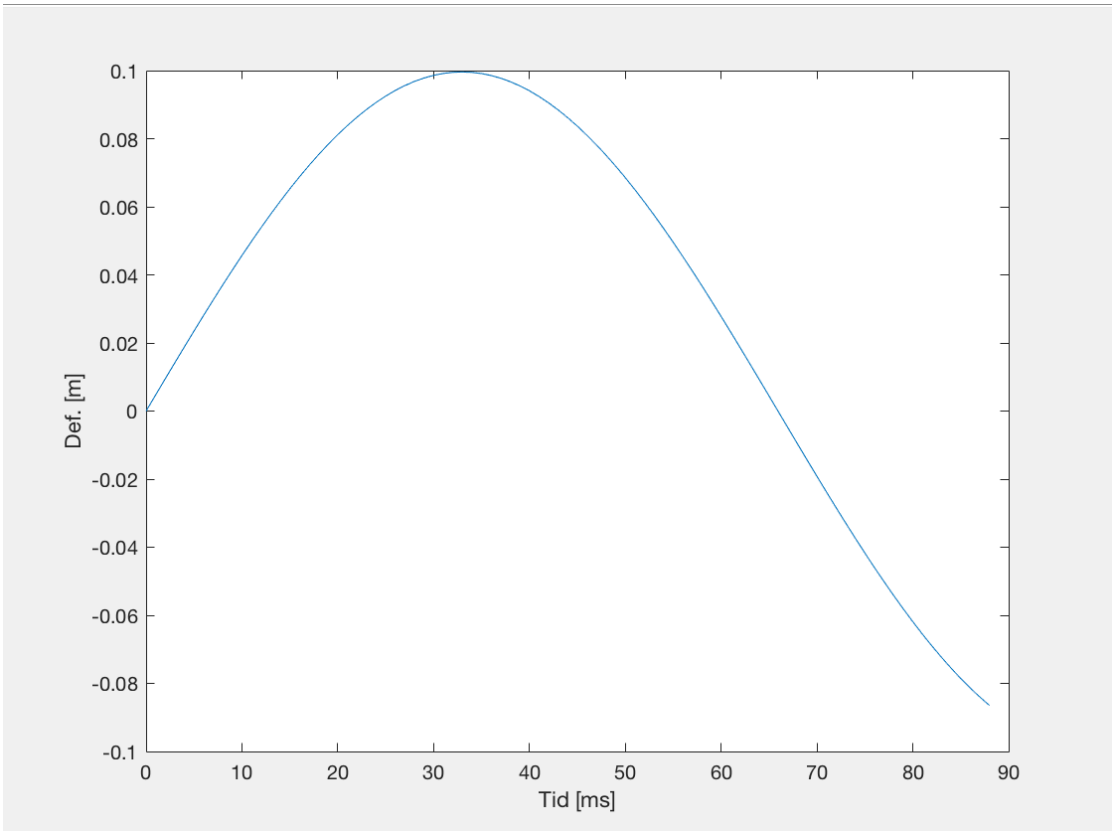
där m_{tot} är den gemensamma massan av kropp 1 och kropp 2, ω är egenvinkelfrekvensen enligt ekvation (5.1) och integralen av kraft-tidssambandet är impulsen enligt ekvation (2.11).

$$I = \int_{t_0}^{t} F(t)dt \tag{2.11}$$

Storleken av impulsen kan vid en stötlast beräknas enligt ekvation (2.12).

$$I = m \cdot v \tag{2.12}$$

Där m är massan hos kropp 1 och v är hastigheten hos kropp 1 precis före stötögonblicket. Vid närmare analys av ekvation (5.2) framgår det att responsen beror på egenvinkelfrekvensen, ω, hos konstruktionen. Den första termen i ekvation (5.2) före sinusfunktionen är en konstant och det som kommer förändras med tiden är storleken på sinusfunktionen. Responsen hos konstruktionen kommer därför att representeras av en sinuskurva. Sinusfunktionen beror av egenvinkelfrekvensen, ω, multiplicerat med tiden, t, vilket innebär att responsen beror av egenvinkelfrekvensen. Det innebär att deformationen hos konstruktionen beror av materialets styvhetsegenskaper och massa, se ekvation (5.1). Denna metod är förenklad eftersom kropp 1 ersätts med en tidsberoende kraft som utgår från att en plastisk stöt har inträffat. Responsen hos kropp 2 illustreras i Figur 5.2 vid försök 3.2. Detta går dock inte att styrka från testresultaten då mätutrustningen inte registrerat något deformation-tidssamband.



Figur 5.2 *Respons hos kropp 2 efter stöt vid försök 3.2 i försöksomgång 1 med enfrihetsgradsmodellering.*

Beräknad deformation för försök 3.2 vid försöksomgång 1 var 0,10 m enligt beräkningsgång presenterad i avsnitt 4.3.5, samma värde har fåtts vid denna analys. Den analys som är utförd i detta kapitel är utförd med hjälp av Matlab och fullständig kod presenteras i Bilaga D. Maximal deformationen inträffar vid tiden 33,0 ms, dvs exakt *T/4* då responsen vid denna metod är helt beroende av egenvinkelfrekvensen, vilken hör ihop med egenperiodtiden, *T*. Tiden fram till maxdeformation kan även benämnas som tiden till maximal spänning. Responsen hos konstruktionen kommer alltså ha samma tid till maxspänning, 33,0 ms, medan amplituden av deformationerna kommer variera vid de olika stötlasterna. Eftersom töjningen beror på deformationerna hos konstruktionen enligt

$$\varepsilon_{max} = \frac{k \cdot u \cdot l}{4 \cdot W \cdot E} \tag{3.12}$$

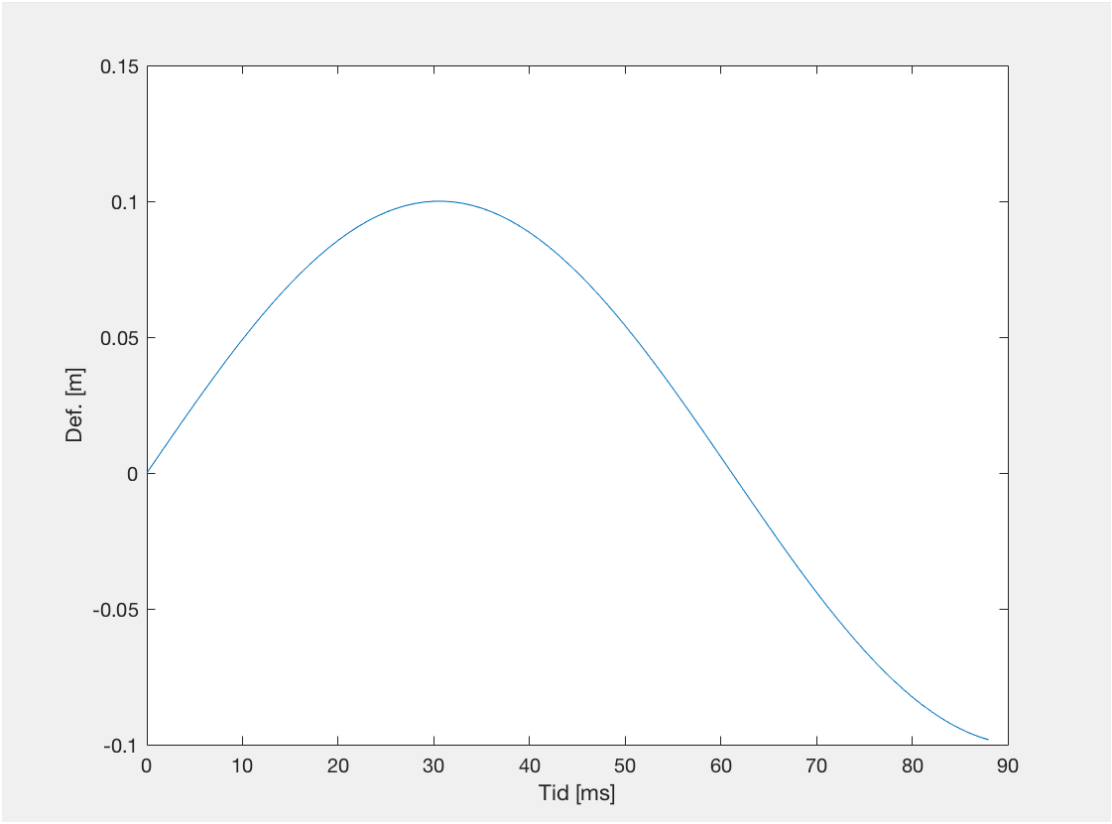
kommer även töjningshastigheterna variera mellan de olika försöken. Detta för att töjningshastighet beräknas enligt

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{max}}{\Delta t} \tag{3.13}$$

där *Δt* kommer vara konstant på 33,0 ms medan töjningen kommer variera.

Vid samma typ av modellering av försök 5.5 vid försökstillfälle 2 så blir det en annan tid till maxspänning. Eftersom skivorna vid försök 2 var 70 mm tjocka jämfört med 84 mm vid försökstillfälle 1 så ändras massan och tröghetsmomentet hos skivorna. Detta ger en förändrad respons med en kortare tid till maxspänning på grund av

minskad massa samt minskat tröghetsmoment. Skivorna vid försöksomgång 2 hade en högre elasticitetsmodul jämfört med vid de skivor som användes vid den första försöksomgången, detta är något som även påverkar responsen till att bli kortare. Responsen hos kropp 2 efter stöt illustreras i Figur 5.3



Figur 5.3 *Respons hos kropp 2 efter stöt vid försök 5.5 i försöksomgång 2 med enfrihetsgradsmodellering.*

Tiden till maxspänning vid försöksomgång 2 är beräknad till 30,7 ms och maxdeformation vid försök 5.5 är 0,10 m. Vid jämförelse mellan de olika försöksomgångarna så är responsen väldigt lik. Det skiljer cirka 2 ms i tid till maxspänning mellan de olika försöken.

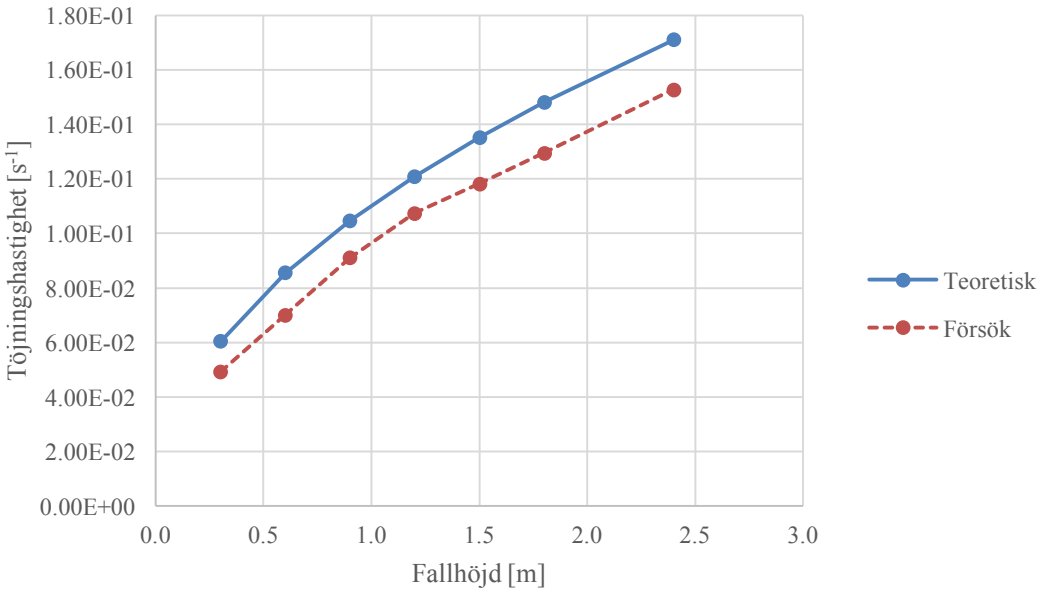
5.2.3 Resultat

Vid framtagning av töjningshastigheter i denna rapport har töjningshastigheter beräknats både baserat på de teoretiska deformationerna och på försöks-deformationerna. Vid båda töjningshastighetsberäkningarna har samma tid till maxspänning använts; 33,0 ms vid försöksomgång 1 och 30,7 ms vid försöksomgång 2, som är framtagen med SDOF-analysen beskriven i tidigare avsnitt. Töjningshastigheterna är sedan beräknade med den teoretiska deformationen respektive den faktiska deformationen vid försöken. Resultatet av töjningshastighetsberäkningarna vid försöksomgång 1 redovisas i Tabell 5.1. Den högsta töjningshastighet som beräknats för försöksomgång 1 där skivan inte går till brott är $1{,}49 \cdot 10^{-1}$ s^{-1}, vilket motsvarar en fallhöjd på 2,1 meter.

Tabell 5.1 *Sammanställning av beräknade töjningshastigheter vid försöksomgång 1.*

Försöksnr.	Fallhöjd [m]	Teoretisk töjningshastighet [s^{-1}]	Töjningshastighet vid försök [s^{-1}]
1.1	0,3	$6{,}04 \cdot 10^{-2}$	$4{,}92 \cdot 10^{-2}$
1.2	0,6	$8{,}55 \cdot 10^{-2}$	$7{,}01 \cdot 10^{-2}$
1.3	0,9	$1{,}05 \cdot 10^{-1}$	$9{,}11 \cdot 10^{-2}$
1.4	1,2	$1{,}21 \cdot 10^{-1}$	$1{,}07 \cdot 10^{-1}$
1.5	1,5	$1{,}35 \cdot 10^{-1}$	$1{,}18 \cdot 10^{-1}$
1.6	1,8	$1{,}48 \cdot 10^{-1}$	$1{,}30 \cdot 10^{-1}$
1.7	2,4	$1{,}71 \cdot 10^{-1}$	$1{,}53 \cdot 10^{-1}$
2.1	1,8	$1{,}43 \cdot 10^{-1}$	$1{,}33 \cdot 10^{-1}$
2.2	2,4	$1{,}65 \cdot 10^{-1}$	-
3.1	1,8	$1{,}38 \cdot 10^{-1}$	$1{,}26 \cdot 10^{-1}$
3.2	2,1	$1{,}49 \cdot 10^{-1}$	$1{,}38 \cdot 10^{-1}$
3.3	2,4	$1{,}60 \cdot 10^{-1}$	-

Vid analys av resultatet går det att påvisa att liknande värden uppnås vid båda beräkningarna. Det blir tydligt att de teoretisk beräknade deformationerna är större än de uppmätta, då denna töjningshastighet är konstant större. För att påvisa hur töjningshastigheten varierar med fallhöjden i teorin och vid försök, illustreras detta i Figur 5.4.



Figur 5.4 *Teoretiskt beräknade töjningshastigheter samt töjningshastigheter vid försök för skiva 1.*

Det är förväntat att den teoretiska grafen ska uppvisa en ”roten ur”-trend, något som går att se i Figur 5.4. Detta är för att deformationen beräknas enligt

$$u_{el} = \sqrt{2 \cdot \frac{W_{y,red}}{k_{tot}}} \tag{4.5}$$

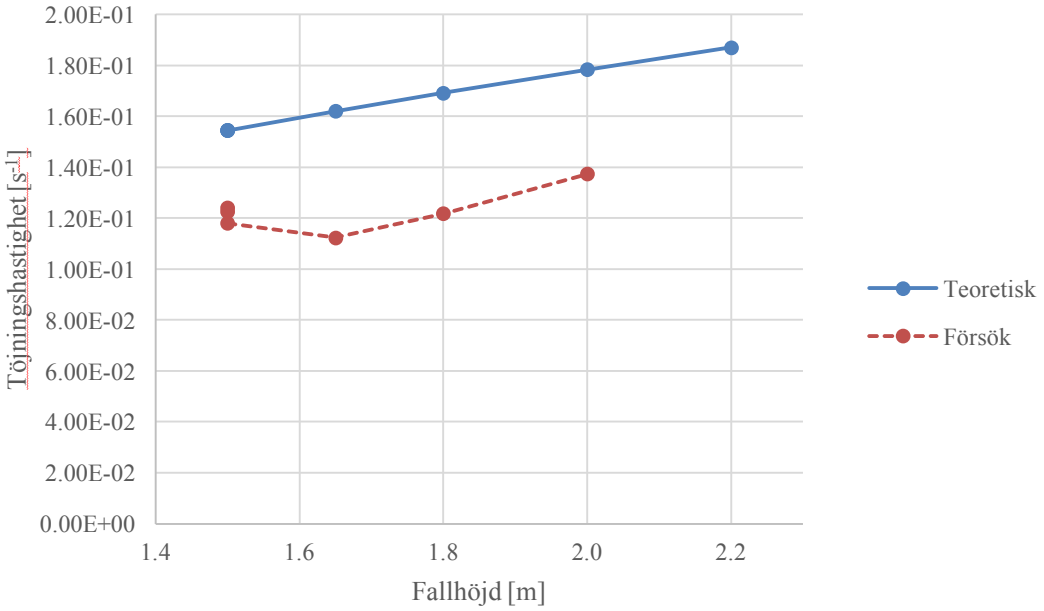
där deformationerna endast beror på roten ur fallhöjden. Det går att antyda att töjningshastigheterna beräknade genom deformationerna uppmätta vid försöket har en liknande trend då graferna följs åt.

Tabell 5.2 Sammanställning av beräknade töjningshastigheter vid försöksomgång 2.

