



Luftstötvågsbelastade väggar, med eller utan normalkraft

Sammanställning av experimentella resultat
och jämförelser med beräkningar

RICKARD FORSÉN

Rickard Forsén

Luftstötvågsbelastade väggar, med eller utan normalkraft

Sammanställning av experimentella resultat och jämförelser
med beräkningar

Titel	Luftstötstågsbelastade väggar, med eller utan normalkraft
Title	Blast loaded wall panels, with or without axial load
Rapportnr/Report no	FOI-R--5211---SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2021
Sidor/Pages	49 p
Kund/Customer	Fortifikationsverket
Forskningsområde	11. Vapen, Skydd och säkerhet
FoT-område	Ej FoT
Projektnr/Project no	E21404
Godkänd av/Approved by	Henric Östmark
Ansvarig avdelning	Vapen, Skydd och säkerhet

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

En sammanställning har genomförts av ett antal experimentella undersökningar av byggnadsväggars motståndsförmåga mot explosionsbelastning. De experimentella undersökningarna fokuseras på tvåsidigt upplagda armerade betongplattor. Dels beskrivs experiment med fritt upplagda icke normalkraftsbelastade väggelement i full skala och dels inspända i skala 1:4 med normalkraftsbelastning. Experimentella resultat av väggarnas utböjning och upplagsreaktion har jämförts med beräkningar baserade på enfrihetsgradsanalys. En parameter som kan påverka motståndsförmågan är axialbelastningen av väggarna. Betydelsen av axialbelastningen för utböjning och upplagsreaktioner redovisas i rapporten.

Nyckelord: Explosioner, bärande väggar, axialbelastning

Summary

A compilation has been carried out of a number of experimental studies of the resistance of building walls to explosion loads. The experimental studies focus on one-way action concrete slabs. Both experiments with simply supported elements in full scale without in-plane axial load, and elements in 1:4th scale with fixed supports and with in-plane axial load are included. Experimental results of wall deflections and support reactions have been compared with calculations based on single degree of freedom analysis. One parameter that may affect wall resistance is the in-plane axial load of the walls. The importance of in-plane axial load for deflections and support reactions is discussed.

Keywords: Explosions, load bearing walls, axial in-plane loading

Innehållsförteckning

1	Beteckningar	6
2	Inledning	7
3	Generellt om bärförmåga	8
4	Olika experimentella arbeten	9
4.1	Luftstötstågsbelastade armerade betongväggar i full skala	9
4.1.1	0,15 m tjocka väggar.....	10
4.1.2	0,20 m tjocka väggar.....	17
4.2	Luftstötstågsbelastade armerade betongväggar i skala 1:4	23
4.2.1	Svag armering	28
4.2.2	Stark armering	33
4.3	Tidigare analyser av försök med väggelement i 1/4 skala.....	39
4.4	Tryck och splitterbelastade betongväggar	39
4.5	Fyråsidigt upplagda plattor i stötstågstub	40
4.6	Tvååsidigt upplagda balkar i stötstågstub.....	40
4.7	Axialbelastade betongväggar i skala 1:2 i stötstågstub.....	40
4.8	Väggar med andra material, fullskaleförsök i provbänk.....	40
4.8.1	Luftstötstågsbelastade lättbetongväggar i full skala	40
4.8.2	Luftstötstågsbelastade sandwichväggar i full skala	40
4.8.3	Luftstötstågsbelastade tegelväggar i full skala	41
4.8.4	Sammanfattning av försöken enligt ovanstående avsnitt	41
5	Slutsatser	42
6	Referenser	47

1 Beteckningar

A_c	Area av betongtvärsnitt (mm^2)
A_s	Armeringsarea (mm^2)
A_{sc}	Tryckarmeringsarea (mm^2)
A_{st}	Dragarmeringsarea (mm^2)
A_s/A_c	Förhållande mellan armeringsarea och betongtvärsnittsarea (-)
A_{st}/A_{sc}	Förhållande mellan dragarmeringsarea och tryckarmeringsarea (-)
$R_{\max}$	Maximal upplagskraft (kN)
L	Spännvidd (mm)
W	Plattbredd (mm)
c_{st}	Täckande betongskikt för dragarmeringen (mm)
c_{sc}	Täckande betongskikt för tryckarmeringen (mm)
d	Betongtjocklek (mm)
i^+	Positiv impulstäthet (Pas)
i^-	Negativ impulstäthet (Pas)
p^+	Maximalt övertryck (kPa)
p^-	Maximalt undertryck (kPa)
t^+	Tryckets positiva varaktighet (ms)
t^-	Tryckets negativa varaktighet (ms)
t_u	Tid till maximal utböjning (ms)
$y_{\max}$	Maximal utböjning (mm)
y_{rest}	Kvarstående utböjning (mm)

2 Inledning

I olika sammanhang finns behov av att analysera verkan mot och skydd av bärande byggnadsväggar vid näraliggande detonationer av konventionella vapen, improviserade laddningar eller explosioner på grund av olyckor.

Det är därför viktigt att det finns en kapacitet att göra sådana analyser. Framför allt värdefullt är att med beräkningsverktyg kunna simulera belastning och respons för olika typer av explosioner och byggnader. Avgörande för tilliten för sådana beräkningsverktyg är att de kalibreras mot resultat från praktiska experiment.

Avsikten med föreliggande rapport är att göra en sammanställning av ett antal genomförda praktiska experiment med bärande byggnadsväggar. Sammanställningen fokuseras mot tvåsidigt upplagda armerade betongplattor. I rapporten görs jämförelser mellan experimentella resultat och beräkningsresultat med ett nyligen utvecklat program baserat på enfrihetsgradsmetoden (Wang 2021). En parameter som kan påverka responsen är storleken på den normalkraft som finns i väggen. Hänsyn till denna parameter tas i beräkningsprogrammet.

Rapporten omfattar sammanställningar av verksamheter gällande utvändigt explosionsbelastning som genomförts vid FOA/FOI i Sverige. Avsikten med beskrivna försök har varit att studera skador på grund av böjning till skillnad från skjuvning och stansning.

I följande kapitel redovisas först några generella egenskaper hos explosionsbelastade väggar. Därefter görs sammanställningar av verksamheter med ett fokus på armerad betong. För dessa väggar görs även jämförelser med resultat från beräkningsprogrammet (Wang 2021).

Slutligen sammanfattas jämförelser mellan experimentella och beräknade resultat och funna generella samband gällande utböjningar och upplagsreaktioner.