Försöksnr.	Fallhöjd [m]	Teoretisk töjningshastighet [s^{-1}]	Töjningshastighet vid försök [s^{-1}]
1.1	0,6	$9{,}58 \cdot 10^{-2}$	$7{,}78 \cdot 10^{-2}$
1.2	0,9	$1{,}17 \cdot 10^{-1}$	$8{,}81 \cdot 10^{-2}$
1.3[A]	1,2	$1{,}36 \cdot 10^{-1}$	$9{,}16 \cdot 10^{-2}$
1.4	1,5	$1{,}52 \cdot 10^{-1}$	$1{,}16 \cdot 10^{-1}$
1.5	1,8	$1{,}66 \cdot 10^{-1}$	$1{,}30 \cdot 10^{-1}$
1.6	2,0	$1{,}75 \cdot 10^{-1}$	$1{,}47 \cdot 10^{-1}$
1.7[A]	2,2	$1{,}84 \cdot 10^{-1}$	$1{,}80 \cdot 10^{-1}$
2.1	1,2	$1{,}35 \cdot 10^{-1}$	$1{,}15 \cdot 10^{-1}$
2.2[A]	1,5	$1{,}50 \cdot 10^{-1}$	$1{,}48 \cdot 10^{-1}$
3.1	1,2	$1{,}35 \cdot 10^{-1}$	$1{,}11 \cdot 10^{-1}$
3.2	1,5	$1{,}51 \cdot 10^{-1}$	$1{,}28 \cdot 10^{-1}$
3.3[A]	1,8	$1{,}66 \cdot 10^{-1}$	$1{,}62 \cdot 10^{-1}$
4.1	1,5	$1{,}54 \cdot 10^{-1}$	$1{,}24 \cdot 10^{-1}$
4.2	1,5	$1{,}54 \cdot 10^{-1}$	$1{,}23 \cdot 10^{-1}$
4.3	1,5	$1{,}54 \cdot 10^{-1}$	$1{,}18 \cdot 10^{-1}$
4.4[A]	1,65	$1{,}62 \cdot 10^{-1}$	$1{,}12 \cdot 10^{-1}$
4.5[A]	1,8	$1{,}69 \cdot 10^{-1}$	$1{,}22 \cdot 10^{-1}$
4.6	2,0	$1{,}78 \cdot 10^{-1}$	$1{,}37 \cdot 10^{-1}$
4.7[A]	2,2	$1{,}87 \cdot 10^{-1}$	-
5.1	1,5	$1{,}47 \cdot 10^{-1}$	$1{,}12 \cdot 10^{-1}$
5.2[A]	1,5	$1{,}47 \cdot 10^{-1}$	$9{,}85 \cdot 10^{-2}$
5.3[A]	1,5	$1{,}47 \cdot 10^{-1}$	$8{,}81 \cdot 10^{-2}$
5.4	1,8	$1{,}61 \cdot 10^{-1}$	$1{,}24 \cdot 10^{-1}$
5.5	2,1	$1{,}74 \cdot 10^{-1}$	$1{,}37 \cdot 10^{-1}$
5.6[A]	2,3	$1{,}82 \cdot 10^{-1}$	$1{,}64 \cdot 10^{-1}$

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

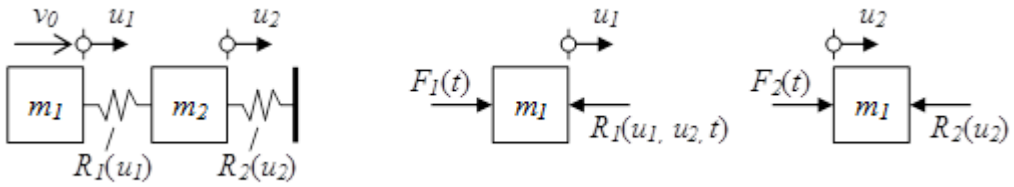
Töjningshastigheterna vid försöksomgång 2 liknar de beräknade töjningshastigheterna från försök 1, se Tabell 5.2. Det är framförallt när ”svampbeteende” hos stötsäcken har inträffat som töjningshastigheten skiljer sig från förväntat, se avsnitt 4.3.3. Detta uppmärksammades bland annat vid några försök på skiva 4. Detta går att se i Figur 5.5 hur den beräknade töjningshastigheten från försöksdata skiljer sig från den teoretisk beräknade töjningshastigheten. Högsta teoretiskt beräknade töjningshastighet där skivan inte går till brott i försöksomgång 2 är $1{,}78 \cdot 10^{-1}$ s^{-1} vid en fallhöjd på 2,0 m för skiva 4.



Figur 5.5 Beräknade töjningshastigheter för skiva 4 vid försöksomgång 2.

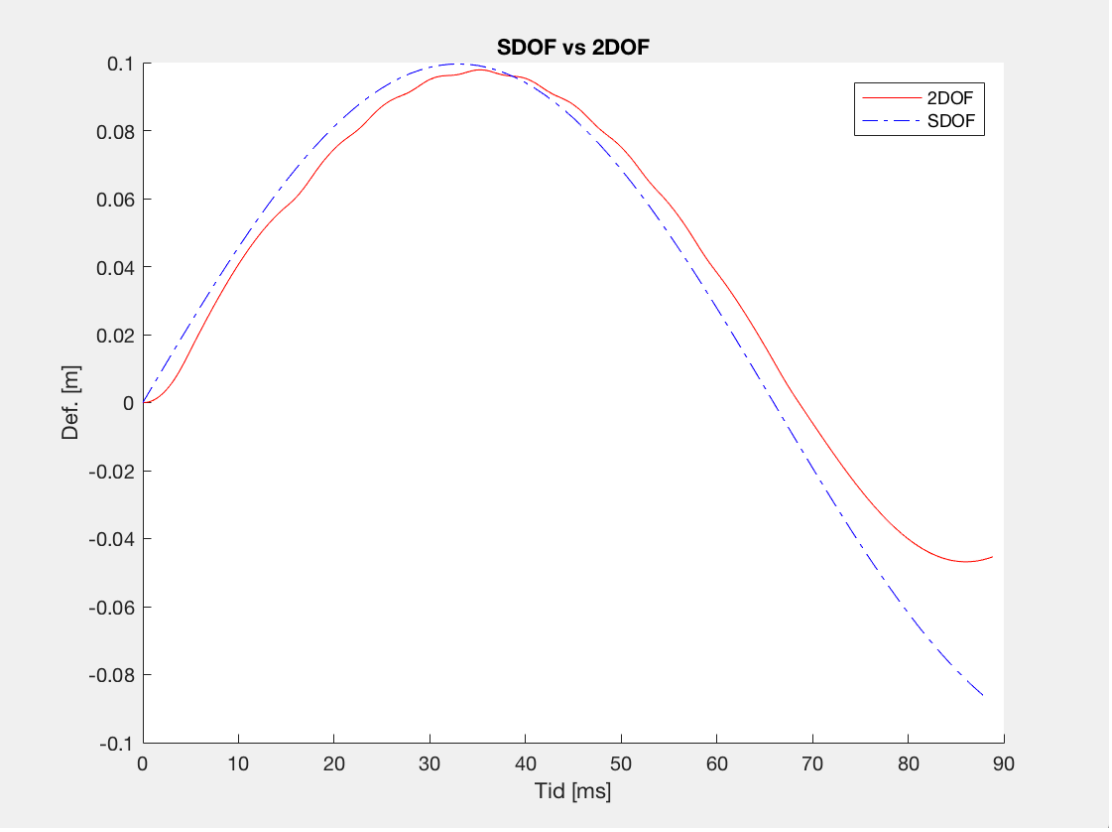
5.2.4 Jämförelse med tvåfrihetsgradsmodellering

Norconsult AB har tagit fram en mer avancerad modell för att modellera responsen vid försöket. De har använts sig av ett tvåfrihetsgraderssystem, 2DOF, se Figur 5.6, då kropp 1 och kropp 2 är skilda från varandra och kropp 1 har en ingående hastighet, v_0, som sedan resulterar i deformationer i kropp 2. Vid 2DOF analys så har ett antagande om styvheten hos kropp 1 gjorts. Denna illustreras som fjädern mellan kropp 1 och kropp 2 i Figur 5.6. En hög styvhet har antagits för att få en arbetskurva som liknar den som uppstår vid en plastisk stöt.



Figur 5.6 Tvåfrihetsgradsystem.

Vid jämförande av en SDOF-modell med den 2DOF-modell som är utformad och beräknad utav Norconsult AB fås väldigt lika resultat på tid till maxspänning. Det skiljer cirka 1 ms i tid till maxdeformationen hos de olika modellerna och cirka 1 mm i deformation. Detta illustreras i Figur 5.7.

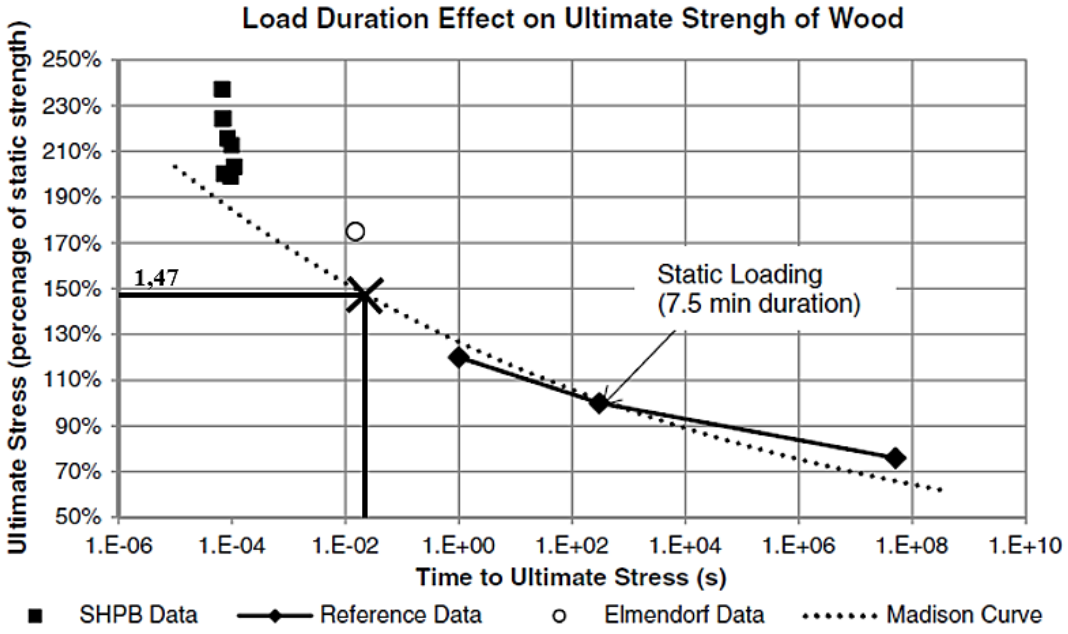


Figur 5.7 *Respons hos ett enfrihetsgradsystem jämfört med tvåfrihetsgrads-system vid försöksomgång 1.*

5.3 Jämförelser

5.3.1 Madisonkurvan

Det beräknade tiden till maximal spänning, som togs fram i avsnitt 5.2.2, kan sedan sättas in i Madisonkurvan. Tiden till maximal spänning beräknades till 0,033 s respektive 0,031 s. Vid insättning i Madisonkurvan ger det en dynamisk förstoringsfaktor på 1,47, se Figur 5.8.



Figur 5.8 *Madisonkurvan med insatt beräknat värde för tiden till maximal spänning som resulterar i en dynamisk förstoringsfaktor. Grafen, utan inritat värde, kommer ursprungligen från (Gilbertsson & Bulleit, 2013).*

5.3.2 Eurocode 5

I avsnitt 3.1.6 presenteras hur Eurocode 5 tar hänsyn till lastvaraktighet och fukt, vilket har en inverkan på hållfastheten genom en faktor k_{mod} enligt ekvation (3.2). De skivor som undersöktes i försöksomgång 1 hade en fuktkvot på 16 %. Detta innebär att de enligt Eurocode 5 ingår i klimatklass 2 (SIS, Swedish Standards Institute, 2004). I försöksomgång 2 hade skivorna en fuktkvot på 11 %, vilket innebär att dessa skivor klassificeras till klimatklass 1. Klimatklass 1 och 2 har dock samma värden för den sammanvägda faktorn k_{mod}, se Tabell 3.2. Skivorna utsätts för en olyckslast vilket i Eurocode benämns som en momentan last, se Tabell 3.1, vilket enligt Tabell 3.2 ger k_{mod} = 1,10. Om lasten istället verkat under lång, medellång eller kort tid under samma fuktförhållanden hade k_{mod} istället satts till $k_{mod,lång}$ = 0,70, $k_{mod,medellång}$ = 0,80 samt $k_{mod,kort}$ = 0,90. För att undersöka hur mycket den dimensionerade hållfastheten ökar vid momentan belastning jämfört med lång, medellång eller kort belastning kan kvoten mellan dem ställas upp som

$$\frac{k_{mod,momentan}}{k_{mod,lång}} = \frac{1{,}10}{0{,}70} = 1{,}57$$

$$\frac{k_{mod,momentan}}{k_{mod,medellång}} = \frac{1{,}10}{0{,}80} = 1{,}38$$

$$\frac{k_{mod,momentan}}{k_{mod,kort}} = \frac{1{,}10}{0{,}90} = 1{,}22$$

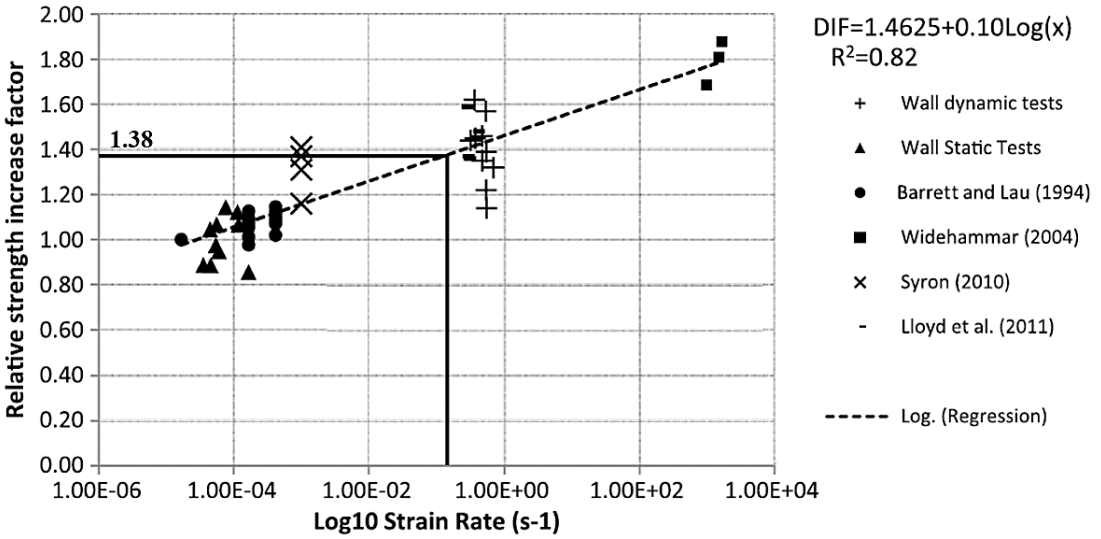
Dessa kvoter kan ses som Eurocodes tolkning av dynamiska förstoringsfaktorer för hållfastheten. Kvoternas varierande värden beror på vad som anges som referenspunkt för statisk last; lång, medellång eller kort tid. I Madisonkurvan anges referenspunkten 100 % till tiden 7,5 minuter till maxspänning. I Eurocode skulle detta närmast motsvara en korttidsbelastning, vilket resulterar i att den dynamiska förstoringsfaktorn för hållfastheten från Eurocode kan tolkas som 1,22.

5.3.3 Lacroix och Doudaks graf

I avsnitt 5.2 beräknades den högsta töjningshastigheten, utan att brott i skivan uppstod, till $1{,}49 \cdot 10^{-1}$ s^{-1} för testerna utförda i försöksomgång 1 hos Martinsons, vilket motsvarar en fallhöjd på 2,1 m. Detta värde kan sedan sättas in i en graf som Lacroix och Doudak tagit fram. I denna graf, som visar hur den dynamiska förstoringsfaktorn för hållfastheten, DIF_f, beror av töjningshastigheten, är data sammanställt från tidigare utförda försök samt resultatet av deras egna statiska och dynamiska tester, se Figur 5.9. De tog sedan fram en ”best fit line”-ekvation för de sammanställda resultaten. Ekvationen, som syns till höger om grafen i Figur 5.9, användes för att beräkna den dynamiska förstoringsfaktorns värde enligt

$$DIF_f = 1{,}4625 + 0{,}10 \cdot \log(0{,}149) = 1{,}38 \tag{5.3}$$

vilket resulterar i en dynamisk förstoringsfaktor på 1,38 för böjhållfastheten, se Figur 5.9. Vid insättning av den högsta beräknade töjningshastigheten för försöksomgång 2 hos Martinsons, $1{,}78 \cdot 10^{-1}$ s^{-1}, beräknas DIF_f genom samma ekvation till 1,39, vilken är nästan identisk med DIF_f för försöksomgång 1.



Figur 5.9 *Lacroix och Doudaks sammanställda graf (Lacroix & Doudak, 2014) med insatt beräknat värde för töjningshastigheten. Till höger syns ekvationen som används för att beräkna DIF_f.*

5.3.4 Elmendorfs försök

Armin Elmendorf utförde 1916 experiment på träbalkar med en försöksuppställning som liknar den försöksuppställning som använts av Martinsons, se avsnitt 3.6.3. Både statiska och dynamiska tester utfördes på liggande balkar med en fallande vikt från en

bestämd höjd. Tiden till maximal spänning vid Elmendorfs försök, 0,015 s, är av samma storleksordning som tiden som beräknats efter försöken hos Martinsons, 0,033 s respektive 0,031 s.

Elmendorf kom fram till att elasticitetsmodulen ökar med 1,20 och böjhållfastheten ökar med 1,78 vid dynamisk belastning jämfört med statisk belastning, se Tabell 3.3. Om dessa värden på de dynamiska förstoringsfaktorerna för elasticitetsmodul respektive böjhållfasthet implementeras i beräkningsgången för de testade väggelementen i första försöksomgången hos Martinsons fås resultat enligt Tabell 5.3.

Tabell 5.3 Sammanställning av lastkapacitetskontrollen för utförda försök vid den första försöksomgången efter insättning av de dynamiska förstoringsfaktorerna framtagna av Armin Elmendorf.

Försök nr.	Ekv. statisk last Q [kN]	Lastkapacitet R_{Rd} [kN]	Kvot Q/R_{Rd}	Kontroll $Q/R_{Rd} > 1{,}0$	Def. u_{max}/u_{el}
1.1	27,4	73,7	0,37	Ok	0,89
1.2	38,8	73,7	0,53	Ok	0,90
1.3	47,5	73,7	0,64	Ok	0,95
1.4	54,9	73,7	0,74	Ok	0,97
1.5	61,3	73,7	0,83	Ok	0,96
1.6	67,2	73,7	0,91	Ok	0,96
1.7	77,6	73,7	1,05	Ej ok	0,98
2.1	60,1	69,1	0,87	Ok	1,02
2.2	69,4	69,1	1,00	Ej ok	-
3.1	62,0	69,1	0,90	Ok	1,00
3.2	67,0	69,1	0,97	Ok	1,01
3.3	71,6	69,1	1,04	Ej ok	-

Efter att värdena för de dynamiska förstoringsfaktorerna blev implementerade visar Tabell 5.3 att det är tre försök som inte klarar kontrollen; 1.7, 2.2 samt 3.3, eftersom dessa kontrollkvoter >1,00. Dessa försök är de som vid utförandet också gick till verkligt rejält brott. Elmendorfs resultat verkar därför implementerbart för de testade väggskivorna. Vid analys av deformationerna finns alla kvoter nära 1,00, vilket är bra.

Elmendorfs värden på de dynamiska förstoringsfaktorerna implementerandes även för testresultatet i den andra försöksomgången. Resultatet presenteras i Tabell 5.4.

Tabell 5.4 Sammanställning av lastkapacitetskontrollen för utförda försök vid den andra försöksomgången efter insättning av de dynamiska förstoringsfaktorerna framtagna av Armin Elmendorf.

Försök nr.	Ekv. statisk last Q [kN]	Lastkapacitet R_{Rd} [kN]	Kvot Q/R_{Rd}	Kontroll $Q/R_{Rd} > 1{,}0$	Def. u_{max}/u_{el}
1.1	37,2	75,8	0,49	Ok	0,89
1.2	45,6	75,8	0,60	Ok	0,82
1.3[A]	52,6	75,8	0,69	Ok	0,74
1.4	58,9	75,8	0,78	Ok	0,84
1.5	64,5	75,8	0,85	Ok	0,86
1.6	68,0	75,8	0,90	Ok	0,92
1.7[A]	71,3	75,8	0,94	Ok	1,07
2.1	53,0	75,8	0,70	Ok	0,93
2.2[A]	59,2	75,8	0,78	Ok	1,08
3.1	52,7	75,8	0,70	Ok	0,90
3.2	58,9	75,8	0,78	Ok	0,93
3.3[A]	64,6	75,8	0,85	Ok	1,08
4.1	57,7	75,8	0,76	Ok	0,88
4.2	57,7	75,8	0,76	Ok	0,87
4.3	57,7	75,8	0,76	Ok	0,84
4.4[A]	60,5	75,8	0,80	Ok	0,76
4.5[A]	63,2	75,8	0,83	Ok	0,79
4.6	66,6	75,8	0,88	Ok	0,84
4.7[A]	69,8	75,8	0,92	Ok	-
5.1	60,6	75,8	0,80	Ok	0,84
5.2[A]	60,6	75,8	0,80	Ok	0,73
5.3[A]	60,6	75,8	0,80	Ok	0,66
5.4	66,4	75,8	0,88	Ok	0,85
5.5	71,7	75,8	0,95	Ok	0,86
5.6[A]	75,0	75,8	0,99	Ok	0,99

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

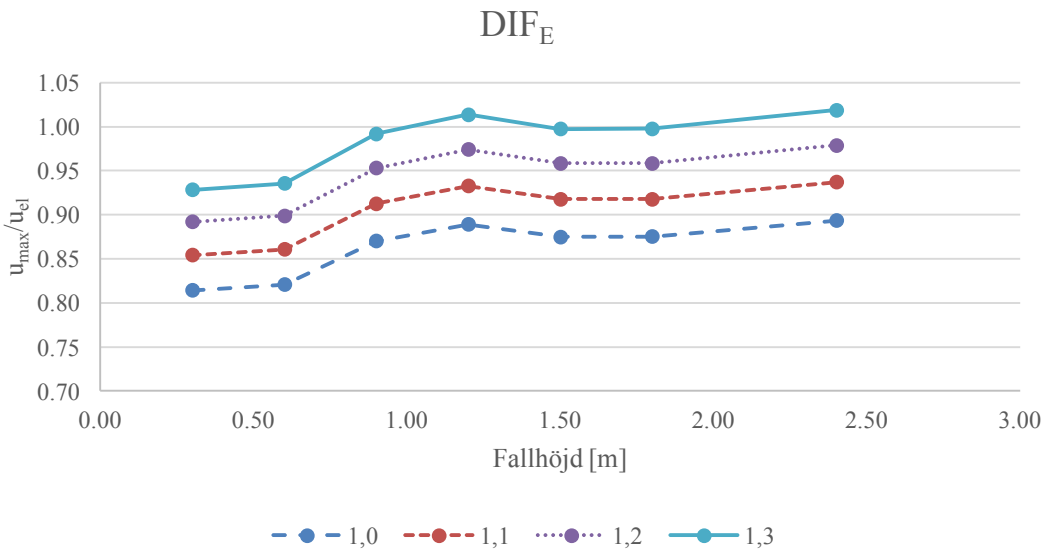
Insättning av Elmendorfs dynamiska förstoringsfaktorer i försöksomgång 2 resulterar i för stor lastkapacitet eftersom alla skivor klarar kapacitetskontrollen, något som inte stämmer med försöksdata, se Tabell 5.4.

5.4 Försöksomgång 1

Efter analys av Martinsons första försöksomgång var det tydligt att materialet blir starkare. Hur stora DIF_E respektive DIF_f är kan vara svårt att bestämma, då DIF_f också beror av DIF_E. Därför har en numerisk analys genomförts, där $1{,}0 \leq DIF_E \leq 1{,}3$ och därefter har värden för DIF_f undersökts i ett intervall mellan 1,3–1,9. Storleken på respektive dynamiska förstoringsfaktors intervall motiveras från litteraturstudier, se Tabell 3.3.

Tabell 5.5 Sammanställning av deformationskvoter vid olika DIF_E.

Försök nr.	Kvot E_{dyn}/E_{sta} (DIF_E)						
	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30
	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}
1.1	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93
1.2	0,82	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94
1.3	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	0,99
1.4	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	0,99	1,01
1.5	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00
1.6	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00
1.7	0,89	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02
2.1	0,93	0,95	0,97	1,00	1,02	1,04	1,06
2.2	-	-	-	-	-	-	-
3.1	0,91	0,93	0,95	0,97	1,00	1,02	1,04
3.2	0,92	0,95	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05
3.3	-	-	-	-	-	-	-



Figur 5.10 Kvoten u_{max}/u_{el} vid olika värden på DIF_E för skiva 1.

När ett värde på DIF_E bestäms, önskas att deformationskvoterna vid försöken är 1,00. Vid val av DIF_E i Tabell 5.5 undersöks därför vilket värde på DIF_E som ger en kvot på så nära 1,00 som möjligt. För att resultaten enligt beräkningsgången ska vara på säker sida, är en kvot ≤ 1,00 bättre än en kvot ≥ 1,00. Baserat på analys av tabellen kan konstateras att DIF_E bör vara ca 1,15–1,20 eftersom deformationskvoterna ligger kring 1,00 vid de högre fallhöjderna för dessa DIF_E och det är i närhet till brott som detta förhållande anses intressant. Hur DIF_E påverkar deformationskvoten illustreras grafiskt i Figur 5.10.

Eftersom elasticitetsmodulen påverkar styvheten, k, hos skivorna kommer även den ekvivalenta statiska lasten, Q, bli större om DIF_E >1,00. Anledningen till detta är för att den ekvivalenta statiska lasten beräknas enligt

$$Q = k \cdot u_{el} \tag{2.35}$$

dvs. en ökad styvhet ger en ökad last. Detta innebär att spänningarna i skivan ökar och därav kommer även värdet på DIF_f att öka med ökande värde på DIF_E för att få kapaciteten att motsvara den ekvivalenta lasten.

För respektive utvalt värde på DIF_E, 1,15 och 1,20, undersöktes sedan hur DIF_f påverkas, vilket redogörs för nedan i Tabell 5.6 och Tabell 5.7. Här önskas en DIF_f som ger upphov till en spänningkvot där skivorna som har tillräcklig böjhållfasthet skall vara ≤ 1,00 och skivorna som går till brott är ≥ 1,00. Sedan genomförs också en kontroll om dessa värden passar in i beräkningsgången genom att undersöka lastkapacitetskontrollen i denna.

Tabell 5.6 Sammanställning av spänningskvoter vid DIF_E=1,15 för olika värden på DIF_f.

$DIF_E = E_{dyn}/E_{sta}$ = 1,15							
	Kvot f_{dyn}/f_{sta} (DIF_f)						
Försök	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
nr.	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$
1.1	0,44	0,40	0,38	0,35	0,33	0,31	0,30
1.2	0,62	0,58	0,54	0,50	0,47	0,45	0,42
1.3	0,81	0,75	0,70	0,66	0,62	0,58	0,55
1.4	0,95	0,88	0,82	0,77	0,73	0,69	0,65
1.5	1,05	0,97	0,91	0,85	0,80	0,76	0,72
1.6	1,15	1,07	0,99	0,93	0,88	0,83	0,78
1.7	1,35	1,26	1,17	1,10	1,03	0,98	0,93
2.1	1,16	1,08	1,01	0,94	0,89	0,84	0,79
2.2	-	-	-	-	-	-	-
3.1	1,17	1,09	1,02	0,95	0,90	0,85	0,80
3.2	1,29	1,20	1,12	1,05	0,99	0,93	0,88
3.3	-	-	-	-	-	-	-

Med en DIF_E = 1,15 enligt Tabell 5.6 bör den dynamiska förstoringsfaktorn för hållfastheten, DIF_f, ge upphov till en spänningskvot större än 1,00 när försöket går till brott och mindre än 1,00 när den fortsatt kan bära last.

För skiva 1 önskas spänningskvoten i försök 1.6 vara <1,00, då skivan fortsatt kan bära last, och >1,00 vid försök 1.7, där brott skett. Dessa båda krav inträffar i intervallet $1{,}50 < DIF_f < 1{,}70$.

För skiva 2, där inga värden finns där brott uppstått, kan endast analys från försök 2.1 göras där skivan fortsatt kan bära last. Spänningskvoten för försök 2.1 ska alltså vara <1,00. Detta inträffar för alla värden där $1{,}60 < DIF_f$. Det kan antas att fallhöjden för försök 2.1 ligger nära brotthöjd, exempelvis 90 %, och då kan intervallet för DIF_f sättas till $1{,}60 < DIF_f < 1{,}70$.

För skiva 3 önskas spänningskvoten för försök 3.2 vara <1,00. Detta inträffar för $1{,}70 < DIF_f$. Eftersom det precis som för skiva 2 inte finns några värden där skivan gått

till brott får antagande om fallhöjd nära brottgräns återigen göras. Intervallet för DIF_f blir då $1,70<DIF_f<1,80$.

Om alla skivors intervall för DIF_f tas hänsyn till i ett intervall då DIF_E = 1,15 fås resultatet $1,50<DIF_f<1,80$.

Tabell 5.7 Sammanställning av spänningskvoter vid DIF_E=1,20 för olika värden på DIF_f.

$DIF_E = E_{dyn}/E_{sta}$ = 1,20							
	Kvot f_{dyn}/f_{sta} (DIF_f)						
Försök nr.	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$
1.1	0,45	0,42	0,39	0,37	0,35	0,33	0,31
1.2	0,65	0,60	0,56	0,53	0,50	0,47	0,44
1.3	0,84	0,78	0,73	0,68	0,64	0,61	0,58
1.4	0,99	0,92	0,86	0,81	0,76	0,72	0,68
1.5	1,09	1,01	0,95	0,89	0,84	0,79	0,75
1.6	1,20	1,11	1,04	0,97	0,92	0,86	0,82
1.7	1,41	1,31	1,22	1,15	1,08	1,02	0,97
2.1	1,21	1,12	1,05	0,98	0,93	0,87	0,83
2.2	-	-	-	-	-	-	-
3.1	1,22	1,14	1,06	0,99	0,94	0,88	0,84
3.2	1,34	1,25	1,17	1,09	1,03	0,97	0,92
3.3	-	-	-	-	-	-	-

Vid framtagning av DIF_f när DIF_E = 1,20 för Tabell 5.7 sker samma typ av analys som vid studie av Tabell 5.6.

För skiva 1 önskas spänningskvoten för försök 1.6 vara <1,00, vilket uppstår när $1,60<DIF_f$. Samtidigt önskas kvoten i försök 1.7 att fortsatt vara >1,00 då brott uppstått här. En lämplig DIF_f när DIF_E = 1,20 för skiva 1 är därför i intervallet $1,60<DIF_f<1,80$, då kvoten i försök 1.7 har passerat 1,00 vid DIF_f = 1,90.

För skiva 2 bör spänningskvoten för försök 2.1 vara <1,00. Detta inträffar då $1,60<DIF_f$. Med resonemanget att fallhöjden i försök 2.1 ligger nära brotthöjd, dvs. uppgått till minst 90 %, kan ett intervall för skiva 2 sättas till $1,60<DIF_f<1,70$.

För skiva 3 önskas spänningskvoten för försök 3.2 vara <1,00. Detta inträffar för $1,80<DIF_f$. Eftersom det precis som för skiva 2 inte finns några värden där skivan gått till brott får antagande om fallhöjd nära brottgräns återigen göras. Intervallet för DIF_f blir då $1,80<DIF_f<1,90$, då kvoten i försök 3.2 har passerat 0,90 för DIF_f = 2,00.

Om alla skivors intervall för DIF_f tas hänsyn till i ett intervall då DIF_E = 1,20 fås resultatet $1,60<DIF_f<1,90$.

För att undersöka hur de olika intervallen på *DIF* påverkar beräkningsgången visas resultatet av den beräknade kvoten för lastkapaciteten för de berörda intervallen av DIF_f när DIF_E =1,15 i Tabell 5.8.

Tabell 5.8 Sammanställning av lastkapacitetskontroll vid DIF_E=1,15 för olika värden på DIF_f.

$DIF_E = E_{dyn}/E_{sta}$ = 1,15								
	Kvot f_{dyn}/f_{sta} (DIF_f)							
Försök nr.	1,50		1,60		1,70		1,80	
	Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}	
1.1	0,43	Ok	0,41	Ok	0,38	Ok	0,36	Ok
1.2	0,61	Ok	0,57	Ok	0,54	Ok	0,51	Ok
1.3	0,75	Ok	0,70	Ok	0,66	Ok	0,62	Ok
1.4	0,86	Ok	0,81	Ok	0,76	Ok	0,72	Ok
1.5	0,97	Ok	0,91	Ok	0,85	Ok	0,81	Ok
1.6	1,06	Ej ok	0,99	Ok	0,93	Ok	0,88	Ok
1.7	1,22	Ej ok	1,15	Ej ok	1,08	Ej ok	1,02	Ej ok
2.1	1,01	Ej ok	0,95	Ok	0,89	Ok	0,84	Ok
2.2	1,17	Ej ok	1,09	Ej ok	1,03	Ej ok	0,97	Ok
3.1	1,04	Ej ok	0,98	Ok	0,92	Ok	0,87	Ok
3.2	1,13	Ej ok	1,06	Ej ok	0,99	Ok	0,94	Ok
3.3	1,20	Ej ok	1,13	Ej ok	1,06	Ej ok	1,00	Ej ok

Det är endast på försöksnummer 1.7, 2.2 samt 3.3 som kontrollen i Tabell 5.8 önskas visa ”Ej ok”, resterande försöknummer bör visa ”Ok” då brott inte uppstått där. Detta inträffar, för en given DIF_E = 1,15, vid DIF_f = 1,70, vilket ligger inom intervallet framtaget i analysen för Tabell 5.6. Tabell 5.8 visar också att värden på DIF_f större än 1,80 inte är relevant när DIF_E = 1,15 om alla skivor ska klara kontrollen.

För att undersöka hur de framtagna intervall på DIF_f när DIF_E = 1,20 påverkar den framtagna beräkningsgången görs på samma sätt som i Tabell 5.8 en undersökning av lastkapacitetskontrollen som är ett resultat av beräkningsgången. För DIF_E = 1,20 visas dessa resultat nedan i Tabell 5.9.

Tabell 5.9 Sammanställning av lastkapacitetskontroll vid DIF_E=1,20 för olika värden på DIF_f.

$DIF_E = E_{dyn}/E_{sta}$ = 1,20								
	Kvot f_{dyn}/f_{sta} (DIF_f)							
Försök nr.	1,50		1,60		1,70		1,80	
	Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}	
1.1	0,44	Ok	0,41	Ok	0,39	Ok	0,37	Ok
1.2	0,61	Ok	0,57	Ok	0,54	Ok	0,51	Ok
1.3	0,75	Ok	0,70	Ok	0,66	Ok	0,62	Ok
1.4	0,86	Ok	0,81	Ok	0,76	Ok	0,72	Ok
1.5	0,97	Ok	0,91	Ok	0,85	Ok	0,81	Ok
1.6	1,06	Ej ok	0,99	Ok	0,93	Ok	0,88	Ok
1.7	1,22	Ej ok	1,15	Ej ok	1,08	Ej ok	1,02	Ej ok
2.1	1,01	Ej ok	0,95	Ok	0,89	Ok	0,84	Ok
2.2	1,17	Ej ok	1,09	Ej ok	1,03	Ej ok	0,97	Ok
3.1	1,04	Ej ok	0,98	Ok	0,92	Ok	0,87	Ok
3.2	1,13	Ej ok	1,06	Ej ok	0,99	Ok	0,94	Ok
3.3	1,20	Ej ok	1,13	Ej ok	1,06	Ej ok	1,00	Ej ok

Vid analys av Tabell 5.9 visas att ”Ej ok” uppstår för försök 1.7, 2.2 och 3.3, samt ”Ok” för resterande försöksnummer vid DIF_f=1,70. Denna ligger inom intervallet som togs fram genom analys av Tabell 5.7. Detta indikerar på att värden på DIF_f större än 1,80 inte är relevant om alla skivor ska klara kontrollen.

Noterbart är att med ökad dynamisk förstoringsfaktor för elasticitetsmodulen, ökar även den dynamiska förstoringsfaktorn för böjhållfastheten, vilket stämmer överens med den teori som lades fram i början av avsnittet.

5.5 Försöksomgång 2

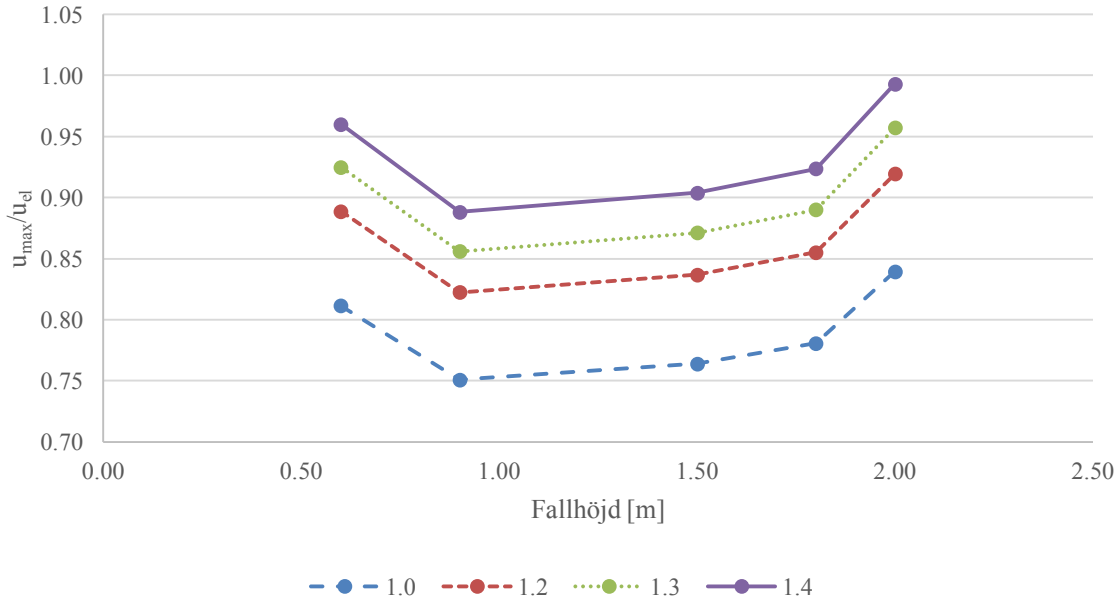
Samma analys av resultatet är utfört på försöksomgång 2. De dynamiska förstoringsfaktorerna undersöks med numerisk analys och jämförs mot resultaten från försöken. DIF_E har undersökt i intervallet $1,0<DIF_E<1,4$ och DIF_f har undersökts i intervallet $1,2<DIF_f<1,8$. Vidare har de kontrollerats mot beräkningsgångens kapacitetskontroll för att utvärdera dess säkerhet.

Tabell 5.10 Sammanställning av deformationskvoten u_{max}/u_{el} vid varierande värden på DIF_E.