3 Generellt om bärförmåga

Beräkning av responsen hos transversalt luftstötstångsbelastade bärande byggnadsväggar är komplicerad. Utböjningen storlek och möjligheten att motstå kollaps påverkas bl.a. av:

- Vägg tjocklek. Det har också noterats vid experiment med vissa väggar av tegelmurverk att den effektiva tjockleken kan reduceras under utböjningsförloppet på grund av att bindande murstenar skjivas av.
- Spännvidd hos väggen.
- Upplagsförhållanden och randvillkor. Responsen påverkas av om väggen vid upplagen är inspänd eller fritt upplagd, om den är enkelspänd eller fyrsidigt upplagd och om den har en axiallast härrörande från ovanförliggande våningar som vid snabb belastning ger upphov till betydande masströghet. Ovanförliggande väggars transversalbelastning och utböjning kan ge upphov till en extra normalkraft. Normalkraft kan även uppkomma från ovanförliggande vånings fönsterbröstning som fungerar som en väggbalk.
- Väggens material. Olika typer av väggar kan beroende på material och uppbyggnad ha elastiskt, elastoplastiskt eller plastiskt verkningssätt. Viktiga egenskaper är tryck- och skjuvhållfastheter, liksom elasticitetsmodul.
- Armering. För betongväggar är armeringsmängd, läge i djupled samt armeringskvalitet i termer av flytgräns, brottgräns och brottförlängning viktiga parametrar.
- Kritisk utböjning d.v.s. utböjning som ger kollaps vilket bl.a. bestäms av återfjädring efter maximal utböjning. Även dämpning av väggens rörelse kan ha betydelse. Vid beräkning av utböjning kan väggens utböjningsform vara viktig och det kan skilja i utböjningsform och motståndsförmåga vid statisk respektive dynamisk belastning. Även brottmoden, böjning, böjskjuvning eller ren skjuvning är viktig.
- Belastning. Förutom ovanstående parametrar som beror på väggens utformning är naturligtvis egenskaper i belastning avgörande såsom: positivt och negativt maximaltryck, impulstätheter, samt varaktigheter; eventuella ojämnheter i belastningen över väggen; samt eventuell tryckinläckning genom fönster. Dessutom kan eventuell kombination av tryck och splitter, samt egenskaperna hos splittren ha stor betydelse.

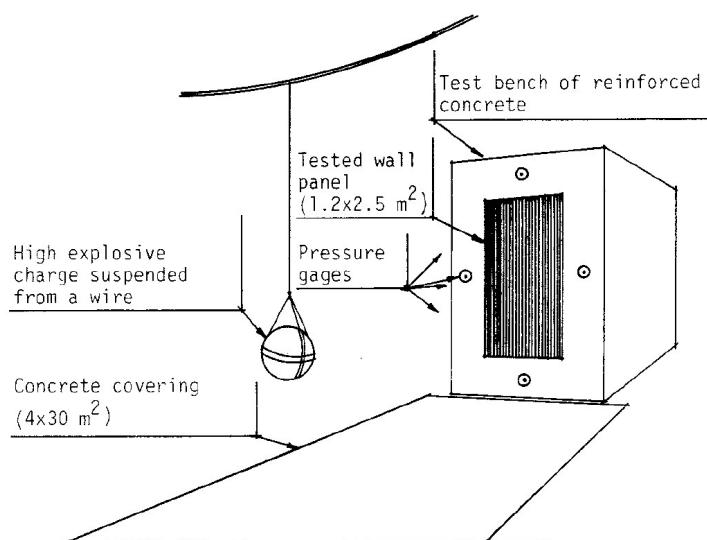
Sammantaget är en korrekt bedömning av responsen hos bärande väggar som belastas av explosionsbelastning i många fall komplicerad och svårbedömd. Det säkraste sättet att göra korrekta bedömningar är att genomföra praktiska försök med verkliga byggnader utsatta för verklig explosionslast. Arbetsbelastningen, tidsåtgången och kostnaden bli emellertid mycket hög. Även numerisk analys är en möjlig metod som emellertid också är mycket tidskrävande. Enklare analytiska beräkningsprogram, "fast running tools", kan i många fall vara till nytta även om resultaten inte ska ses som säkra absolutvärden. Resultaten kan ändå användas för uppskattningar av respons och vid jämförelser av olika parametrars betydelse.

I föreliggande rapport fokuseras enbart på enkelspända (tvåsidigt upplagda) armerade betongväggar utan eller med axialbelastning. Vidare tas ingen hänsyn till ojämn transversallast över väggytan, eller splitter i kombination med tryck.

4 Olika experimentella arbeten

I följande avsnitt redovisas ett antal genomförda praktiska försöksserier i provbänk med bärande byggnadsväggar. Tyngdpunkten läggs på beskrivning av försök med konventionellt armerad betong. För dessa görs även jämförelser med beräkningar från ett program baserat på enfrihetsgradsmetoden (Wang 2021).

Försöken med olika väggkonstruktioner som beskrivs har genomförts i en provbänk med tryckgivare i ramen runt väggarna (se Figur 1). Belastningen erhöles från detonerande laddningar på olika avstånd. Laddningarna var placerade på viss höjd över mark så att en så jämn fördelning som möjligt av trycket mot väggelementet erhöles. Parallellt har jämförande försök gjorts med "dummies", d.v.s. kraftiga betongplattor försedda med tryckgivare, monterade på väggelementens plats för noggrann bestämning av belastningsförloppet mot de provade väggarna (Edin 1986, Axelsson och Tollbom 1983, Åseborn 1988).

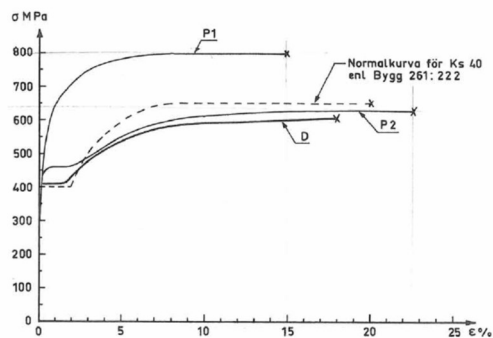


Figur 1. Försökuppställning med belastning av väggelement från detonerande explosivämnesladdningar (Forsén 1985).