Försök nr.	Kvot E_{dyn}/E_{sta} (DIF_E)						
	1,00	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40
	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}	u_{max}/u_{el}
1.1	0,81	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96
1.2	0,75	0,81	0,82	0,84	0,86	0,87	0,89
1.3[A]	0,68	0,72	0,74	0,76	0,77	0,79	0,80
1.4	0,76	0,82	0,84	0,85	0,87	0,89	0,90
1.5	0,78	0,84	0,86	0,87	0,89	0,91	0,92
1.6	0,84	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99
1.7[A]	0,98	1,05	1,07	1,09	1,12	1,14	1,16
2.1	0,85	0,91	0,93	0,95	0,97	0,99	1,01
2.2[A]	0,98	1,05	1,08	1,10	1,12	1,14	1,16
3.1	0,82	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
3.2	0,85	0,91	0,93	0,95	0,97	0,99	1,00
3.3[A]	0,98	1,05	1,08	1,10	1,12	1,14	1,16
4.1	0,80	0,86	0,88	0,90	0,92	0,93	0,95
4.2	0,79	0,85	0,87	0,89	0,91	0,92	0,94
4.3	0,76	0,82	0,84	0,85	0,87	0,89	0,90
4.4[A]	0,69	0,74	0,76	0,78	0,79	0,81	0,82
4.5[A]	0,72	0,77	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85
4.6	0,77	0,83	0,84	0,86	0,88	0,90	0,91
4.7[A]	-	-	-	-	-	-	-
5.1	0,76	0,82	0,84	0,85	0,87	0,89	0,90
5.2[A]	0,67	0,72	0,73	0,75	0,76	0,78	0,79
5.3[A]	0,60	0,64	0,66	0,67	0,68	0,70	0,71
5.4	0,77	0,83	0,85	0,86	0,88	0,90	0,91
5.5	0,78	0,84	0,86	0,88	0,89	0,91	0,93
5.6[A]	0,90	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05	1,07

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck”, brott, eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

I Tabell 5.10 så redovisas deformationskvoten u_{max}/u_{el} för DIF_E i intervallet $1{,}15 \leq DIF_E \leq 1{,}40$ vilket illustreras grafiskt i Figur 5.12. Enligt resonemang som presenterades i avsnitt 5.4 så önskas en deformationskvot nära 1,0 framförallt på försöken precis före brott. Vid analys av Tabell 5.10 så sker detta för skiva 1, 2 och 3 vid en DIF_E faktor på 1,35 då alla tre hamnar precis under 1,0. Skiva 4 och 5 uppvisar ett styvare beteende men ligger inom en 10 % felmarginal. Litteraturstudien samt tidigare försök har pekat på att DIF_E hamnar omkring 1,1–1,2 och det anses därför osannolikt DIF_E har ett högre värde än 1,35 som skiva 4 och 5 antyder. Detta är för att många antaganden gjorts kring försöksomgång två. Det är därför svårt att motivera en så stor avvikelse från vad tidigare försök och studier kommer fram till för att en för stor DIF_E leder till att beräkningsgången inte hamnar på konservativ sida. Vidare i detta kapitel så kommer endast en DIF_E på 1,15, 1,2 och 1,35 att undersökas.



Figur 5.11 Kvoten u_{max}/u_{el} vid olika värden på DIF_E för skiva 1.

Samma typ av analys för den dynamiska förstoringsfaktorn för hållfastheten som genomfördes för försöksdata från försöksomgång 1 genomförs också på försöksomgång 2 nedan i Tabell 5.11, Tabell 5.12 och Tabell 5.13.

Tabell 5.11 Sammanställning av spänningskvoter vid DIF_E=1,15 för olika värden på DIF_f.

$DIF_E = E_{dyn}/E_{sta}$ = 1,15							
	Kvot f_{dyn}/f_{sta} (DIF_f)						
Försök nr.	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80
	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$
1.1	0,62	0,57	0,53	0,50	0,47	0,44	0,41
1.2	0,70	0,65	0,60	0,56	0,53	0,50	0,47
1.3[A]	0,73	0,67	0,63	0,58	0,55	0,52	0,49
1.4	0,92	0,85	0,79	0,74	0,69	0,65	0,62
1.5	1,03	0,96	0,89	0,83	0,78	0,73	0,69
1.6	1,17	1,08	1,01	0,94	0,88	0,83	0,78
1.7[A]	1,43	1,32	1,23	1,15	1,08	1,01	0,96
2.1	0,93	0,86	0,79	0,74	0,70	0,65	0,62
2.2[A]	1,20	1,10	1,02	0,96	0,90	0,84	0,80
3.1	0,89	0,82	0,77	0,71	0,67	0,63	0,60
3.2	1,03	0,95	0,88	0,82	0,77	0,73	0,69
3.3[A]	1,30	1,20	1,12	1,04	0,98	0,92	0,87
4.1	0,95	0,88	0,82	0,76	0,71	0,67	0,64
4.2	0,94	0,87	0,81	0,75	0,71	0,66	0,63
4.3	0,91	0,84	0,78	0,72	0,68	0,64	0,60
4.4[A]	0,86	0,80	0,74	0,69	0,65	0,61	0,57
4.5[A]	0,94	0,86	0,80	0,75	0,70	0,66	0,62
4.6	1,05	0,97	0,90	0,84	0,79	0,74	0,70
4.7[A]	-	-	-	-	-	-	-
5.1	0,95	0,88	0,82	0,76	0,71	0,67	0,63
5.2[A]	0,83	0,77	0,72	0,67	0,63	0,59	0,56
5.3[A]	0,75	0,69	0,64	0,60	0,56	0,53	0,50
5.4	1,05	0,97	0,90	0,84	0,79	0,74	0,70
5.5	1,16	1,07	0,99	0,92	0,87	0,82	0,77
5.6[A]	1,39	1,28	1,19	1,11	1,04	0,98	0,93

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

Vid analys av Tabell 5.11 önskas en spänningskvot under 1,00 där konstruktionen klarat stöten och en spänningskvot större än 1,00 där brott skett.

För skiva 1 önskas kvoten i försök 1.6 vara <1,00 och kvoten i försök 1.7 vara >1,00 för att en lämplig DIF_f ska väljas, vilket uppstår då 1,5<DIF_f<1,7.

För skiva 2 önskas spänningskvoten i försök 2.1 vara <1,00 och i försök 2.2 vara >1,00. Detta inträffar då 1,2<DIF_f<1,4.

För skiva 3 är det spänningskvoten vid försök 3.2 som önskas vara <1,00 och vid försök 3.3 vara >1,00, vilket inträffar vid 1,3<DIF_f<1,5.

För skiva 4 önskas spänningskvoten vid försök 4.6 vara <1,00 och vid försök 4.7 vara >1,00, där brott skett. Då försök 4.7 inte har några värden på grund av brott kan ingen jämförelse göras och intervallet bestäms endast med värdena från försök 4.6, vilket

motsvarar 1,3<DIF_f. Det kan antas att försök 4.6 är nära brott, exempelvis har uppgått till 90 % av sin hållfasthetskapacitet, vilket gå ger ett intervall på 1,3<DIF_f<1,4.

För skiva 5 önskas spänningskvoten för försök 5.5 vara <1,00 och för försök 5.6 fortsatt vara >1,00 då kapaciteten är passerad. Detta inträffar i intervallet 1,4<DIF_f<1,6.

Det står klart att spridningen mellan resultaten är stor för skivorna i försöksomgång 2. Om alla skivors intervall för DIF_f tas hänsyn till i ett intervall fås resultatet 1,2<DIF_f<1,7.

Tabell 5.12 Sammanställning av spänningskvoter vid DIF_E=1,20 för olika värden på DIF_f.

$DIF_E = E_{dyn}/E_{sta}$ = 1,20							
	Kvot f_{dyn}/f_{sta} (DIF_f)						
Försök	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80
nr.	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$
1.1	0,65	0,60	0,56	0,52	0,49	0,46	0,43
1.2	0,73	0,68	0,63	0,59	0,55	0,52	0,49
1.3[A]	0,76	0,70	0,65	0,61	0,57	0,54	0,51
1.4	0,96	0,89	0,83	0,77	0,72	0,68	0,64
1.5	1,08	1,00	0,93	0,86	0,81	0,76	0,72
1.6	1,22	1,13	1,05	0,98	0,92	0,86	0,82
1.7[A]	1,50	1,38	1,28	1,20	1,12	1,06	1,00
2.1	0,97	0,89	0,83	0,77	0,73	0,68	0,64
2.2[A]	1,25	1,15	1,07	1,00	0,94	0,88	0,83
3.1	0,93	0,86	0,80	0,75	0,70	0,66	0,62
3.2	1,07	0,99	0,92	0,86	0,80	0,76	0,72
3.3[A]	1,36	1,25	1,16	1,09	1,02	0,96	0,91
4.1	0,99	0,92	0,85	0,80	0,75	0,70	0,66
4.2	0,98	0,91	0,84	0,79	0,74	0,69	0,66
4.3	0,95	0,87	0,81	0,76	0,71	0,67	0,63
4.4[A]	0,90	0,83	0,77	0,72	0,67	0,64	0,60
4.5[A]	0,98	0,90	0,84	0,78	0,73	0,69	0,65
4.6	1,10	1,02	0,94	0,88	0,83	0,78	0,73
4.7[A]	-	-	-	-	-	-	-
5.1	0,99	0,92	0,85	0,79	0,74	0,70	0,66
5.2[A]	0,87	0,80	0,75	0,70	0,65	0,61	0,58
5.3[A]	0,78	0,72	0,67	0,62	0,58	0,55	0,52
5.4	1,10	1,01	0,94	0,88	0,82	0,78	0,73
5.5	1,21	1,11	1,03	0,97	0,90	0,85	0,80
5.6[A]	1,45	1,34	1,24	1,16	1,09	1,02	0,97

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

Vid analys av Tabell 5.12 önskas en spänningskvot under 1,00 där konstruktionen klarat stöten och en spänningskvot större än 1,00 där brott skett.

För skiva 1 önskas kvoten i försök 1.6 vara <1,00 och kvoten i försök 1.7 vara >1,00 för att en lämplig DIF_f ska väljas, vilket uppstår då 1,5<DIF_f<1,8.

För skiva 2 önskas spänningskvoten i försök 2.1 vara <1,00 och i försök 2.2 vara >1,00. Detta inträffar då 1,2<DIF_f<1,5.

För skiva 3 är det spänningskvoten vid försök 3.2 som önskas vara <1,00 och vid försök 3.3 vara >1,00, vilket inträffar vid 1,3<DIF_f<1,6.

För skiva 4 önskas spänningskvoten vid försök 4.6 vara <1,00 och vid försök 4.7 vara >1,00, där brott skett. Då försök 4.7 inte har några värden på grund av brott kan ingen jämförelse göras och intervallet bestäms endast med värdena från försök 4.6, vilket motsvarar 1,4<DIF_f.

För skiva 5 önskas spänningskvoten för försök 5.5 vara <1,00 och för försök 5.6 fortsatt vara >1,00 då kapaciteten är passerad. Detta inträffar i intervallet 1,5<DIF_f<1,7.

Om alla skivors intervall för DIF_f tas hänsyn till i ett intervall precis som för DIF_E=1,15 fås resultatet 1,2<DIF_f<1,8. Detta indikerar återigen på en stor spridning för försöksdata vid försöksomgång 2, vilket medför osäkerheter.

Tabell 5.13 Sammanställning av spänningskvoter vid DIF_E=1,35 för olika värden på DIF_f.

$DIF_E = E_{dyn}/E_{sta}$ = 1,35							
	Kvot f_{dyn}/f_{sta} (DIF_f)						
Försök nr.	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$	$f_{m,ekv}/f_{Rd}$
1.1	0,67	0,62	0,58	0,55	0,51	0,49	0,46
1.2	0,76	0,71	0,66	0,62	0,58	0,55	0,52
1.3[A]	0,79	0,74	0,69	0,64	0,61	0,57	0,54
1.4	1,00	0,93	0,87	0,81	0,77	0,72	0,69
1.5	1,12	1,04	0,97	0,91	0,86	0,81	0,77
1.6	1,27	1,18	1,10	1,03	0,97	0,92	0,87
1.7[A]	1,55	1,44	1,35	1,26	1,19	1,12	1,06
2.1	1,00	0,93	0,87	0,82	0,77	0,73	0,69
2.2[A]	1,30	1,20	1,12	1,05	0,99	0,94	0,89
3.1	0,97	0,90	0,84	0,79	0,74	0,70	0,66
3.2	1,11	1,03	0,97	0,91	0,85	0,80	0,76
3.3[A]	1,41	1,31	1,22	1,15	1,08	1,02	0,97
4.1	1,03	0,96	0,89	0,84	0,79	0,75	0,71
4.2	1,02	0,95	0,88	0,83	0,78	0,74	0,70
4.3	0,98	0,91	0,85	0,80	0,75	0,71	0,67
4.4[A]	0,93	0,87	0,81	0,76	0,71	0,67	0,64
4.5[A]	1,01	0,94	0,88	0,82	0,77	0,73	0,69
4.6	1,14	1,06	0,99	0,93	0,87	0,83	0,78
4.7[A]	-	-	-	-	-	-	-
5.1	1,03	0,96	0,89	0,84	0,79	0,74	0,71
5.2[A]	0,90	0,84	0,78	0,73	0,69	0,65	0,62
5.3[A]	0,81	0,75	0,70	0,66	0,62	0,58	0,55
5.4	1,14	1,06	0,99	0,93	0,87	0,82	0,78
5.5	1,25	1,16	1,09	1,02	0,96	0,90	0,86
5.6[A]	1,51	1,40	1,31	1,22	1,15	1,09	1,03

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

Med bakgrund till litteraturstudier är ett val av DIF_E = 1,35 högt och osannolikt. Det har ändå valts att studera detta värde då DIF_E = 1,35 gav bra värden för deformationskvoterna i Tabell 5.10. Höga värden på DIF_E ger också höga värden på DIF_f, se avsnitt 5.4, vilket innebär att DIF_E = 1,35 också kommer att resultera i höga värden på DIF_f.

Vid analys av Tabell 5.13 för skiva 1 önskas spänningskvoten i försök 1.6, där brott inte uppstått, vara <1,00 och kvoten i försök 1.7 vara >1,00 för att en lämplig DIF_f ska väljas, vilket uppstår då $1,7<DIF_f<1,9$.

I försök 2.1 har brott inte uppstått och därför önskas spänningskvoten i detta försök vara <1,00 och i försök 2.2, där brott uppstått, bör kvoten istället vara >1,00. Detta inträffar då $1,4<DIF_f<1,6$.

För skiva 3 är det spänningskvoten vid försök 3.2 som önskas vara <1,00 och vid försök 3.3 bör den vara >1,00, vilket inträffar vid 1,5<DIF_f<1,8.

För skiva 4 önskas spänningskvoten vid försök 4.6 vara <1,00, då brott inte uppstått vid detta försök, mer än ett initialt fingerskarvsbrott. Då försök 4.7 inte har några värden på grund av brott kan ingen jämförelse mellan spänningskvoterna genomföras och intervallet bestäms endast med värdena från försök 4.6, vilket motsvarar 1,5<DIF_f. Om det antas att försök 4.6 är nära brott, exempelvis har uppgått till 90 % av sin hållfasthetskapacitet, ger det ett intervall på 1,5<DIF_f<1,6.

För skiva 5 önskas spänningskvoten för försök 5.5 vara <1,00 och för försök 5.6 fortsatt vara >1,00 då kapaciteten är passerad. Detta inträffar i intervallet 1,7<DIF_f<1,9.

Om alla skivors intervall för DIF_f när DIF_E = 1,35 tas hänsyn till i ett intervall fås resultatet 1,4<DIF_f<1,9.

För att sedan undersöka hur resultatet av försöksdata överensstämmer med beräkningsgången som är framtagen undersöks lastkapacitetskontrollen som genomförs i slutet av beräkningsgången. Vid undersökning av detta har det undersökta intervallet för DIF_f minskats till 1,3<DIF_f<1,6. Resultatet av kontrollen när DIF_E = 1,15 visas i Tabell 5.14.

Tabell 5.14 Sammanställning av lastkapacitetskontroll vid DIF_E=1,15 för olika värden på DIF_f.

$DIF_E = E_{dyn}/E_{sta}$ = 1,15								
	Kvot f_{dyn}/f_{sta} (DIF_f)							
Försök nr.	1,30		1,40		1,50		1,60	
	Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}	
1.1	0,66	Ok	0,61	Ok	0,57	Ok	0,54	Ok
1.2	0,81	Ok	0,75	Ok	0,70	Ok	0,66	Ok
1.3[A]	0,93	Ok	0,86	Ok	0,81	Ok	0,76	Ok
1.4	1,04	Ej ok	0,97	Ok	0,90	Ok	0,85	Ok
1.5	1,14	Ej ok	1,06	Ej ok	0,99	Ok	0,93	Ok
1.6	1,20	Ej ok	1,12	Ej ok	1,04	Ej ok	0,98	Ok
1.7[A]	1,26	Ej ok	1,17	Ej ok	1,09	Ej ok	1,02	Ej ok
2.1	0,94	Ok	0,87	Ok	0,81	Ok	0,76	Ok
2.2[A]	1,05	Ej ok	0,97	Ok	0,91	Ok	0,85	Ok
3.1	0,93	Ok	0,87	Ok	0,81	Ok	0,76	Ok
3.2	1,04	Ej ok	0,97	Ok	0,90	Ok	0,85	Ok
3.3[A]	1,14	Ej ok	1,06	Ej ok	0,99	Ok	0,93	Ok
4.1	1,02	Ej ok	0,95	Ok	0,88	Ok	0,83	Ok
4.2	1,02	Ej ok	0,95	Ok	0,88	Ok	0,83	Ok
4.3	1,02	Ej ok	0,95	Ok	0,88	Ok	0,83	Ok
4.4[A]	1,07	Ej ok	0,99	Ok	0,93	Ok	0,87	Ok
4.5[A]	1,12	Ej ok	1,04	Ej ok	0,97	Ok	0,91	Ok
4.6	1,18	Ej ok	1,09	Ej ok	1,02	Ej ok	0,96	Ok
4.7[A]	1,24	Ej ok	1,15	Ej ok	1,07	Ej ok	1,00	Ej ok
5.1	1,07	Ej ok	1,00	Ok	0,93	Ok	0,87	Ok
5.2[A]	1,07	Ej ok	1,00	Ok	0,93	Ok	0,87	Ok
5.3[A]	1,07	Ej ok	1,00	Ok	0,93	Ok	0,87	Ok
5.4	1,17	Ej ok	1,09	Ej ok	1,02	Ej ok	0,95	Ok
5.5	1,27	Ej ok	1,18	Ej ok	1,10	Ej ok	1,03	Ej ok
5.6[A]	1,33	Ej ok	1,23	Ej ok	1,15	Ej ok	1,08	Ej ok

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

Resultaten i Tabell 5.14 visar att DIF_f = 1,60 bör väljas när skiva 1, skiva 4 samt skiva 5 undersöks. Skiva 5 klarar även något högre värde än 1,60 vid kontrollen. Vid studier av resultatet för skiva 2 bör DIF_f = 1,30 väljas och för skiva 3 bör istället DIF_f =1,40 väljas.

För att sedan undersöka hur resultatet av försöksdata överensstämmer med beräkningsgången som är framtagen studeras lastkapacitetskontrollen från beräkningsgången precis som tidigare. Vid undersökning av detta när DIF_E = 1,20 har det undersökta intervallet för DIF_f minskats till samma intervall som användes vid analys av DIF_f när DIF_E=1,15; 1,3<DIF_f <1,6. Resultatet av lastkapacitetskontrollen visas i Tabell 5.15.

Tabell 5.15 Sammanställning av lastkapacitetskontroll vid DIF_E=1,20 för olika värden på DIF_f.

$DIF_E = E_{dyn}/E_{sta}$ = 1,20								
	Kvot f_{dyn}/f_{sta} (DIF_f)							
Försök nr.	1,30		1,40		1,50		1,60	
	Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}	
1.1	0,67	Ok	0,62	Ok	0,58	Ok	0,55	Ok
1.2	0,82	Ok	0,77	Ok	0,71	Ok	0,67	Ok
1.3[A]	0,95	Ok	0,88	Ok	0,82	Ok	0,77	Ok
1.4	1,06	Ej ok	0,99	Ok	0,92	Ok	0,86	Ok
1.5	1,17	Ej ok	1,08	Ej ok	1,01	Ej ok	0,95	Ok
1.6	1,23	Ej ok	1,14	Ej ok	1,06	Ej ok	1,00	Ok
1.7[A]	1,29	Ej ok	1,20	Ej ok	1,12	Ej ok	1,05	Ej ok
2.1	0,96	Ok	0,89	Ok	0,83	Ok	0,78	Ok
2.2[A]	1,07	Ej ok	0,99	Ok	0,93	Ok	0,87	Ok
3.1	0,95	Ok	0,88	Ok	0,83	Ok	0,77	Ok
3.2	1,07	Ej ok	0,99	Ok	0,92	Ok	0,87	Ok
3.3[A]	1,17	Ej ok	1,08	Ej ok	1,01	Ej ok	0,95	Ok
4.1	1,04	Ej ok	0,97	Ok	0,90	Ok	0,85	Ok
4.2	1,04	Ej ok	0,97	Ok	0,90	Ok	0,85	Ok
4.3	1,04	Ej ok	0,97	Ok	0,90	Ok	0,85	Ok
4.4[A]	1,09	Ej ok	1,02	Ej ok	0,95	Ok	0,89	Ok
4.5[A]	1,14	Ej ok	1,06	Ej ok	0,99	Ok	0,93	Ok
4.6	1,20	Ej ok	1,12	Ej ok	1,04	Ej ok	0,98	Ok
4.7[A]	1,26	Ej ok	1,17	Ej ok	1,09	Ej ok	1,03	Ej ok
5.1	1,09	Ej ok	1,02	Ej ok	0,95	Ok	0,89	Ok
5.2[A]	1,09	Ej ok	1,02	Ej ok	0,95	Ok	0,89	Ok
5.3[A]	1,09	Ej ok	1,02	Ej ok	0,95	Ok	0,89	Ok
5.4	1,20	Ej ok	1,11	Ej ok	1,04	Ej ok	0,97	Ok
5.5	1,30	Ej ok	1,20	Ej ok	1,12	Ej ok	1,05	Ej ok
5.6[A]	1,36	Ej ok	1,26	Ej ok	1,17	Ej ok	1,10	Ej ok

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

För skiva 1, skiva 4 och skiva 5 bör en DIF_f väljas till ca 1,60 enligt analys av Tabell 5.15. Resultaten för skiva 5 indikerar på att en DIF_f högre än 1,60 kan vara möjlig. För skiva 2 och skiva 3, där brott uppstått tidigare än de andra skivorna, bör DIF_f sättas till 1,30 respektive 1,40.

För att sedan undersöka hur resultatet av försöksdata överensstämmer med beräkningsgången som är framtagen undersöks lastkapacitetskontrollen som genomförs i slutet av beräkningsgången. Vid undersökning av detta har det undersökta intervallet för DIF_f minskats till $1,5<DIF_f<1,8$. Resultatet av kontrollen när DIF_E = 1,35 visas i Tabell 5.16.

Tabell 5.16 Sammanställning av lastkapacitetskontroll vid DIF_E=1,35 för olika värden på DIF_f.

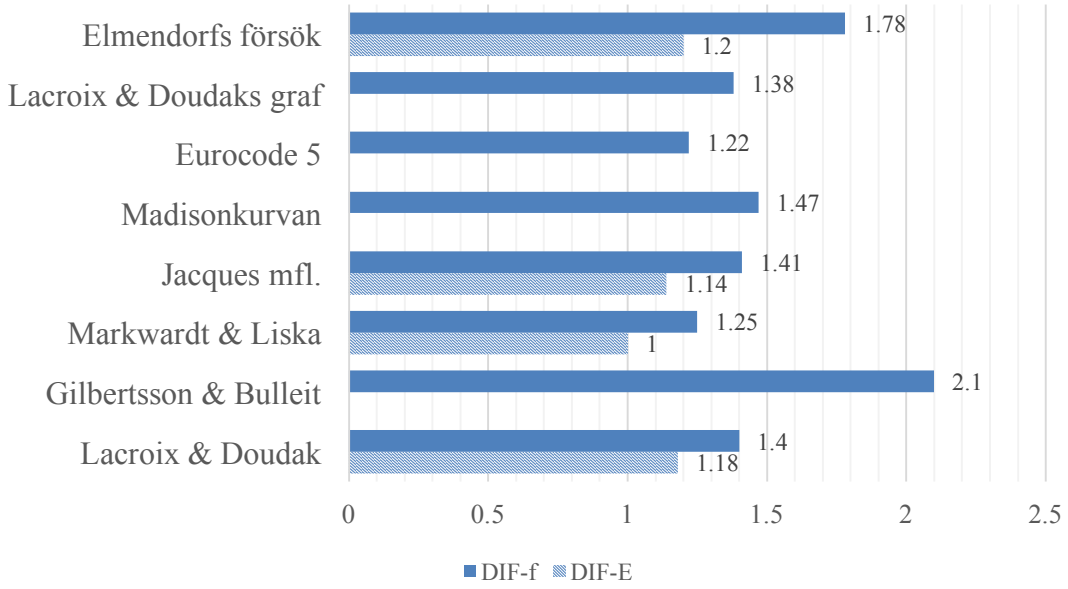
$DIF_E = E_{dyn}/E_{sta}$ = 1,35								
	Kvot f_{dyn}/f_{sta} (DIF_f)							
Försök nr.	1,50		1,60		1,70		1,80	
	Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}		Q/R_{Rd}	
1.1	0,62	Ok	0,58	Ok	0,55	Ok	0,52	Ok
1.2	0,76	Ok	0,71	Ok	0,67	Ok	0,63	Ok
1.3[A]	0,87	Ok	0,82	Ok	0,77	Ok	0,73	Ok
1.4	0,98	Ok	0,92	Ok	0,86	Ok	0,81	Ok
1.5	1,07	Ej ok	1,00	Ej ok	0,95	Ok	0,89	Ok
1.6	1,13	Ej ok	1,06	Ej ok	1,00	Ok	0,94	Ok
1.7[A]	1,18	Ej ok	1,11	Ej ok	1,04	Ej ok	0,99	Ok
2.1	0,88	Ok	0,82	Ok	0,78	Ok	0,73	Ok
2.2[A]	0,98	Ok	0,92	Ok	0,87	Ok	0,82	Ok
3.1	0,88	Ok	0,82	Ok	0,77	Ok	0,73	Ok
3.2	0,98	Ok	0,92	Ok	0,86	Ok	0,82	Ok
3.3[A]	1,07	Ej ok	1,01	Ej ok	0,95	Ok	0,89	Ok
4.1	0,96	Ok	0,90	Ok	0,85	Ok	0,80	Ok
4.2	0,96	Ok	0,90	Ok	0,85	Ok	0,80	Ok
4.3	0,96	Ok	0,90	Ok	0,85	Ok	0,80	Ok
4.4[A]	1,00	Ej ok	0,94	Ok	0,89	Ok	0,84	Ok
4.5[A]	1,05	Ej ok	0,98	Ok	0,93	Ok	0,87	Ok
4.6	1,11	Ej ok	1,04	Ej ok	0,98	Ok	0,92	Ok
4.7[A]	1,16	Ej ok	1,09	Ej ok	1,02	Ej ok	0,97	Ok
5.1	1,01	Ej ok	0,94	Ok	0,89	Ok	0,84	Ok
5.2[A]	1,01	Ej ok	0,94	Ok	0,89	Ok	0,84	Ok
5.3[A]	1,01	Ej ok	0,94	Ok	0,89	Ok	0,84	Ok
5.4	1,10	Ej ok	1,03	Ej ok	0,97	Ok	0,92	Ok
5.5	1,19	Ej ok	1,12	Ej ok	1,05	Ej ok	0,99	Ok
5.6[A]	1,25	Ej ok	1,17	Ej ok	1,10	Ej ok	1,04	Ej ok

[A] Osäkerhet kring mätvärden, missvisande pga ”svampsäck” eller ej centrisk träff. Vid korrigering av mätvärden utesluts dessa.

Vid en DIF_E = 1,35 kan DIF_f, genom analys av lastkapacitetskontrollen i beräkningsgången, för skiva 1 och skiva 4 sättas till 1,70. För skiva 3 bör den sättas till 1,60 och för skiva 5 till 1,80. För skiva 2 är redan DIF_f =1,5 för hög, då det för försök 2.2 sägs ha klarat lasten när den i verkligheten inte gjort det, utan skivan har gått till brott. Latkapacitetskvoten är 0,98 för försök 2.2 vilket ändå tyder på att en DIF_f = 1,50 ligger väldigt nära den verkliga brottgränsen för skiva 2, men är avrundad till osäker sida. Vid DIF_E = 1,35 sträcker sig alltså alla skivorna över ett intervall $1{,}40 < DIF_f < 1{,}80$.

5.6 Sammanställning

Tid till maximal spänning för de undersökta skivorna bestämdes till 0,033 s respektive 0,031 s genom en SDOF-metod. Den teoretiskt maximala töjningshastigheten bestämdes därefter till $1{,}49 \cdot 10^{-1}$ s^{-1} respektive $1{,}78 \cdot 10^{-1}$ s^{-1}. Utifrån jämförelser med litteratur och analys av försök har möjliga värden för de dynamiska förstoringsfaktorerna tagits fram enligt Figur 5.12.



Figur 5.12 Sammanställning av framtagna värden på dynamiska förstoringsfaktorer från litteratur, jämförelser samt analys av försök.

Litteraturstudier och analys av framtagna grafer i litteraturen, presenterat i Figur 5.12, gör att ett rimligt intervall för den dynamiska förstoringsfaktorn för elasticitetsmodulen är $1{,}1 < DIF_E < 1{,}2$ och för hållfastheten $1{,}3 < DIF_f < 1{,}8$. Intervallet för DIF_E har liten variation. Det värdet som urskiljer sig är studien gjord av Markwardt och Liska. Vid deras försök har de en belastningshastighet på 0,32 s, vilket är en faktor 10 större än vad som är beräknat för försöken hos Martinsons. Av denna anledning anses deras värde inte lika relevant som försök med mer liknande belastningshastigheter. De tabellvärden som ligger i samma intervall när det kommer till töjningshastighet och belastningshastighet är de som anses mest relevanta för denna studie. Av denna anledning anses även värden för DIF_f i tabellen från Gilbertsson & Bulleit som irrelevanta. Detta för töjningshastigheten vid deras experiment är mer än en faktor 10 snabbare än vad som är beräknad töjningshastighet för försök hos Martinsons. Av de studier som har liknande förutsättningar som försök hos Martinsons är det flest som har hamnat kring ett värde på 1,4 för DIF_f. Det anses dock att ett intervall på $1{,}3 < DIF_f < 1{,}8$ ger en bra inramning av vad litteraturen säger om ämnet. Dessa intervall används sedan som referensram när *DIF* för de undersökta KL-skivorna tas fram.

De dynamiska förstoringsfaktorerna för skivorna som undersöks både i försöksomgång 1 och försöksomgång 2 kan inte exakt bestämmas till ett specifikt värde, då underlaget hade behövt vara större för att med säkerhet kunna bestämma dem. De värden som har tagits fram via deformationskvoter och spänningskvoter

används för att testas att implementeras i beräkningsgången där lastkapacitetskontrollen studeras. Om resultatet från försöken visar samma resultat vid lastkapacitetskontrollen i beräkningsgången kan dessa värden på *DIF* styrkas som pålitliga för användning.

För skivorna vid försöksomgång 1 bör därför DIF_E ligga kring 1,15–1,20 samt DIF_f vara ca 1,50–1,80. De lägre värdena i intervallet för DIF_E hänger ihop med de lägre värdena i intervallet för DIF_f, då DIF_f beror av DIF_E.

Vid försöksomgång 2 finns en större spridning och därmed får de dynamiska förstoringsfaktorerna ett större intervall; där DIF_E ligger kring 1,20–1,35 och DIF_f bör ligga inom intervallet 1,30–1,80. Detta beror också på att det finns osäkerheter för värdet på elasticitetsmodulen för skivorna. På samma sätt som för de framtagna intervallen för försöksomgång 1 hör låga DIF_E ihop med låga DIF_f. Data från försöken pekar på att DIF_E kan anta värden på 1,35 och även högre för vissa skivor. I analysen har dock en avgränsning på 1,35 gjorts för att tidigare försök samt litteraturen har pekat på att detta redan är ett väldigt högt värde.

6 Diskussion

Trä är ett komplicerat material med stora variationer i uppbyggnad och struktur. Därför finns det stora variationer i materialegenskaperna som hållfasthet och elasticitetsmodul, vilka även påverkas av omgivningens förhållanden. I litteraturen har många tester genomförts för att bestämma dynamiska förstoringsfaktorer, men resultaten från dessa har en stor spridning, då materialet är ganska svåranalyserat med stora variationer.

Försöken, som ska motsvara det som är angivet i standarden, har många avvikelser. Hur varje enskild avvikelse påverkar slutresultatet är svårt att analysera, då inga identiska försök med standarden har utförts. Avvikelserna anses dock ha en liten inverkan på slutresultatet och den använda försöksuppställningen anses representativ för standardförsöket.

Att analysera en dynamisk stöt kräver många antaganden, vilka medför att analysen blir mindre korrekt och felkällor kan uppstå vid utförande av försök. Exempelvis antas det att en fullständigt plastisk stöt inträffar, vilket i verkligheten kanske inte är fallet, utan säcken studsar efter stöten. Detta anses dock ha och göra med responsen hos skivan som likt en ”studsmatta” får säcken att lätta från skivan efter stöt. För att beräkna tiden till maxspänning antogs först att impulsbelastningen varade kortare än en fjärdedel av egenperiodtiden för skivan, innan den kunde beräknas. Tiden till maxspänning beräknades genom enfrihetsgradsmodellering och uppmättes aldrig vid försök. Detta ledde till att bekräftelse av dessa beräkningar uteblev, vilket resulterar i en osäkerhet. Antagandet att impulsbelastningen varade kortare än en fjärdedel av egenperioden blir missvisande för de försök där svampbeteendet uppstår för säcken, då lastöverföringen inte är färdig innan skivan redan är på väg upp från sin maxdeformation igen. Stötarna kanske inte heller alltid sker exakt i centrum av skivan som angivet, då vissa stötar eventuellt blivit excentriska av misstag. Detta är dock svårt att bekräfta för försöksomgång 1. Vid analys av försöksomgång 2 finns en hel del videomaterial att kontrollera hur och var stöten sker, där det också synts att vissa stötar blivit något excentriska.

Försöksuppställningen och utrustningen som används av Martinsons är väldigt enkel. En större noggrannhet i mätningarna hade varit önskvärt och mer utrustning hade också varit bra. Exempel på utrustning som hade minskat antaganden och felkällor är en dator kopplade till deformationsgivarna för att mäta deformations-tidssamband samt uppsatta kameror för videoanalys. Vid försöksomgång 2 användes mobiltelefoner som filmade i ”slow motion” från två olika vinklar, vilket var tillräckligt bra för att kunna analysera svampsäcksbeteende eller excentricitet vid varje stöt. Ett alternativ till last-deformationssamband hade varit att använda accelerationsmätare vid experimenten. Detta skulle även underlätta när värdena på *DIF* bestäms, då storleken på lasten går att bestämmas och således inte behöver beräknas fram utifrån beräkningsgången. Storleken på lasten hade då bestämts via en analys utav accelerationskurvan som hade bestämts utifrån deformationssambandet alternativt accelerationsgivarna. Det hade då varit möjligt att med en större säkerhet bestämma värden på *DIF,* då ytterligare en okänd parameter blir känd och det går direkt att dra paralleller mellan lasten vid statiska och dynamiska försöken. Ytterligare en fördel hade varit att det hade gått att jämföra beräknad ekvivalent statisk last direkt med den dynamiska lasten för att få en uppfattning om hur stor felmarginalen är.

Det som lett till mest oklarheter vid försöksomgång 2 är hur det kunde skilja så mycket mellan utförda styvhetsmätningar. Detta anses till stor del bero på en domkraft som ej varit kalibrerad. Efterföljande tester av domkraften indikerade att den hade cirka 13 % friktionsförluster, något som inte kunde förklara den observerade spridningen på cirka 22 % mellan elasticitetsmodulsmedelvärdena vid de dynamiska kontra de statiska testerna. Det ansågs mest sannolikt att hela felmarginalen på 22 % låg hos domkraften och lasten korrigerades därefter. Vid analys av resultatet går det att diskutera om detta antagande var korrekt. Efter analysen av deformationerna visar värdet på DIF_E=1,35 att skivan kanske var styvare än vad som mättes vid elasticitetsmätningarna. Det går alternativt att förklara denna ökade styvhet med att säcken som användes vid försöksomgång 2 hade sämre lastöverföring än säcken som användes vid försöksomgång 1. En annan möjlig felkälla kan vara att det var en mindre säck i den större säcken så spännbanden fick inte samma funktion när de skulle kontrollera formen på säcken för att plastisk stöt skulle inträffa. Vid försöksomgång 2 hos Martinsons var det tydligt att säcken hade ett mycket mer oregelbundet beteende jämfört med vid försöksomgång 1. Detta illustreras väldigt väl vid en jämförelse mellan Figur 4.10 och Figur 4.11. En viktig slutsats som går att dra trots osäkerheter kring mätningarna är att träet uppträtt styvare och haft en högre hållfasthet än vad som är förväntat från de statiska testvärdena.

Vid framtagning av de dynamiska förstoringsfaktorerna, DIF_x, från försök uppstår vissa svårigheter, då DIF_f beror av DIF_E. Det är därför svårt att bestämma de exakta värdena som gäller för Martinsons skivor. Dessutom visar resultaten från framförallt försöksomgång 2 stora variationer på grund av ovan nämnda felkällor och därför skulle ett större statistiskt underlag behövas, alltså skulle fler försök behövas. De dynamiska förstoringsfaktorerna som tas fram gäller också endast för den typ av KL-trä som används hos Martinsons och inte för all typ av trä. Vid framtagande av dynamiska förstoringsfaktorer är det också av intresse att diskutera vilken säkerhetsmarginal som bör has. Trä är ett levande material med stora materialvariationer och spridningen för samma typ av skiva kan vara stor. Är det därför ett medelvärde på *DIF* det som bör fastställas eller ska *DIF* på samma sätt som materialegenskaper tas fram med exempelvis en 5 %-fraktil. Litteraturen har behandlat *DIF* genom medelvärde mot sina försök, men då uppstår en risk att 50 % av testerna inte klarar testerna. Det är också med hänsyn till detta som ett specifikt värde på respektive *DIF* inte tagits fram, utan behandlas som ett intervall.