4.1 Luftstötvågsbelastade armerade betongväggar i full skala

Johansson (1978) presenterar försök med slakarmerade väggar av konventionell betong med två typer av geometri, 150 respektive 200 mm tjocklek. Väggarna var enkelspända och med fri uppläggning vid provbänkens golv och tak, utan normalkraft utom ett av de 150 mm tjocka som var stumt infäst mot upplagen.

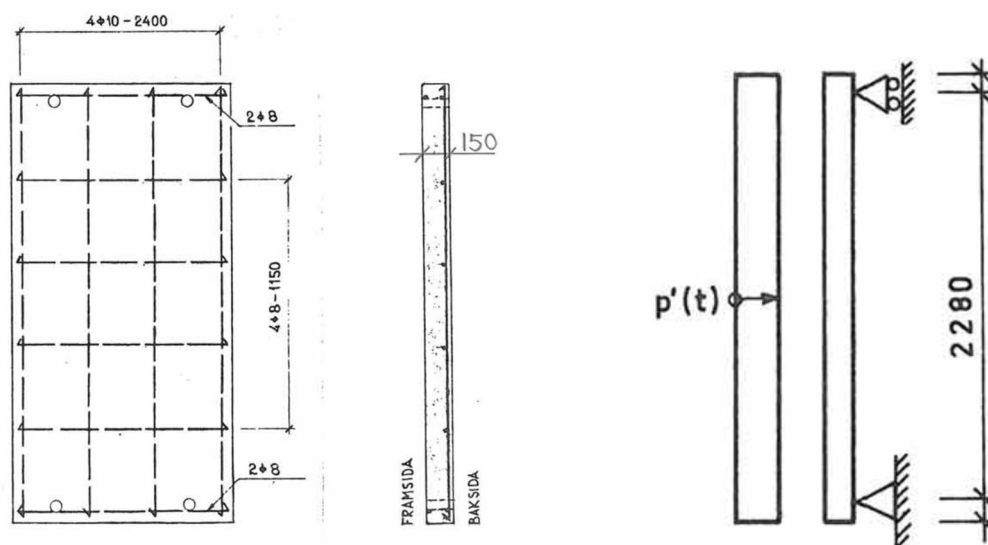
De armeringsstål som användes vid försöken varierade något. Dragprov av de olika stålen gjordes och redovisas i Figur 2.



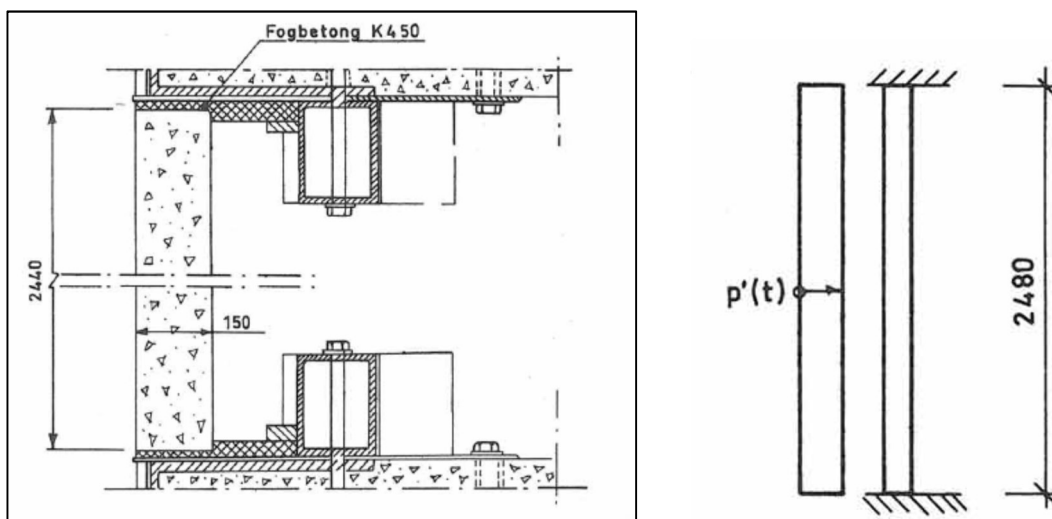
Figur 2. Spännings- töjningssamband för de använda armeringsstålen. Beteckningarna P1 och P2 gäller försök med 150 mm tjocka väggar medan D betecknar försök med 200 mm tjocka väggar.

4.1.1 0,15 m tjocka väggar

Geometri och upplagsförhållande hos de 150 mm tjocka väggarna framgår av Figur 3 och Figur 4.

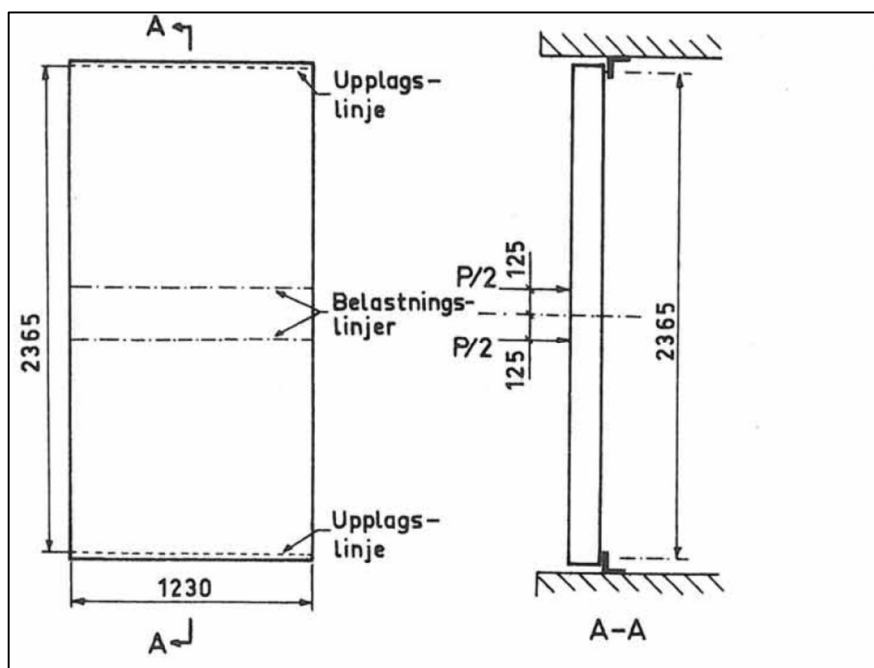


Figur 3. Grundläggande geometri i alla försök utom ett (se Figur 4).