7 Slutsats och fortsatta studier

7.1 Slutsats

Denna rapport har studerat töjningshastighetseffekten hos trä. Ett standardförsök har studerats där bärande väggelement utsätts för en stötlast. En beräkningsmetodik för förväntat resultat av detta försök hade tagits fram av Norconsult för krysslaminerade träskivor från trävaruleverantören Martinsons. Den beräkningsmetodik som var framtagen för Martinsons var på väl säker sida, men fungerade okej för den aktuella lastsituationen. Dock fanns det behov av att modifiera styvhet och hållfasthet hos träskivorna för att bättre spegla verkliga resultat.

Töjningshastighetseffekten, som uppstår när trä impulsbelastas, påverkar responsen på ett sådant sätt att styvheten och hållfastheten ökar. Detta gäller även för krysslaminerat trä som undersökts i denna rapport. Efter sammanställning av litteratur och de båda försöksomgångarna som är utförda, bör storleken på dessa dynamiska förstoringsfaktorer för KL-träskivorna rimligtvis hamna i intervallen 1,15–1,20 för elasticitetsmodulen och 1,30–1,80 för hållfastheten. Detta är dock svårt att exakt bestämma då den dynamiska förstoringsfaktorn för hållfastheten beror av den dynamiska förstoringsfaktorn för elasticitetsmodulen. Vid implementering av dessa faktorer i beräkningsgången som Norconsult AB tagit fram för Martinsons gör att de teoretiska beräkningarna stämmer bättre överens med vad som sker vid försök.

Madisonkurvan ger en bra fingervisning av DIF_f då värdet av denna hamnade mitt i det framtagna intervallet. DIF_f enligt Madison blev 1,47 när tiden till maxspänning är ca 30 ms, vilket ligger mitt i intervallet 1,30–1,80. Av denna anledning anses Madisonkurvan användbar vid framtagning av DIF_f när tiden till maxspänning är känd.

7.2 Rekommendationer till fortsatta studier

Fler försök bör utföras för att få större noggrannhet av de dynamiska förstoringsfaktorerna och dessa bör genomföras med större noggrannhet. Testerna bör likna standardens försöksuppställning i större grad för att se vilka skillnader som uppstår när avvikelser görs. Dessutom bör testerna ha en mer avancerad mätutrustning och mäta deformations-tidssamband via en dator alternativt med en accelerationsmätare, då inte antagande vid framtagning av tid till maximal deformation måste göras. Fler studier kan också genomföras på vad som händer vid andra lastfall och även studier som närmare behandlar stötögonblicket. Dessutom kan undersökas hur temperatur och fukt matematiskt påverkar de dynamiska förstoringsfaktorerna mer utförligt än att konstatera om de ökar eller minskar.

8 Referenser

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner del 1*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Burström, P. G. (2007). *Byggnadsmaterial.* Lund: Studentlitteratur AB.

Elmendorf, A. (1916). Stresses in impact. *Journal of the Franklin institute*, 771-790.

Gilbertsson, C. G., & Bulleit, W. M. (November 2013). Load Duration Effects in Wood at High Strain Rates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1647-1654.

Hall, G. J., & Kasper, E. P. (2017). *Introduction to Structural Dynamics.* San Luis Obispo: California Polytechnic State University.

Hoffmeyer, P. (2003). Strength Under Long-term Loading. i *Timber Engineering* (ss. 131-152). Chichester: John Wiley & Sons, LTD.

Jacobsson, P. (2017). Personlig kommunikation. Teknikansvarig Martinsons.

Jacques , E., Lloyd, A., Braimah, A., Saatcioglu, M., Doudak, G., & Abdelalim, O. (2014). Influence of high strain-rates on the dynamic flexural material propeties of spruce-pine-fir wood studs . *Canadian journal of civil engineering*, 56-64.

Johansson, M. (2014). *Beräkningsmetodik Stötlast.* Göteborg: Reinertsen Sverige AB.

Johansson, M. (den 16 Februari 2014). *Teori strukturrespons.*

Johansson, M. (2017). Personlig kommunikation. Norconsult AB.

Johansson, M., & Laine, L. (2012). *Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning Del 1: Last av luftstötvåg.* Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.

Johansson, M., & Laine, L. (2012). *Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Del 3: Kapacitet hos byggnader.* Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.

Lacroix, D. N., & Doudak, G. (2014). Investigation of dynamic increase factors in light-frame wood studs subjected to out-of-plane blast loading. *Journal of Structural Engineering*, 04014159-1;04014159-10.

Loven, J., & Svavarsdottir, E. S. (2016). *Concrete beams subjected to drop weight impact* . Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Markwardt, L. J., & Liska , J. A. (1956). The influence of rate of loading on the strenght of wood and wood-based materials . *Symposium on speed of testing of non-metalic materials*, 3-18.

Martinsons. (2017). *KL-TRÄ*. Hämtat från www.Martinsons.se: https://www.martinsons.se/byggprodukter/kl-tra/ den 29 September 2017

SIS. (den 24 September 1999). *SS-EN 1363-2 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional.*

SIS, Swedish Standards Institute. (2004). *SS-EN 1995-1-1:2004 Eurocode 5: Dimensionering av träkonstruktioner.* Stockholm: SIS Förlag AB.

Träguiden. (den 29 December 2016). *Brandegenskaper*. Hämtat från Träguiden: https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-egenskaper/termiska-egenskaper1/brandegenskaper/ den 25 September 2017

Widehammar, S. (2004). *Stress-Strain Relationships for Spruce Wood: Influence of Strain Rate, Moisture Content and Loading Direction.*

Exempelräkning

Beräkningar med hjälp av framtagen beräkningsgång på skiva 1 försök 1.1.

Last från fallvikt

gravitationskonstanten

$$g = 9.807 \frac{m}{s^2}$$

massa för fallvikt

$$m_1 := 200kg$$

fallhöjd för fallvikt

$$h_h := 0.3m$$

yttre arbete från fallvikt

$$W_{yttre} := m_1 \cdot g \cdot h_h = 588.399\,J$$

fallviktens hastighet efter fallhöjden

$$v_0 := \sqrt{2 \cdot g \cdot h_h} = 2.426 \frac{m}{s}$$

Geometri

spännvidd balk

$$l_b := 3m$$

bredd balk

$$b := 1.2m$$

höjd balk

$$h := 0.084m$$

Material

statisk elasticitetsmodul

$E_{sta} := 6673.7MPa$

dynamisk förstoringsfaktor för elasticitetsmodul

$DIF_E := 1.0$

dynamisk elasticitetsmodul

$E_{dyn} := E_{sta} \cdot DIF_E = 6.674 \times 10^3 \cdot MPa$

skjuvmodul (fiktiv)

$G_{trä} := 100000MPa$

statisk böjhållfasthet

$f_{m.sta} := 22MPa$

dynamisk förstoringsfaktor för böjhållfasthet

$DIF_f := 1.0$

dynamisk böjhållfasthet

$f_{m.dyn} := f_{m.sta} \cdot DIF_f = 22 \cdot MPa$

densitet träskiva

$\rho := 436 \frac{kg}{m^3}$

Tvärsnittsdata

tvärsnittsarea rektangulärt tvärsnitt

$$A_t := b \cdot h = 0.101\,m^2$$

böjmotstånd rektangulärt tvärsnitt

$$W_y := \frac{b \cdot h^2}{6} = 1.411 \times 10^{-3} \cdot m^3$$

Tröghetsmoment rektangulärt tvärsnitt

$$I_y := \frac{b \cdot h^3}{12} = 5.927 \times 10^{-5}\,m^4$$

skjuvspänningsfaktor

$$\beta := 1.2$$

massa balk

$$m_{balk} := b \cdot h \cdot l_b \cdot \rho = 131.846\,kg$$

Styvhet

styvhet med hänsyn till böjning

$$k_b := \frac{48 \cdot E_{dyn} \cdot I_y}{l_b^3} = 7.032 \times 10^5 \cdot \frac{N}{m}$$

styvhet med hänsyn till skjuvning

$$k_s := \frac{4 \cdot G_{trä} \cdot A_t}{\beta \cdot l_b} = 1.12 \times 10^{10} \cdot \frac{N}{m}$$

total styvhet med hänsyn till böjning och skjuvning

$$k_{tot} := \frac{1}{\frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_s}} = 7.032 \times 10^5 \cdot \frac{N}{m}$$

Lastkapacitet

momentkapacitet

$$M_{Rd} := f_{m.dyn} \cdot W_y = 31.046 \cdot kN \cdot m$$

lastkapacitet för fritt upplagd balk med centrerad punktlast

$$R_{Rd} := \frac{4 \cdot M_{Rd}}{l_b} = 41.395 \cdot kN$$

Plastisk stöt

tranformationsfaktor med hänsyn till utböjningsform, randvillkor och lastsituation

$$\kappa_{mF} := 0.486$$

effektiv massa

$$m_2 := m_{balk} \cdot \kappa_{mF} = 64.077\,kg$$

reducerat yttre arbete vid plastisk stöt

$$W_{yttre.red} := W_{yttre} \cdot \frac{m_1}{m_1 + m_2} = 445.626\,J$$

Respons och kontroll

resulterande utböjning från en last av en fallvikt

$$u_{el} := \sqrt{2 \cdot \frac{W_{yttre.red}}{k_{tot}}} = 0.036\,m$$

ekvivalent statisk last

$$Q := k_{tot} \cdot u_{el} = 25.034 \cdot kN$$

kontroll av ekvivalent statisk last mot lastkapaciet

$$\frac{Q}{R_{Rd}} = 0.605 \qquad kontroll := \begin{cases} "OK" & \text{if } \frac{Q}{R_{Rd}} < 1 \\ "EJ\ OK" & \text{otherwise} \end{cases} = "OK"$$

Jämförelse med försök

maximal uppmätt deformation vid försök

$$u_{max} := 0.029m$$

förhållande mellan maximal uppmätt deformation och resulterade deformation av fallvikt

$$\frac{u_{max}}{u_{el}} = 0.815$$

ekvivalent lastkapacitet för träbalk från försök

$$R_{ekv} := k_{tot} \cdot u_{max} = 20.392 \cdot kN$$

ekvivalent böjhållfasthet för träbalk från försök

$$f_{m.ekv} := \frac{R_{ekv} \cdot l_b}{4 \cdot W_y} = 10.838 \cdot MPa$$

ekvivalent böjhållfasthet från försök mot dynamisk böjhållfasthet

$$\frac{f_{m.ekv}}{f_{m.dyn}} = 0.493$$

Beräkningsark för försöksomgång 1

	Last från fallvikt					Geometri			Material							
Skivnr.	m_1	H	W_y	v_0	Skiva	Spv	b	h	E_{sta}	DIF_E	E_{dyn}	G	$f_{m,sta}$	DIF_f	$f_{m,dyn}$	$\rho_{trä}$
	[kg]	[m]	[J]	[m/s]		[m]	[m]	[m]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[kg/m^3]
1.1	200	0,30	589	2,4	84-3s	3,00	1,20	0,084	6 674	1,00	6 674	100 000	22,0	1,00	22,0	436
1.2	200	0,60	1 177	3,4	84-3s	3,00	1,20	0,084	6 674	1,00	6 674	100 000	22,0	1,00	22,0	436
1.3	200	0,90	1 766	4,2	84-3s	3,00	1,20	0,084	6 674	1,00	6 674	100 000	22,0	1,00	22,0	436
1.4	200	1,20	2 354	4,9	84-3s	3,00	1,20	0,084	6 674	1,00	6 674	100 000	22,0	1,00	22,0	436
1.5	200	1,50	2 943	5,4	84-3s	3,00	1,20	0,084	6 674	1,00	6 674	100 000	22,0	1,00	22,0	436
1.6	200	1,80	3 532	5,9	84-3s	3,00	1,20	0,084	6 674	1,00	6 674	100 000	22,0	1,00	22,0	436
1.7	200	2,40	4 709	6,9	84-3s	3,00	1,20	0,084	6 674	1,00	6 674	100 000	22,0	1,00	22,0	436
2.1	200	1,80	3 532	5,9	84-3s	3,20	1,20	0,084	6 591	1,00	6 591	100 000	22,0	1,00	22,0	439
2.2	200	2,40	4 709	6,9	84-3s	3,20	1,20	0,084	6 591	1,00	6 591	100 000	22,0	1,00	22,0	439
3.1	200	1,80	3 532	5,9	84-3s	3,20	1,20	0,084	7 027	1,00	7 027	100 000	22,0	1,00	22,0	439
3.2	200	2,10	4 120	6,4	84-3s	3,20	1,20	0,084	7 027	1,00	7 027	100 000	22,0	1,00	22,0	439
3.3	200	2,40	4 709	6,9	84-3s	3,20	1,20	0,084	7 027	1,00	7 027	100 000	22,0	1,00	22,0	439

	Tvärsnittsdata					Styvhet			Lastkapacitet		Plastisk stöt		
Skivnr.	A	W	I	β	m_{balk}	k_b	k_s	k_{tot}	M_{Rd}	R_{Rd}	κ_{mF}	m_2	$W_{y,red}$
	[m^2]	[m^3]	[m^4]	[-]	[kg]	[N/m]	[N/m]	[N/m]	[kNm]	[kN]	[-]	[kg]	[J]
1.1	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	132	7,0E+05	1,1E+10	7,0E+05	31,0	41,4	0,486	64,1	446
1.2	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	132	7,0E+05	1,1E+10	7,0E+05	31,0	41,4	0,486	64,1	892
1.3	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	132	7,0E+05	1,1E+10	7,0E+05	31,0	41,4	0,486	64,1	1 337
1.4	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	132	7,0E+05	1,1E+10	7,0E+05	31,0	41,4	0,486	64,1	1 783
1.5	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	132	7,0E+05	1,1E+10	7,0E+05	31,0	41,4	0,486	64,1	2 229
1.6	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	132	7,0E+05	1,1E+10	7,0E+05	31,0	41,4	0,486	64,1	2 675
1.7	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	132	7,0E+05	1,1E+10	7,0E+05	31,0	41,4	0,486	64,1	3 566
2.1	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	142	5,7E+05	1,1E+10	5,7E+05	31,0	38,8	0,486	68,9	2 627
2.2	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	142	5,7E+05	1,1E+10	5,7E+05	31,0	38,8	0,486	68,9	3 503
3.1	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	142	6,1E+05	1,1E+10	6,1E+05	31,0	38,8	0,486	68,9	2 627
3.2	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	142	6,1E+05	1,1E+10	6,1E+05	31,0	38,8	0,486	68,9	3 065
3.3	1,0E-01	1,4E-03	5,9E-05	1,2	142	6,1E+05	1,1E+10	6,1E+05	31,0	38,8	0,486	68,9	3 503

	Respons och kontroll				Jämförelse med försök				
Skivnr.	u_{el}	Q	Q / R_{Rd}	Kontroll	u_{max}	u_{max} / u_{el}	R_{ekv}	$f_{m,ekv}$	$f_{m,ekv} / f_{Rd}$
	[m]	[kN]	[-]		[m]	[-]	[kN]	[MPa]	[-]
1.1	0,036	25,0	**0,60**	**Ok**	0,029	0,81	20,4	10,8	0,49
1.2	0,050	35,4	**0,86**	**Ok**	0,041	0,82	29,1	15,4	0,70
1.3	0,062	43,4	**1,05**	**Ej ok!**	0,054	0,87	37,7	20,1	0,91
1.4	0,071	50,1	**1,21**	**Ej ok!**	0,063	0,89	44,5	23,7	1,08
1.5	0,080	56,0	**1,35**	**Ej ok!**	0,070	0,87	49,0	26,0	1,18
1.6	0,087	61,3	**1,48**	**Ej ok!**	0,076	0,88	53,7	28,5	1,30
1.7	0,101	70,8	**1,71**	**Ej ok!**	0,090	0,89	63,3	33,6	1,53
2.1	0,096	54,8	**1,41**	**Ej ok!**	0,089	0,93	50,9	28,9	1,31
2.2	0,111	63,3	**1,63**	**Ej ok!**	-	-	-	-	-
3.1	0,093	56,6	**1,46**	**Ej ok!**	0,084	0,91	51,5	29,2	1,33
3.2	0,100	61,2	**1,58**	**Ej ok!**	0,093	0,92	56,5	32,1	1,46
3.3	0,107	65,4	**1,68**	**Ej ok!**	-	-	-	-	-

Skivanalys

Norconsult

Uppdragsgivare: martinsons
Uppdragsnr: **Version:**

1 Bakgrund

I beräkningsgången som tagits fram av Norconsult tas inte hänsyn till skiveffekten, utan skivelementen behandlas som balkar. För att undersöka denna potentiella felkälla har en FE analys genomförts.

2 Indata

2.1 Geometri

Tre olika skivor analyseras. Tjocklek och längd är lika med 84 mm och 2800 mm för samtliga analyserade skivor.
Tre olika bredder analyseras 1.2, 2.4 och 3.6 m.

2.2 Material

Materialegenskaper definieras enligt nedan
E_{styv}=7.0 GPa
E_{vek}=0.7 GPa
ν=0
Böjstyvhet i veka riktningen antas vara en tiondel av böjstyvheten i den styva riktningen.
Poissons tal sätts till noll för förenklade analys av resultat.
Vid beräkning av böjmomentkapacitet används en medelböjhållfasthet av f_m=22 MPa

2.3 Last

P=100 kN, appliceras i modellen som en utbredd last över en 200x200 mm yta.