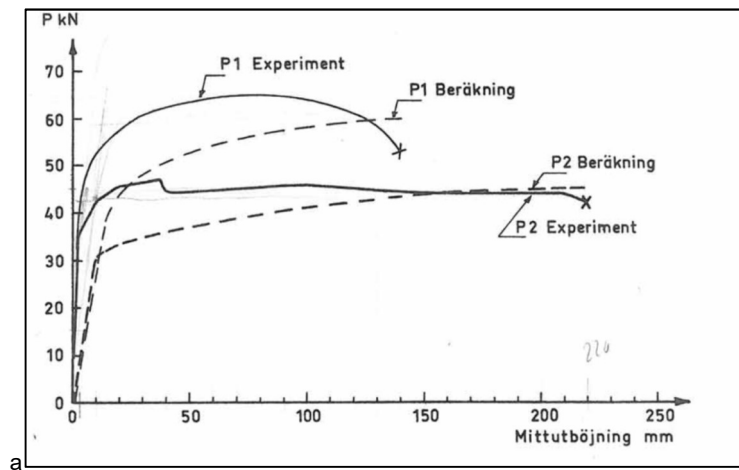


Figur 4. Upplagsutformning och grundläggande geometri vid ett av försöken som gjordes med stum infästning mot upplagen (P1d).

Förutom dynamisk belastning från detonerande laddningar framför väggarna genomfördes även ett statiskt belastningsförsök vid fri uppläggning enligt Figur 5 med resultat enligt Figur 6. De beräknade statiska motståndskurvor som presenteras i Figur 6 är de som utfördes av Johansson (1978)



Figur 5. Geometri vid statiskt belastade betongelement.



Figur 6. Beräknade och experimentellt framtagna samband mellan utböjning och last vid statiska försök (Johansson 1978).

Vid de dynamiska försöken belastades väggelementen med tryck från detonerande laddningar med massan ca 48 kg. Avstånden varierades mellan 2,75 och 8,8 m.

En sammanställning av materialdata samt belastning och resultat vid försöken redovisas i Tabell 1.

Tabell 1. Sammanställning av data vid försök med 150 mm tjocka väggar. Bedömda osäkra registreringar från originalreferensen har markerats med frågetecken.

Försöks-littera	P1b	P1c	P1e	P2b	P2c	P2d	P1d
Laddn. (kg)	47,7	47,9	50	48,2	48	50,0	47,0
Avst. (m)	8,80	6,40	2,75	8,80	5,4	5,40	5,40
Höjd (m)	1,32	1,05	1,85	1,32	0,85	0,85	0,87
p+ (kPa)	700	1700	12000	700	3000	2600	2610
i+ (Pas)	1100	1700	3700	1100	2200	1700	1760
t+ (ms)	5,5	3,6	0,7	5,5	3,0	3,4	3,4
i- (Pas)	-550	-720	-1400	-550	-830	-700	-760
t- (ms)	50	50	35	50	50	50	50
y _{max} (mm)	50	73	∞	45	139	116	42
t _u (ms)	16	28	-	18	28	39	13
y _{rest} (mm)	-	-	∞	-	-	≈ 40	≈ 5 (?)
R _{max} (kN)	158 (?) ¹	462	-	284	745	469	-
Btg-kval (MPa)	52			37			52
Densitet (kg/m ³)	2340						
Arm.-kvalitet	Ks60? ²			≈Ks40 ³			Ks60? ⁴
A _{st} (mm ²)	314						
A _{sc} (mm ²)	0						
A _s /A _c (ρ)	0,0017						
Layers	1						
L (mm)	2280						2480
W (mm)	1230						
d (mm)	153						
A _{st} /A _{sc}	∞						
c _{st} (mm)	20?						
c _{sc} (mm)	N.A.						
Anm.	Fri uppläggning						Stum

En jämförelse mellan tryckmätningar mot ”dummin” (Edin 1986) och de som uppmättes mot provbänkens ram visade att givaren i ramen på halva provbänkens ram väl representerar trycket mot väggelementen. De tryckparametrar som redovisas i Tabell 1 är de som uppmättes vid försöken i provbänkens ram (på halva provbänkhöjden).

En jämförelse mellan experimentella resultat och beräknade (Wang 2021) avseende utböjning och upplagskraft har genomförts. Vid den här typen av försök där tryckbelastningen (åtminstone den positiva fasen) är förhållandevis kort i förhållande till utböjningstiden är impulstätheten en viktigare parameter än maxtrycket. Den tryckbelastning som använts i beräkningsprogrammet är en förenkling av verkligt tryck-tidförlopp och utgår från att bibehålla positiv och negativ impulstäthet samt varaktigheter. I beräkningarna använda tryck-tidförlopp redovisas i Tabell 2.

En sammanställning över jämförelser mellan experimentella resultat och beräkningar presenteras i Tabell 3, samt Figur 7 och Figur 9. Det bör påpekas att armeringens kvalitet skiljde sig mellan försökselement typ P1 och P2 (Ks60 resp. Ks40).

¹ Gäller värde redovisat i tabell, graf anger ≈220 kN

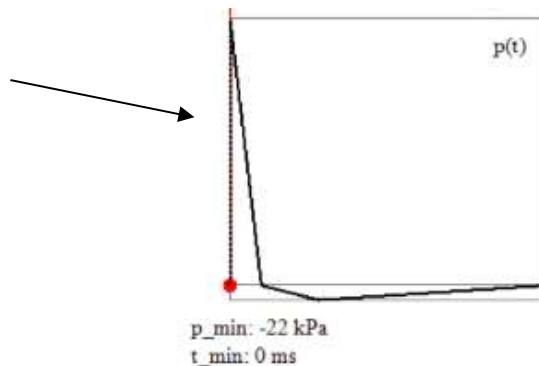
² Ingen distinkt flytplatå (brottgräns ≈ 800 MPa)

³ Flytgräns ca 450 MPa

⁴ Ingen distinkt flytplatå (brottgräns ≈ 800 MPa)

Tabell 2. Använda tryck-tidförlopp i beräkningar för 150 mm tjocka betongväggar, med exempelfigur till höger.