2.4 Randvillkor

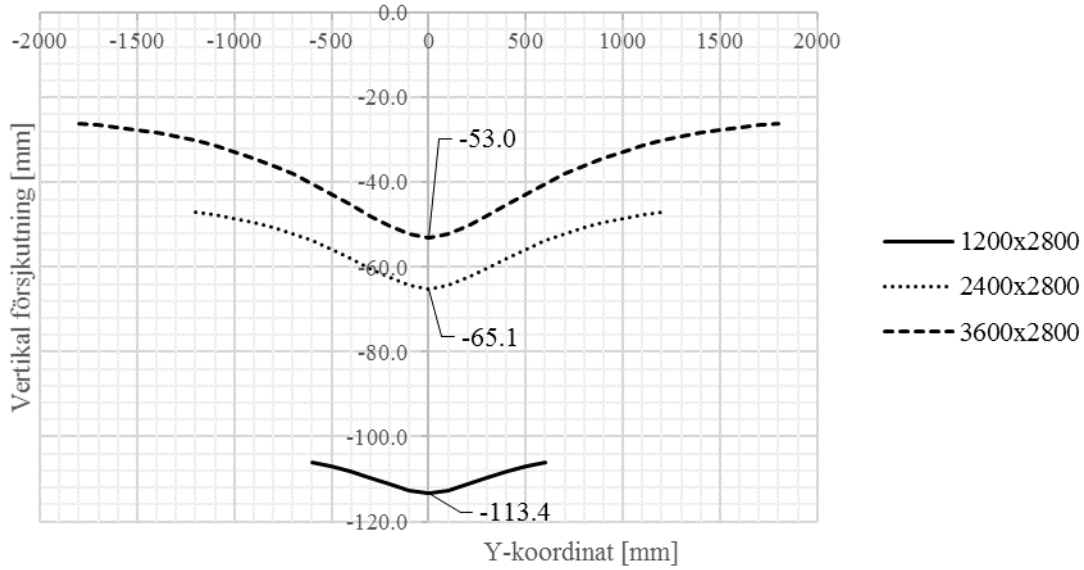
Träskivor antas vara fritt upplagda på yttrekant

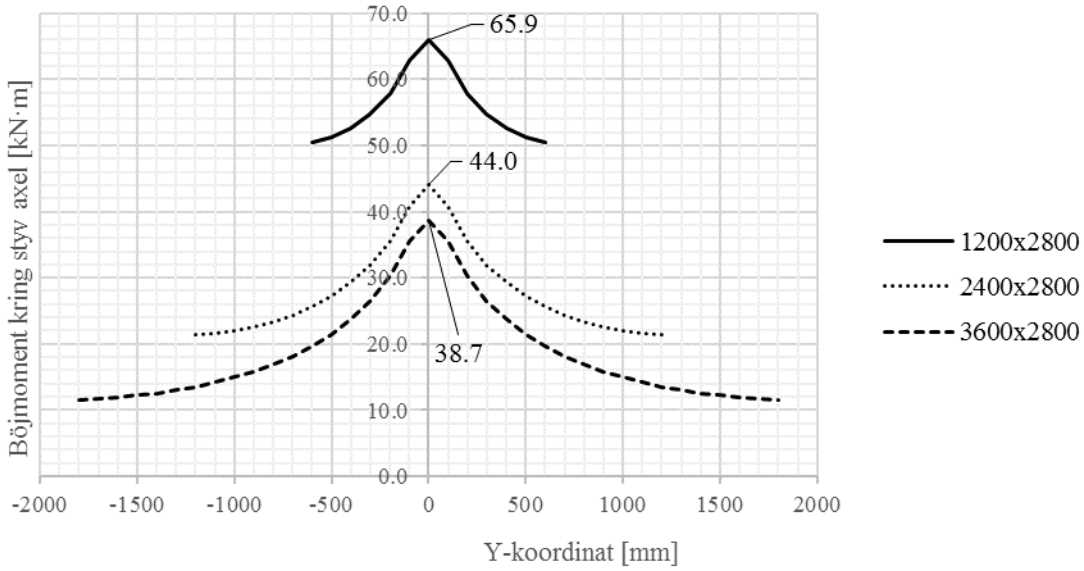
2.5 FE Analys

Modellen analyseras med skalelement i FE programmet SAP2000. Elementstorlek är 100 mm.

3 Resultat

Deformationer och moment kontrolleras i fältsnitt, se diagram nedan.
Böjmoment beräknat enligt balkteori är 70 kN*m.

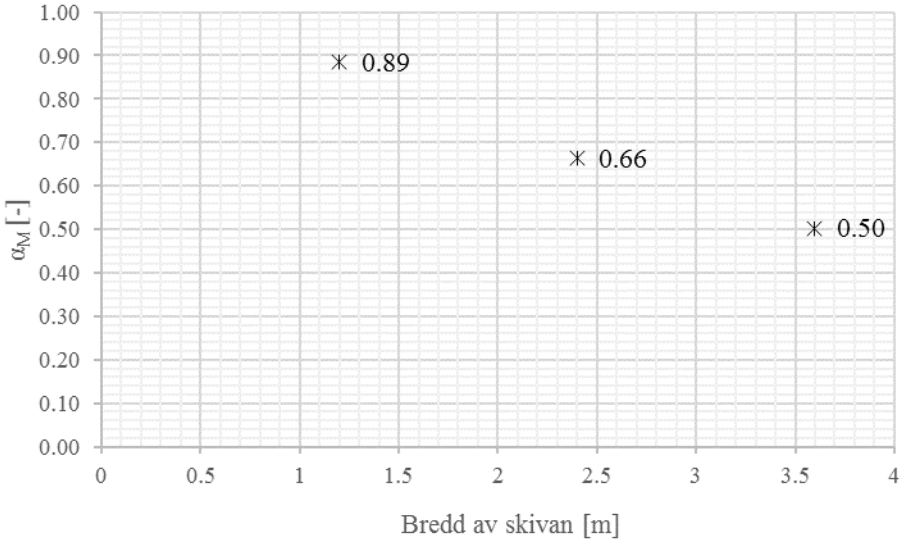




Effektiva bredden kan beräknas som max moment enligt balkteori genom max böjmoment i plattan per meter.

$b_{eff} = M_{Ed}/m_{Ed}$

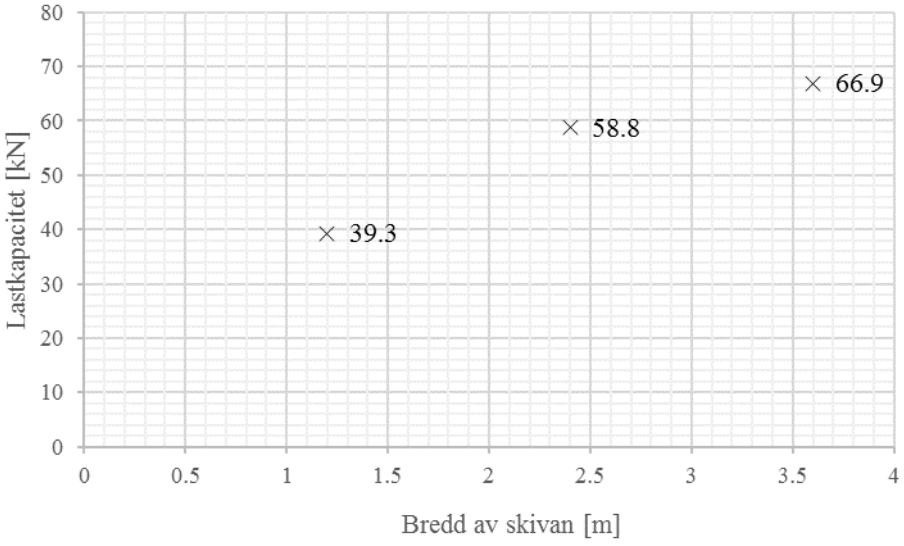
En kvot α_M kan beräknas som den effektiva bredden genom den verkliga bredden av skivan. Kvoten motsvarar hur mycket bredd av skivan får man medräkna för böjmomentskapacitet beräkning. Med en ökande bredd, så får man medräkna sig med andel av bredden. Den effektiva bredden som man kan medräkna ökar också dock.



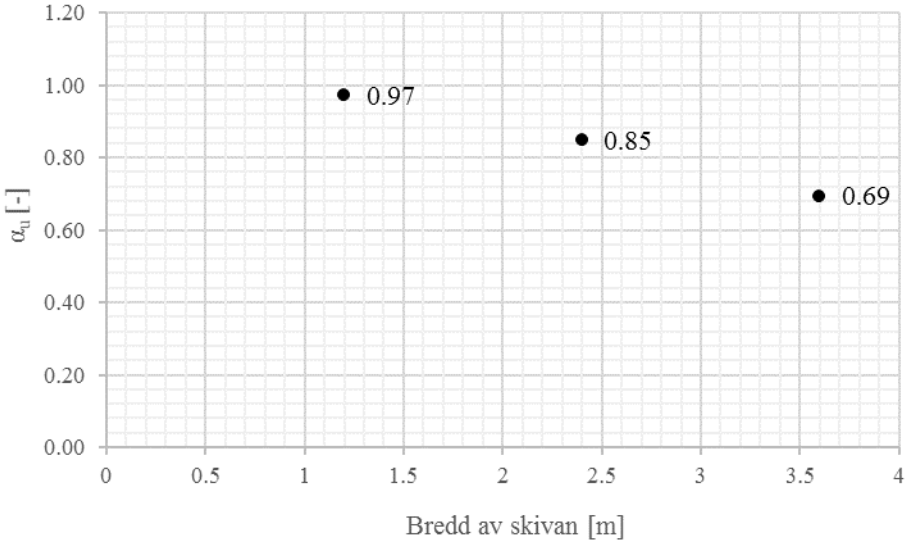
Om man räknar böjmomentskapacitet med effektiva bredden, så kan man beräkna en kapacitet för en punktlast i mitten enligt balkteori.

$P_{Rd} = 4 \cdot M_{Rd}/L$, där $M_{Rd} = 1/6 \cdot f_m \cdot b_{eff} \cdot t^2$

Effektiva bredden ökar med bredden av skivan, och så ökar också lastkapaciteten.

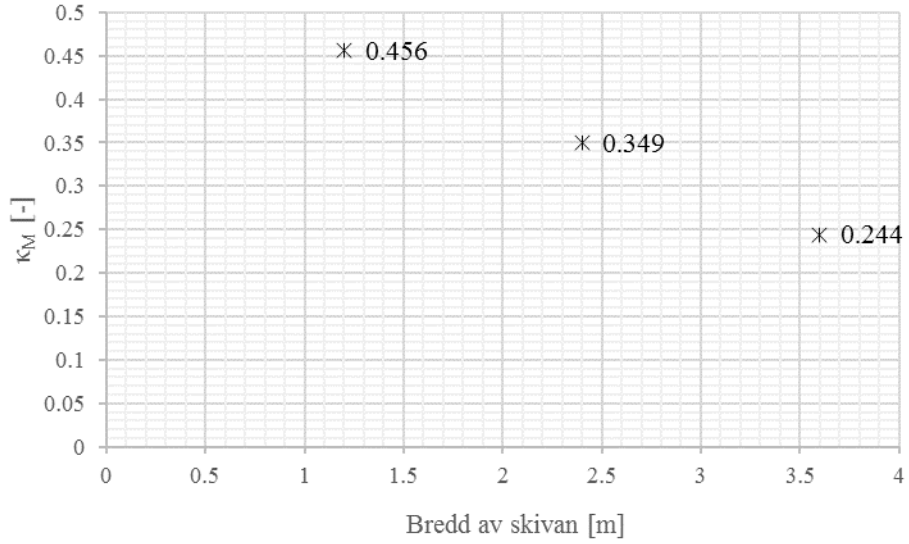


En fjäderstyvhet mot nedböjning av mittpunkten, k_{mitt}, får medräknas genom applicerade last genom erhållen nedböjning. För en fritt upplagd balk är detta styvhet $k = 48 \cdot EI/L^3$. Ekvivalent tröghetsmoment av skivan enligt balkteorin kan lösas och därifrån kan den ekvivalenta bredden för nedböjning av varje skiva medräknas. På ett liknande sätt som för böjmoment, kan en kvot α_u tas fram genom att dela den ekvivalenta bredden genom den verkliga bredden av varje skiva.



κ_M faktorn som beaktar massan av skivan som man kan medräknas för den SDOF system erhålls för varje skiva genom:

$$\kappa_M = \frac{\sum m_i \cdot {u_i}^2}{M_{tot} \cdot {u_{max}}^2}$$



För en fritt upplagd balk är κ_M lika med 0.486.

Matlabkod

Matlabkod som använts vid analys av enfrihetsgrads-och tvåfrihetsgradssystem.

Försökstillfälle 1

```
clear all

% Ingångsdata
E=7074*10^6
% Massa skiva
m1=70.5
% Massa säck
m2=200
% Fallhöjd
h=2.1
% Bredd
b=1.2
% Tjocklek skiva
h1=0.084
% Spännvidd
l=3.2
g=9.81

% Tröghetsmoment
I=(b*h1^3)/12
% Böjmotstånd
Wb=(1.2*0.084^2)/6
% Styvhet
k=(48*E*I)/l^3;
% Egenvinkelfrekvens
wn=(k/(m1+m2))^.5;
% Yttre Arbete
Wy=m2*g*h
% Hastighet kropp 2 före stöt
v=sqrt((2*Wy)/m2)
% Rörelsemängd före stöt=Implus
Imp=(m2)*v
% Reducerat Arbete efter plastisk stöt
Wred=(m2/(m2+m1))*Wy
% Impuls
Im=sqrt(Wred*2*(m1+m2))
% Deformationsberäkningar
t=0:1/1000:0.088;
```

```
tms=t*1000;
u=Imp*(1/((m1+m2)*wn))*sin(wn*t);

% Egenperiod tid

t1=((2*pi)/wn)


% Max deformation

umax=Im/((m1+m2)*wn)

% Deformation-tidsgraf

plot(tms,u,':')
xlabel('Tid [ms]')
ylabel('Def. [m]')

% Tid till maxdeformation

t12=asin(((m1+m2)*wn*umax)/Im)/wn

% Töjning

epsi=(k*umax*l)/(E*4*Wb)

% Töjningshastighet

strainrate=epsi/t12
```

Försökstillfälle 2

```
clear all


% Ingångsdata

E=8791*10^6

% Massa skiva

m1=49.8

% Massa säck

m2=200

% Fallhöjd

h=2.1

% Bredd

b=1.2

% Tjocklek skiva

h1=0.07

% Spännvidd

l=2.8

g=9.81


% Tröghetsmoment

I=(b*h1^3)/12

% Böjmotstånd

Wb=(1.2*0.084^2)/6

% Styvhet

k=(48*E*I)/l^3;

% Egenvinkelfrekvens
```

```
wn=(k/(m1+m2))^.5;

% Yttre Arbete

Wy=m2*g*h

% Hastighet kropp 2 före stöt

v=sqrt((2*Wy)/m2)

% Rörelsemängd före stöt=Implus

Imp=(m2)*v

% Reducerat Arbete efter plastisk stöt

Wred=(m2/(m2+m1))*Wy

% Impuls

Im=sqrt(Wred*2*(m1+m2))

% Deformationsberäkningar

t=0:1/1000:0.088;
tms=t*1000;
u=Imp*(1/((m1+m2)*wn))*sin(wn*t);

% Egenperiod tid

t1=((2*pi)/wn)


% Max deformation

umax=Im/((m1+m2)*wn)

% Deformation-tidsgraf

plot(tms,u,':')
xlabel('Tid [ms]')
ylabel('Def. [m]')

% Tid till maxdeformation

t12=asin(((m1+m2)*wn*umax)/Im)/wn

% Töjning

epsi=(k*umax*l)/(E*4*Wb)

% Töjningshastighet

strainrate=epsi/t12
```

SDOF vs 2DOF

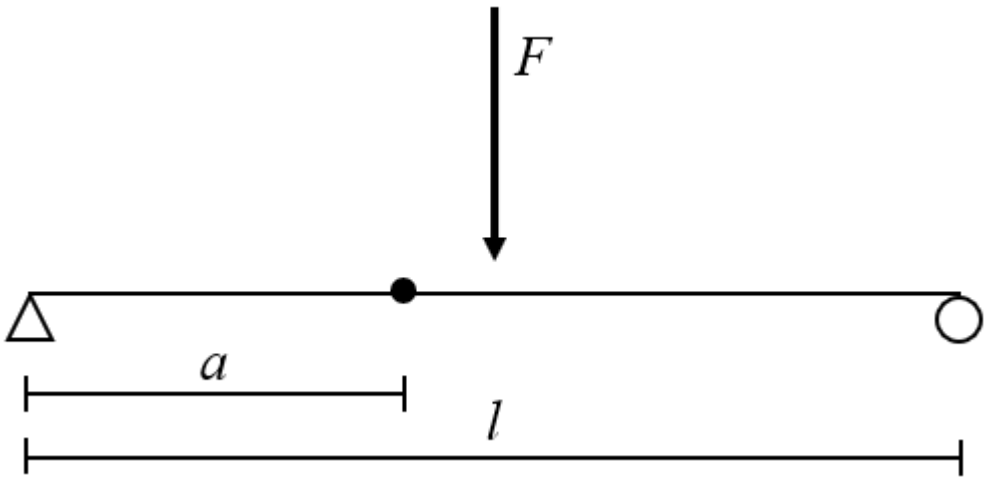
```
clear all


% Ingångsdata

E=7074*10^6

% Massa skiva

m1=70.5

% Massa säck

m2=200

% Fallhöjd

h=2.1

% Bredd

b=1.2

% Tjocklek skiva
```

```
h1=0.084

% Spännvidd

l=3.2

g=9.81


% Tröghetsmoment

I=(b*h1^3)/12

% Böjmotstånd

Wb=(1.2*0.084^2)/6

% Styvhet

k=(48*E*I)/l^3;

% Egenvinkelfrekvens

wn=(k/(m1+m2))^.5;

% Yttre Arbete

Wy=m2*g*h

% Hastighet kropp 2 före stöt

v=sqrt((2*Wy)/m2)

% Rörelsemängd före stöt=Implus

Imp=(m2)*v

% Reducerat Arbete efter plastisk stöt

Wred=(m2/(m2+m1))*Wy

% Impuls

Im=sqrt(Wred*2*(m1+m2))

% Deformationsberäkningar

t=0:1/1000:0.088;
tms=t*1000;
u=Imp*(1/((m1+m2)*wn))*sin(wn*t);

% Egenperiod tid

t1=((2*pi)/wn)


% Max deformation

umax=Im/((m1+m2)*wn)


% Tid till maxdeformation

t12=asin(((m1+m2)*wn*umax)/Im)/wn

% Töjning

epsi=(k*umax*l)/(E*4*Wb)

% Töjningshastighet

strainrate=epsi/t12




%% Import data from spreadsheet
% Script for importing data from the following spreadsheet:
%
%       Workbook:   /Users/adamhenrysson/Library/Containers/com.apple.mail/Data/Library/Mail
Downloads/221662DF-D413-455C-9998-27009D720C3B/2DOF - Balk_MJ_170208.xlsx
%    Worksheet: RÃ¤kning
%
```

```
% To extend the code for use with different selected data or a different
% spreadsheet, generate a function instead of a script.

% Auto-generated by MATLAB on 2017/10/10 07:42:27

%% Import the data
[~,                                ~,                                raw]                                =
xlsread('/Users/adamhenrysson/Library/Containers/com.apple.mail/Data/Library/Mail
Downloads/221662DF-D413-455C-9998-27009D720C3B/2DOF - Balk_MJ_170208.xlsx','RÃ¤kning');
raw = raw(11:4010,[3,27]);

%% Create output variable
data = reshape([raw{:}],size(raw));

%% Allocate imported array to column variable names
t6 = 1000*data(:,1);
u8 = data(:,2);

%% Clear temporary variables
clearvars data raw;

% Graf SDOF vs 2DOF
figure; hold on
a1=plot(t6,u8,'color','r'); M1='2DOF' ;
a2=plot(tms,u,'-.','color','b'); M2='SDOF';
legend([a1;a2], [M1; M2]);
xlabel('Tid [ms]')
ylabel('Def. [m]')
title('SDOF vs 2DOF')
```

Kompensation för deformationsmätningar

Vid de statiska försöken kunde deformationerna för skiva 2–5 inte mätas exakt i mitten på grund av försöksuppställningen. Deformationerna mättes istället 200 mm från fältmitt och för att beräkningarna skulle bli korrekta korrigerades det för detta i efterhand. Nedan följer tillvägagångssättet för hur faktorn 0,97 togs fram.



$$\alpha = \frac{a}{l}$$

$$u_a = \frac{l^3}{48EI} \cdot \alpha(3 - 4\alpha^2) = \gamma_a \cdot \frac{l^3}{48EI}$$

där $\frac{l^3}{48EI}$ är definitionen i fältmitt och $\gamma_a = \alpha(3 - 4\alpha^2)$

$$l = 2{,}8\ m$$

$$a = \frac{2{,}8}{2} - 0{,}2 = 1{,}2\ m$$

$$\alpha = \frac{a}{l} = \frac{1{,}2}{2{,}8} = 0{,}43$$

$$\gamma_a = 0{,}43(3 - 4 \cdot 0{,}43^2) = 0{,}97$$

Beräkningsark för försöksomgång 2

	Last från fallvikt				Geometri			Material							
Skivnr.	m_1	H	W_y	v_0	Skiva	Spv	b	h	E_{sta}	DIF_E	E_{dyn}	G	$f_{m,sta}$	DIF_f	$f_{m,dyn}$	$\rho_{trä}$
	[kg]	[m]	[J]	[m/s]		[m]	[m]	[m]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[kg/m^3]
1.1	200	0,60	1 177	3,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 169	1,00	8 169	100 000	30,4	1,00	30,4	436
1.2	200	0,90	1 766	4,2	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 169	1,00	8 169	100 000	30,4	1,00	30,4	436
1.3	200	1,20	2 354	4,9	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 169	1,00	8 169	100 000	30,4	1,00	30,4	436
1.4	200	1,50	2 943	5,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 169	1,00	8 169	100 000	30,4	1,00	30,4	436
1.5	200	1,80	3 532	5,9	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 169	1,00	8 169	100 000	30,4	1,00	30,4	436
1.6	200	2,00	3 924	6,3	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 169	1,00	8 169	100 000	30,4	1,00	30,4	436
1.7	200	2,20	4 316	6,6	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 169	1,00	8 169	100 000	30,4	1,00	30,4	436
2.1	200	1,20	2 354	4,9	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 279	1,00	8 279	100 000	30,4	1,00	30,4	439
2.2	200	1,50	2 943	5,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 279	1,00	8 279	100 000	30,4	1,00	30,4	439
3.1	200	1,20	2 354	4,9	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 205	1,00	8 205	100 000	30,4	1,00	30,4	439
3.2	200	1,50	2 943	5,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 205	1,00	8 205	100 000	30,4	1,00	30,4	439
3.3	200	1,80	3 532	5,9	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 205	1,00	8 205	100 000	30,4	1,00	30,4	439
4,1	200	1,50	2 943	5,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	7 856	1,00	7 856	100 000	30,4	1,00	30,4	439
4,2	200	1,50	2 943	5,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	7 856	1,00	7 856	100 000	30,4	1,00	30,4	439
4,3	200	1,50	2 943	5,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	7 856	1,00	7 856	100 000	30,4	1,00	30,4	439
4,4	200	1,65	3 237	5,7	70-3s	2,80	1,20	0,070	7 856	1,00	7 856	100 000	30,4	1,00	30,4	439
4,5	200	1,80	3 532	5,9	70-3s	2,80	1,20	0,070	7 856	1,00	7 856	100 000	30,4	1,00	30,4	439
4,6	200	2,00	3 924	6,3	70-3s	2,80	1,20	0,070	7 856	1,00	7 856	100 000	30,4	1,00	30,4	439
4.7	200	2,2	4316,4	6,5699	70-3s	2,80	1,20	0,070	7 856	1,00	7 856	100 000	30,4	1,00	30,4	439
5,1	200	1,50	2 943	5,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 667	1,00	8 667	100 000	30,4	1,00	30,4	439
5,2	200	1,50	2 943	5,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 667	1,00	8 667	100 000	30,4	1,00	30,4	439
5,3	200	1,50	2 943	5,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 667	1,00	8 667	100 000	30,4	1,00	30,4	439
5,4	200	1,80	3 532	5,9	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 667	1,00	8 667	100 000	30,4	1,00	30,4	439
5,5	200	2,10	4 120	6,4	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 667	1,00	8 667	100 000	30,4	1,00	30,4	439
5,6	200	2,30	4 513	6,7	70-3s	2,80	1,20	0,070	8 667	1,00	8 667	100 000	30,4	1,00	30,4	439

	Tvärsnittsdata					Styvhet			Lastkapacitet			Plastisk stöt		
Skivnr.	A	W	I	β	m_{balk}	k_b	k_s	k_{tot}	M_{Rd}	fm ekv	R_{Rd}	κ_{mF}	m_2	$W_{y,red}$
	[m^2]	[m^3]	[m^4]	[-]	[kg]	[N/m]	[N/m]	[N/m]	[kNm]		[kN]	[-]	[kg]	[J]
1.1	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,1E+05	1,0E+10	6,1E+05	29,8		42,6	0,486	49,8	942
1.2	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,1E+05	1,0E+10	6,1E+05	29,8		42,6	0,486	49,8	1 414
1.3	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,1E+05	1,0E+10	6,1E+05	29,8		42,6	0,486	49,8	1 885
1.4	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,1E+05	1,0E+10	6,1E+05	29,8		42,6	0,486	49,8	2 356
1.5	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,1E+05	1,0E+10	6,1E+05	29,8		42,6	0,486	49,8	2 827
1.6	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,1E+05	1,0E+10	6,1E+05	29,8		42,6	0,486	49,8	3 141
1.7	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,1E+05	1,0E+10	6,1E+05	29,8		42,6	0,486	49,8	3 456
2.1	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,2E+05	1,0E+10	6,2E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	1 882
2.2	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,2E+05	1,0E+10	6,2E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 352
3.1	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,2E+05	1,0E+10	6,2E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	1 882
3.2	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,2E+05	1,0E+10	6,2E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 352
3.3	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,2E+05	1,0E+10	6,2E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 823
4,1	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	5,9E+05	1,0E+10	5,9E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 352
4,2	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	5,9E+05	1,0E+10	5,9E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 352
4,3	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	5,9E+05	1,0E+10	5,9E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 352
4,4	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	5,9E+05	1,0E+10	5,9E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 588
4,5	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	5,9E+05	1,0E+10	5,9E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 823
4,6	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	5,9E+05	1,0E+10	5,9E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	3 136
4.7	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	5,9E+05	1,0E+10	5,9E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	3 450
5,1	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,5E+05	1,0E+10	6,5E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 352
5,2	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,5E+05	1,0E+10	6,5E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 352
5,3	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,5E+05	1,0E+10	6,5E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 352
5,4	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,5E+05	1,0E+10	6,5E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	2 823
5,5	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,5E+05	1,0E+10	6,5E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	3 293
5,6	8,4E-02	9,8E-04	3,4E-05	1,2	103	6,5E+05	1,0E+10	6,5E+05	29,8		42,6	0,486	50,2	3 607

	Respons och kontroll				Jämförelse med försök				
Skivnr.	u_{el}	Q	Q / R_{Rd}	Kontroll	u_{max}	u_{max} / u_{el}	R_{ekv}	$f_{m,ekv}$	$f_{m,ekv}$ / f_{Rd}
	[m]	[kN]	[-]		[m]	[-]	[kN]	[MPa]	[-]
1.1	0,055	34,0	**0,80**	**Ok**	0,045	0,81	27,6	19,7	0,65
1.2	0,068	41,6	**0,98**	**Ok**	0,051	0,75	31,2	22,3	0,73
1.3	0,078	48,1	**1,13**	Ej ok!	0,053	0,68	32,5	23,2	0,76
1.4	0,088	53,7	**1,26**	Ej ok!	0,067	0,76	41,0	29,3	0,96
1.5	0,096	58,9	**1,38**	Ej ok!	0,075	0,78	45,9	32,8	1,08
1.6	0,101	62,0	**1,46**	Ej ok!	0,085	0,84	52,1	37,2	1,22
1.7	0,106	65,1	**1,53**	Ej ok!	0,104	0,98	63,7	45,5	1,50
2.1	0,078	48,3	**1,14**	Ej ok!	0,066	0,85	41,2	29,4	0,97
2.2	0,087	54,0	**1,27**	Ej ok!	0,086	0,98	53,1	37,9	1,25
3.1	0,078	48,1	**1,13**	Ej ok!	0,065	0,82	39,7	28,3	0,93
3.2	0,087	53,8	**1,26**	Ej ok!	0,074	0,85	45,7	32,6	1,07
3.3	0,096	58,9	**1,38**	Ej ok!	0,094	0,98	57,8	41,3	1,36
4,1	0,089	52,6	**1,24**	Ej ok!	0,072	0,80	42,3	30,2	0,99
4,2	0,089	52,6	**1,24**	Ej ok!	0,071	0,79	41,8	29,9	0,98
4,3	0,089	52,6	**1,24**	Ej ok!	0,068	0,76	40,2	28,7	0,95
4,4	0,094	55,2	**1,30**	Ej ok!	0,065	0,69	38,3	27,4	0,90
4,5	0,098	57,7	**1,36**	Ej ok!	0,071	0,72	41,5	29,7	0,98
4,6	0,103	60,8	**1,43**	Ej ok!	0,080	0,77	46,8	33,5	1,10
4.7	0,108	63,8	**1,50**	Ej ok!	-	-	-	-	-
5,1	0,085	55,3	**1,30**	Ej ok!	0,065	0,76	42,2	30,2	0,99
5,2	0,085	55,3	**1,30**	Ej ok!	0,057	0,67	37,0	26,5	0,87
5,3	0,085	55,3	**1,30**	Ej ok!	0,051	0,60	33,1	23,7	0,78
5,4	0,093	60,6	**1,42**	Ej ok!	0,072	0,77	46,8	33,4	1,10
5,5	0,101	65,4	**1,54**	Ej ok!	0,079	0,78	51,3	36,7	1,21
5,6	0,105	68,5	**1,61**	Ej ok!	0,095	0,90	61,7	44,1	1,45

Försöksdata vid försöksomgång 1

Respons Stötlastförsök

Skiva nr:	Försöksnr	Datum	Brott ja/nej (-)	Nedöjn givare 1 100 mm från kant (mm)	Nedöjn givare 2 mitt på bredd (mm)	Nedöjn givare 3 100 mm från kant (mm)	Medel (mm)	Kommentar
1	1.1	2017-02-03	nej	34	29	24	29	
1	1.2	2017-02-03	nej	40	42	42	41	
1	1.3	2017-02-03	nej	55	54	52	54	
1	1.4	2017-02-03	nej	67	64	59	63	
1	1.5	2017-02-03	nej	68	71	70	70	
1	1.6	2017-02-03	nej	75	77	77	76	
1	1.7	2017-02-03	Ja	85	85	100	90	Brott vid kant, läge 3, fortfarande lastupptagande, representativ som "brotthöjd"?
2	2.1	2017-02-06	Ja	96	90	81	89	Initialt brott, fortfarande lasttagande
2	2.2	2017-02-06	Ja	-	-	-		Rejält brott, max last passerad
3	3.1	2017-02-06	Nej	86	85	82	84	
3	3.2	2017-02-06	Nej	90	94	94	93	
3	3.3	2017-02-06	Ja	-	-	-		Rejält brott, maxlast passerad
							0	
							0	

Försöksdata vid försöksomgång 2

Respons Stötlastförsök

Skiva nr:	Försöksnr	Datum	Brott ja/nej (-)	Nedöjn givare 1 100 mm från kant (mm)	Nedöjn givare 2 mitt på bredd (mm)	Nedöjn givare 3 100 mm från kant (mm)	Fallhöjd m	Medel (mm)	Kommentar
1	1.1	24/10/17		44	48	44	0,6	45	
1	1.2	24/10/17		49	54	50	0,9	51	
1	1.3	24/10/17		49	54	56	1,2	53	säck något sne till höger
1	1.4	24/10/17		61	70	71	1,5	67	hoppade mkt i sidled
1	1.5	24/10/17		70	77,5	76	1,8	75	
1	1.6	24/10/17		83	88,5	84	2	85	
1	1.7	24/10/17	ja	90	100	123	2,2	104	rejält brott, def missvisande, brott först i höger sida
2	2.1	24/10/17		76	69	54	1,2	66	sne deformation, sne träff??
2	2.2	24/10/17	ja	109	84,5	63	1,5	86	brott vänster
3	3,1	24/10/17		63	67,5	63	1,2	65	
3	3,2	24/10/17		72	77,5	73	1,5	74	fingerskarvsbrott i mitt
3	3,3	24/10/17		111	92	79	1,8	94	brott vänster, fortf. Lasttagande
4	4,1	24/10/17		65	75,5	75	1,5	72	träff lite till höger
4	4,2	24/10/17		71	76	66	1,5	71	litet fingerskarvsbrott mitt, fortf lasttagande
4	4,3	24/10/17		66	73	66	1,5	68	
4	4,4	24/10/17		62	70,5	61	1,65	65	
4	4,5	24/10/17		68	76,5	67	1,8	71	svampsäck, dämpning från film
4	4,6	24/10/17		73	88,5	77	2	80	
4	4.7	24/10/17	ja				2,2		brott
5	5,1	24/10/17		58	68	69	1,5	65	
5	5,2	24/10/17		58	60	52	1,5	57	
5	5,3	24/10/17		52	53,5	47	1,5	51	svampsäck, dämpning
5	5,4	24/10/17		72,5	75	67	1,8	72	
5	5.5	24/10/17		77	83,5	77	2,1	79	
5	5.6	24/10/17	ja	79	88,5	116	2,3	95	brott

Beräkningsark för statiska försök

Test	Skiva	Spv [m]	b [m]	h [m]	Tryck [Bar]	Area tryck [m2]	Korr. faktor [-]	last [N]	Givare 1 10cm från kant	Givare 2 48 cm från kant	Givare 3 10 cm från kant	A [m2]	W [m3]	I [m4]	Fältmätt korr. faktor [-]	styvhet [N/m]	E-modul [MPa]	Spänning [MPa]
1.1	70-3s	2.80	1.20	0,070	13.7	0.004	0.78	3861	5.0	5.0	5.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	772255,85	9988	2.8
1.2	70-3s	2.80	1.20	0,070	23.0	0.004	0.78	6482	10.0	13,0	12.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	555637,68	7186	4.6
1.3	70-3s	2.80	1.20	0,070	41.2	0.004	0.78	11612	-	20.0	17.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	627677	8118	8.3
1.4	70-3s	2.80	1.20	0,070	54.9	0.004	0.78	15473	-	26,5	23,0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	625184	8086	11.1
1.5	70-3s	2.80	1.20	0,070	125,0	0.004	0.78	35231	-	-	-	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	-	-	25,2
Test	Skiva	Spv [m]	b [m]	h [m]	Tryck [Bar]	Area tryck [m2]	Korr. faktor [-]	last [N]	Givare 1 10cm från kant	Givare 2 48 cm från kant	Givare 3 10 cm från kant	A [m2]	W [m3]	I [m4]	Fältmätt korr. faktor [-]	styvhet [N/m]	E-modul [MPa]	Spänning [MPa]
2.1	70-3s	2.80	1.20	0,070	13.0	0.004	0.78	3664	5.0	-	6.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	666180	8616	2.6
2.2	70-3s	2.80	1.20	0,070	28.0	0.004	0.78	7892	14,0	-	13.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	584568	7560	5.6
2.3	70-3s	2.80	1.20	0,070	40.0	0.004	0.78	11274	17.0	-	18.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	644218	8332	8.1
2.4	70-3s	2.80	1.20	0,070	55.0	0.004	0.78	15501	24.0	-	25.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	632714	8183	11.1
2.5	70-3s	2.80	1.20	0,070	170,0	0.004	0.78	47914	-	-	-	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	-	-	34,2
Test	Skiva	Spv [m]	b [m]	h [m]	Tryck [Bar]	Area tryck [m2]	Korr. faktor [-]	last [N]	Givare 1 10cm från kant	Givare 2 48 cm från kant	Givare 3 10 cm från kant	A [m2]	W [m3]	I [m4]	Fältmätt korr. faktor [-]	styvhet [N/m]	E-modul [MPa]	Spänning [MPa]
3.1	70-3s	2.80	1.20	0,070	12.8	0.004	0.78	3608	7,0	-	7,0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	515374	6666	2.6
3.2	70-3s	2.80	1.20	0,070	26.0	0.004	0.78	7328	12,0	-	12,0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	610665	7898	5.2
3.3	70-3s	2.80	1.20	0,070	40.0	0.004	0.78	11274	18.0	-	17.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	644218	8332	8.1
3.4	70-3s	2.80	1.20	0,070	55.0	0.004	0.78	15501	25,0	-	24.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	632714	8183	11.1
3.5	70-3s	2.80	1.20	0,070	145,0	0.004	0.78	40868	-	-	-	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	-	-	29,2
Test	Skiva	Spv [m]	b [m]	h [m]	Tryck [Bar]	Area tryck [m2]	Korr. faktor [-]	last [N]	Givare 1 10cm från kant	Givare 2 48 cm från kant	Givare 3 10 cm från kant	A [m2]	W [m3]	I [m4]	Fältmätt korr. faktor [-]	styvhet [N/m]	E-modul [MPa]	Spänning [MPa]
4.1	70-3s	2.80	1.20	0,070	13.0	0.004	0.78	3664	5.0	-	4.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	814219	10531	2.6
4.2	70-3s	2.80	1.20	0,070	27.0	0.004	0.78	7610	11.0	-	10.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	724745	9373	5.4
4.3	70-3s	2.80	1.20	0,070	40.0	0.004	0.78	11274	17.0	-	16.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	683261	8837	8.1
4.4	70-3s	2.80	1.20	0,070	55.0	0.004	0.78	15501	24,0	-	23.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	659638	8531	11.1
4.5	70-3s	2.80	1.20	0,070	182,0	0.004	0,78	51296	-	-	-	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	-	-	36,6
Test	Skiva	Spv [m]	b [m]	h [m]	Tryck [Bar]	Area tryck [m2]	Korr. faktor [-]	last [N]	Givare 1 10cm från kant	Givare 2 48 cm från kant	Givare 3 10 cm från kant	A [m2]	W [m3]	I [m4]	Fältmätt korr. faktor [-]	styvhet [N/m]	E-modul [MPa]	Spänning [MPa]
5.1	70-3s	2.80	1.20	0,070	13.0	0.004	0.78	3664	6.0	-	6.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	610665	7898	2.6
5.2	70-3s	2.80	1.20	0,070	27.0	0.004	0.78	7610	13.0	-	13.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	585371	7571	5.4
5.3	70-3s	2.80	1.20	0,070	40.0	0.004	0.78	11274	19.0	-	19.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	593358	7674	8.1
5.4	70-3s	2.80	1.20	0,070	55.0	0.004	0.78	15501	26,0	-	26.0	0.084	0.00098	0,0000343	0,97	596211	7711	11.1
5.5	70-3s	2.80	1.20	0,070	130,0	0.004	0,78	36640	-	-	-	0.084	0,00098	0,0000343	0,97	-	-	26,2