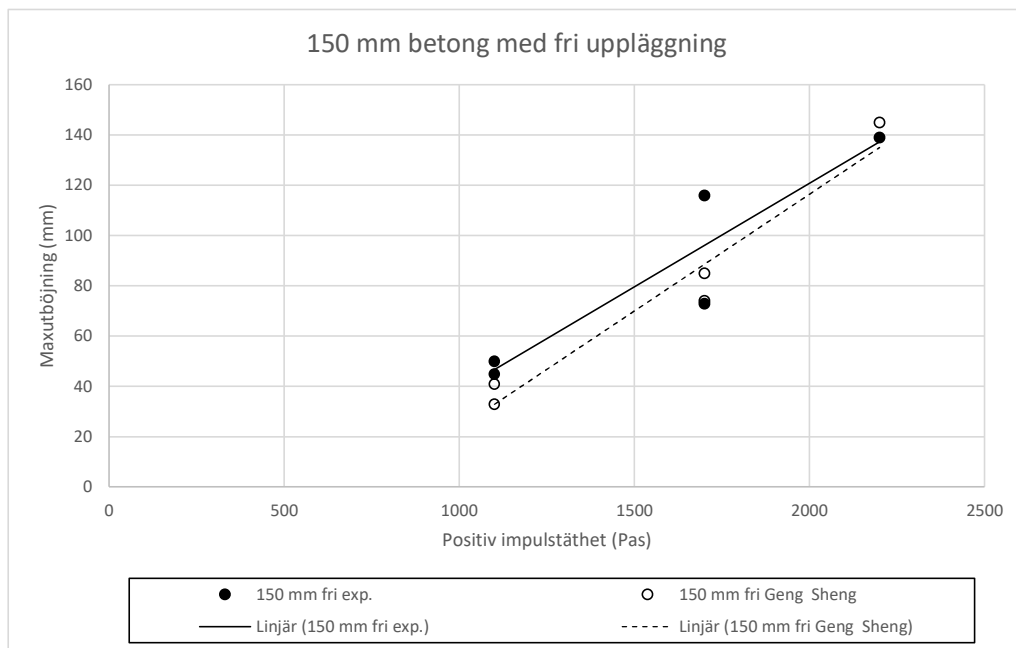
Försök	Tid (ms)	Tryck (kPa)
P1b	0	0
	0.001	400
	5.5	0
	15.5	-22
	55.5	0
P1c	0	0
	0.001	944
	3.6	0
	13.6	-29
	53.6	0
P1d	0	0
	0.001	1035
	3.4	0
	13.4	-30
	53.4	0
P2b	0	0
	0.001	400
	5.5	0
	15.5	-22
	55.5	0
P2c	0	0
	0.001	1467
	3	0
	13	-33
	53	0
P2d	0	0
	0.001	1000
	3.4	0
	13.4	-28
	53.4	0



Tabell 3. Sammanställning av experimentella och beräknade resultat för 150 mm tjocka betongväggar.

Parameter		P1b	P1c	P2b	P2c	P2d
Maxutböjn. (mm)	Experiment	50	73	45	139	116
	Beräknad	33	74	41	145	85
Max upplagskraft (kN)	Experiment	158	462	284	745	469
	Beräknad	127	280	119	433	296

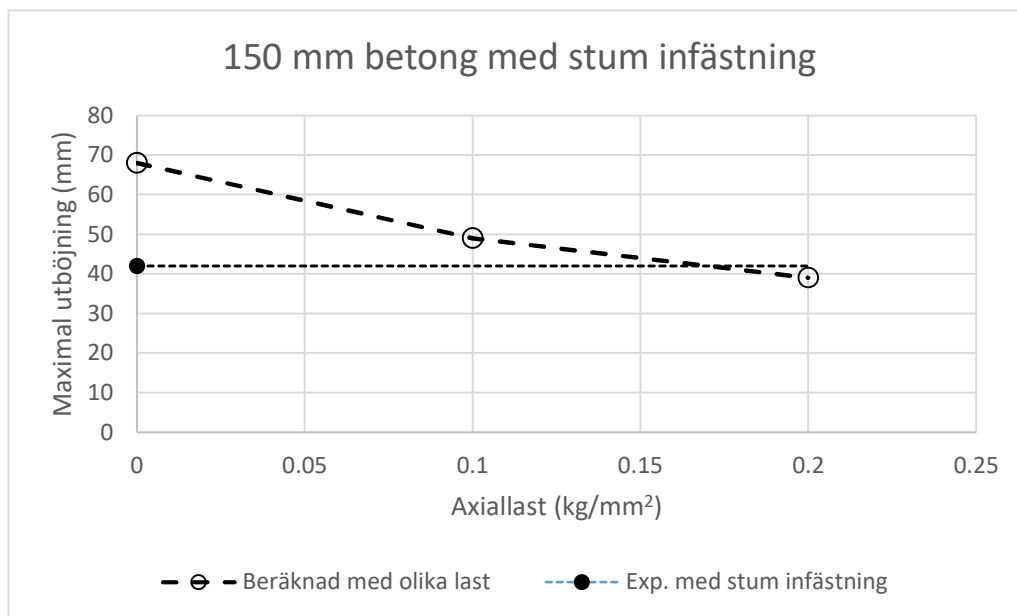
En jämförelse vad gäller maximal utböjning mellan experimentella resultat och beräkning med programmet (Wang 2021) redovisas i Figur 7.



Figur 7. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar gällande maximal utböjning.

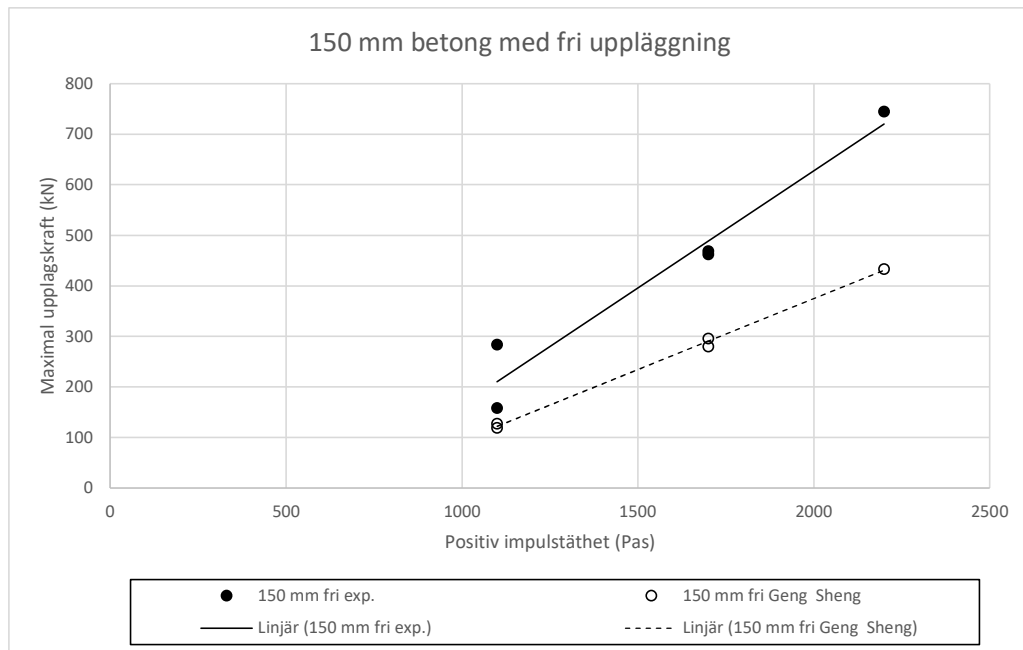
Överensstämmelsen mellan experimentella resultat och beräkningar av maximal utböjning är generellt mycket god.

Vid experimentet med stum infästning erhöles 42 mm maxutböjning. Beräkningarna ger 68 mm utan axiallast, 49 mm med antaget $0,1 \text{ kg/mm}^2$ axiallast och 39 mm med antaget $0,2 \text{ kg/mm}^2$ axiallast, se Figur 8. För just detta försök ger beräkningar med ca $0,17 \text{ kg/mm}^2$ axiallast samma maximala utböjning som vid experimentet med stum infästning.



Figur 8. Maximalutböjning vid stum infästning jämförd med beräkningar med olika axiallast antagen.

En jämförelse mellan försöksresultat och beräkningar av maximal upplagskraft redovisas i Figur 9.

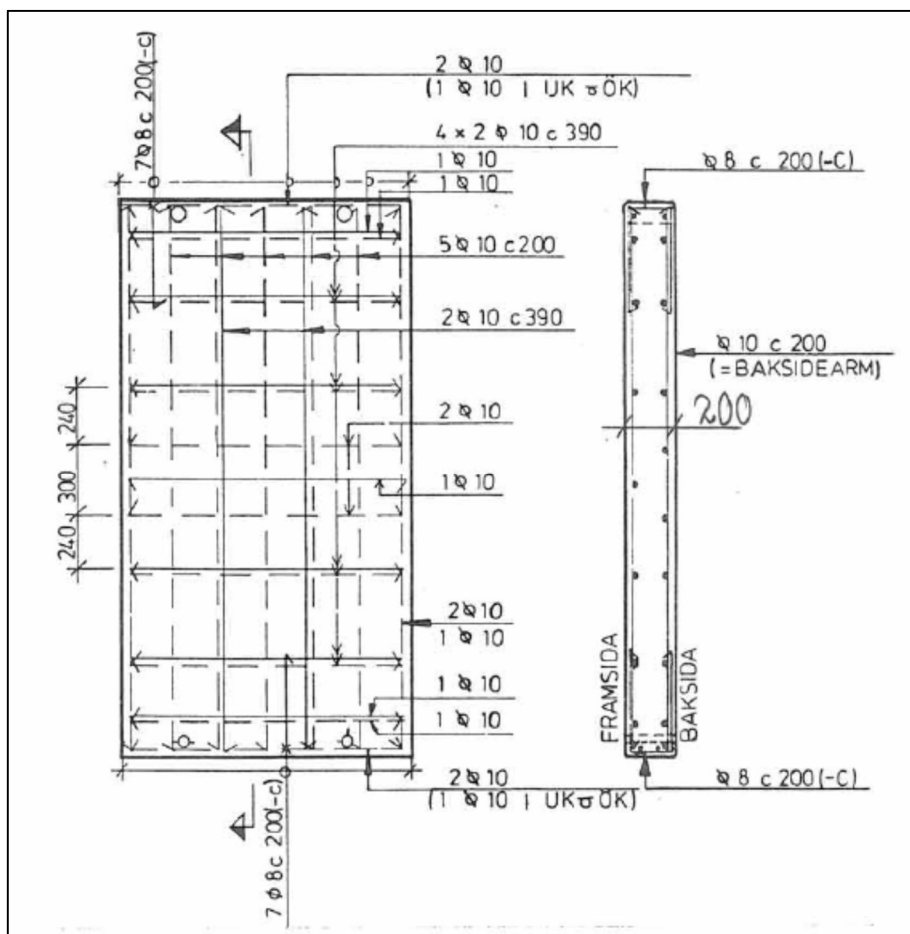


Figur 9. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar gällande maximal upplagskraft.

Jämförelsen mellan experimentella resultat och beräkningar av maximal upplagskraft visar att beräknade värden generellt är betydligt mindre än de experimentella.

4.1.2 0,20 m tjocka väggar

Geometrin hos de 200 mm tjocka väggarna framgår av Figur 10.



Figur 10. Grundläggande geometri för plattor i serie D, 200 mm tjocka dubbelarmerade plattor.

Vid de dynamiska försöken belastades väggelementen med tryck från detonerande laddningar med massan ca 48 kg. Avstånden varierades mellan 3,0 och 5,4 m.

En sammanställning av materialdata samt belastning och resultat vid försöken redovisas i Tabell 4.

Tabell 4. Sammanställning av data vid försök med 200 mm tjocka väggar. Bedömda osäkra registreringar från originalreferensen har markerats med frågetecken.

Försöks-littera	D1a	D1b	D1c	D2a	D2b	D2c	D3a	D3b	D3c
Laddn. (kg)	48,1	48,1	48,1	48,0	48,0	48,2	48,3	48,1	48,2
Avst. (m)	3,00	3,00	3,00	5,4	4,0	3,00	3,00	3,00	3,00
Höjd (m)	1,85	1,85	1,85	0,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
p+ (kPa)	6300	6800	6000	2750	3200	7500	7000	6800	7000
i+ (Pas)	2750	2500	2450	1850	2000	2560	2500	2400	2470
t+ (ms)	3,2	3,3	2,9	3,5	3,3	3,1	3,2	2,9	3,0
i- (Pas)	-500	-500	-500	-350	-400	-500	-500	-500	-500
t- (ms)	22,5	20	19,5	15	16	20,6	20	19	19,7
y _{max} (mm)	98	92	96	53	55	79	77	78	95
t _u (ms)	25	25	27	22	22	25	25	22	27
y _{rest} (mm)	≈70	≈60	≈65	≈40	≈25	≈55	-	≈50	≈70
R _{max} (kN)	904	633	734	347	511	734	752	804	693
Btg-kval (MPa)	25,9								
Densitet (kg/m ³)	2340								
Arm.-kvalitet	Ks40								
A _{st} (mm ²)	550								
A _{sc} (mm ²)	314								
A _s /A _c (ρ)	0,0035								
Layers	2								
L (mm)	2280								
W (mm)	1230								
d (mm)	200								
A _{st} /A _{sc}	1,75								
c _{st} (mm)	20?								
c _{sc} (mm)	20?								

De tryckparametrar som redovisas i Tabell 4 är de som uppmättes vid försöken i provbänkens ram (på halva provbänkshöjden).

En jämförelse mellan experimentella resultat och beräknade (Wang 2021) avseende utböjning och upplagskraft har genomförts. På samma sätt som för 150 mm väggar är den tryckbelastning som använts i programmet en förenkling av verkligt tryck-tidförlopp och utgår från att bibehålla positiv och negativ impulstäthet samt varaktigheter. Använda tryck-tidförlopp redovisas i Tabell 5.

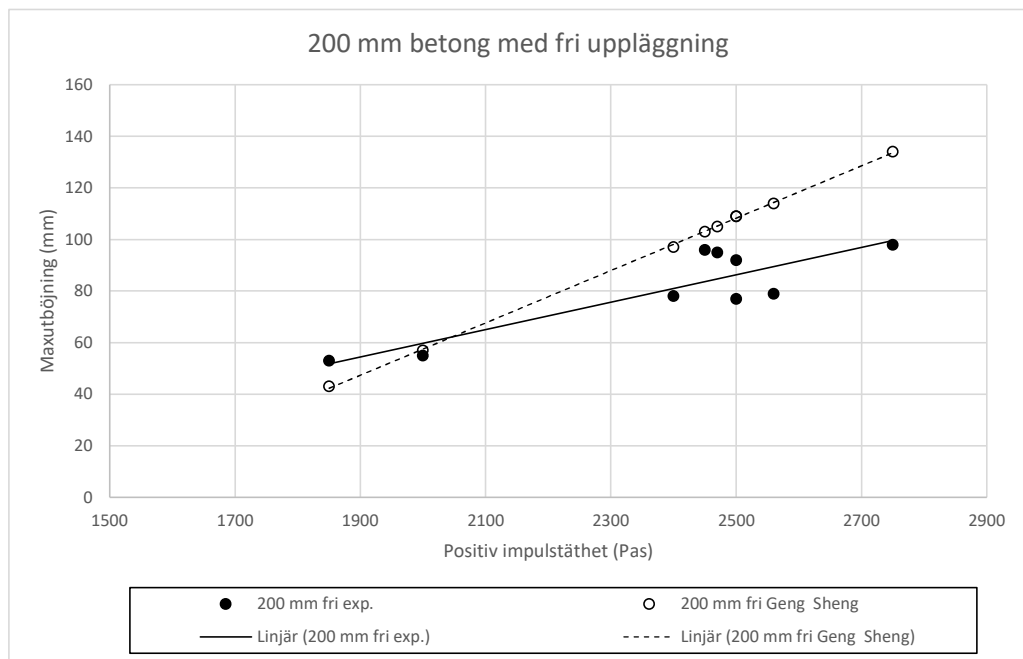
En jämförelse vad gäller maximal respektive kvarstående utböjning mellan experimentella resultat och beräkning med programmet (Wang 2021) redovisas i Tabell 6, samt Figur 11, Figur 12 och Figur 13.

Tabell 5. Använda tryck-tidförlöpp i beräkningar för 200 mm tjocka betongväggar.

Försök	Tid (ms)	Tryck (kPa)
D1a	0	0
	0,001	1719
	3,2	0
	7,7	-44
	25,7	0
D1b	0	0
	0,001	1515
	3,3	0
	7,3	-50
	23,3	0
D1c	0	0
	0,001	1690
	2,9	0
	6,8	-51
	22,4	0
D2a	0	0
	0,001	1057
	3,5	0
	6,5	-47
	18,5	0
D2b	0	0
	0,001	1212
	3,3	0
	6,5	-50
	19,3	0
D2c	0	0
	0,001	1652
	3,1	0
	7,2	-49
	23,7	0
D3a	0	0
	0,001	1653
	3,2	0
	7,2	-50
	23,2	0
D3b	0	0
	0,001	1655
	2,9	0
	6,7	-53
	21,9	0
D3c	0	0
	0,001	1647
	3,0	0
	6,9	-51
	22,7	0

Tabell 6. Sammanställning av experimentella och beräknade resultat för 200 mm tjocka betongväggar.

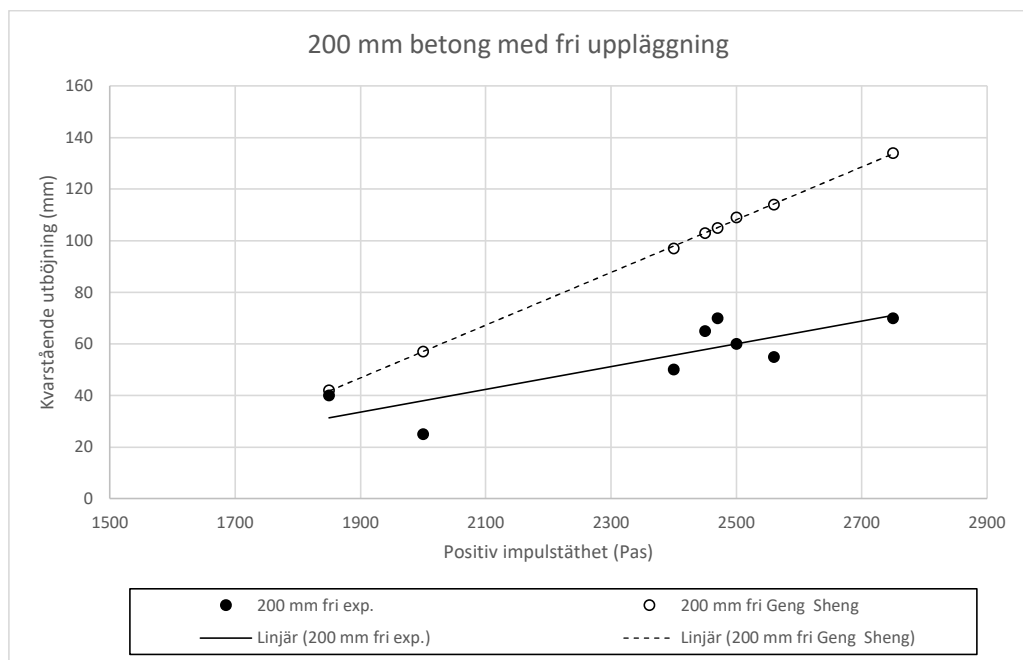
Parameter		D1a	D1b	D1c	D2a	D2b	D2c	D3a	D3b	D3c
Maxutböjn. (mm)	Exp.	98	92	96	53	55	79	77	78	95
	Beräkn.	134	109	103	43	57	114	109	97	105
Kvarstående utböjn. (mm)	Exp.	≈70	≈60	≈65	≈40	≈25	≈55	-	≈50	≈70
	Beräkn.	134	109	103	42	57	114	109	97	105
Max upp- lagskraft	Exp.	904	633	734	347	511	734	752	804	693
	Beräkn.	509	449	500	313	359	489	463	489	487



Figur 11. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar gällande maximal utböjning.

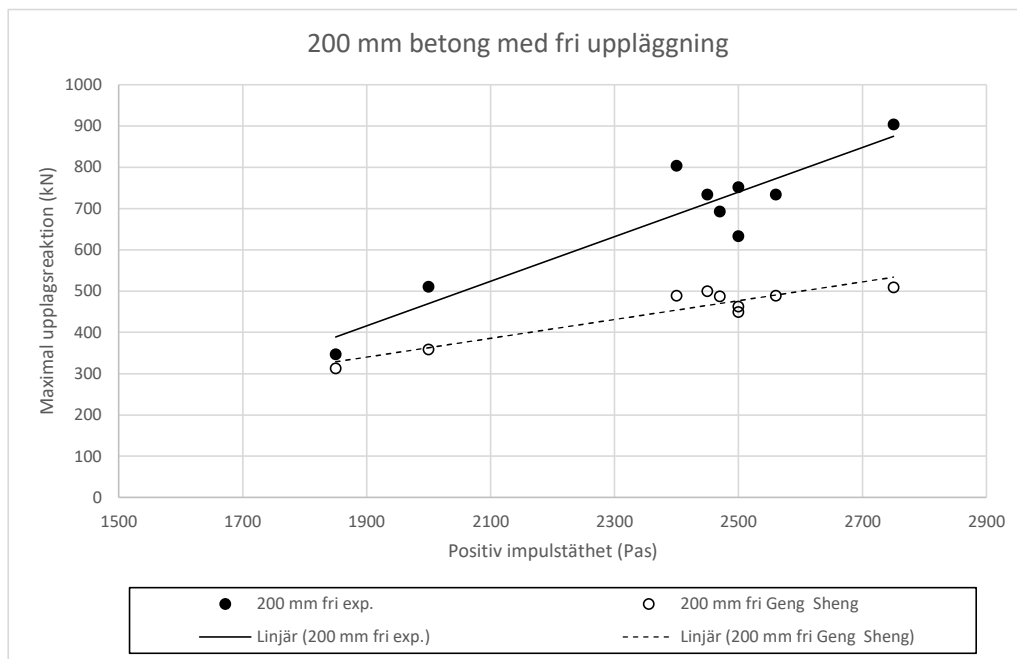
Överensstämmelsen mellan experimentella resultat och beräkningar av maximal utböjning är generellt god, dock ökar skillnaden vid höga impulstätheter. Beräknade utböjningar blir då större än experimentella.

Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar av kvarstående utböjning redovisas i Figur 12. Beräknade kvarstående utböjningar blir generellt större än experimentella.



Figur 12. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar gällande kvarstående utböjning.

Jämförelsen mellan experimentella resultat och beräkningar av maximal upplagskraft (Figur 13) visar att beräknade värden generellt är betydligt mindre än de experimentella, på samma sätt som för 150 mm tjocka väggar.



Figur 13. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar av maximal upplagsreaktion.

För att få en uppfattning om hur olika parametrar hos väggarna påverkar beräknade maximala utböjningar visas i Tabell 7 en mycket begränsad parameterstudie baserad på ett av försöken med 200 mm väggar, D2a. Endast en parameter i taget ändras.

Tabell 7. Parameterstudie.

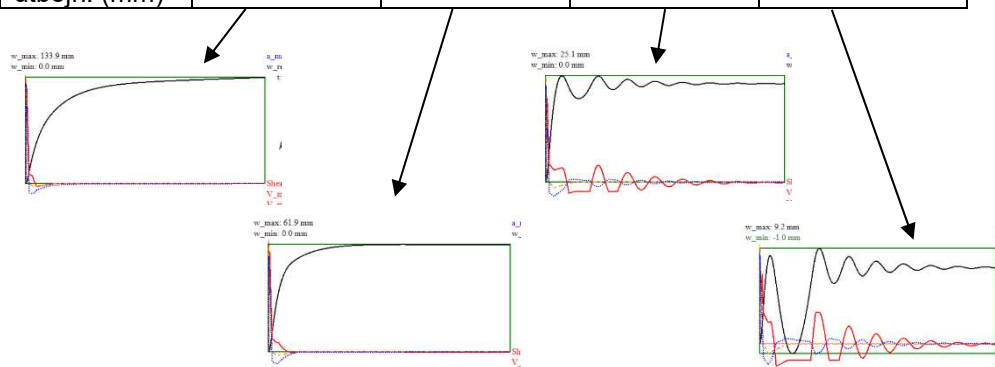
Parameter	Urspr.	Högre	Ännu högre	Beräknad maximal utböjning (mm)
Betong-kvalitet (MPa)	25	35	50	43, 40, 38
Armerings-kvalitet	Ks40	Ks60		43, 36
A_s/A_c	0,0035	0,005	0,01	43, 37, 24
L (mm)	2280	2500	3000	43, 49, 65
W (mm)	1230	1500	2000	43, 43, 43
d (mm)	200	250	300	43, 25, 16
Axiallast (kg/mm ²)	0	0,01	0,02	43, 39, 37

Den maximala utböjningen minskar med ökande betonghållfasthet, starkare armering, ökande mängd armering, ökande vägg tjocklek och ökande axiallast. Den är opåverkad av ändrad väggbredd och den ökar med ökande spännvidd, vilket allt är kvalitativt rimligt.

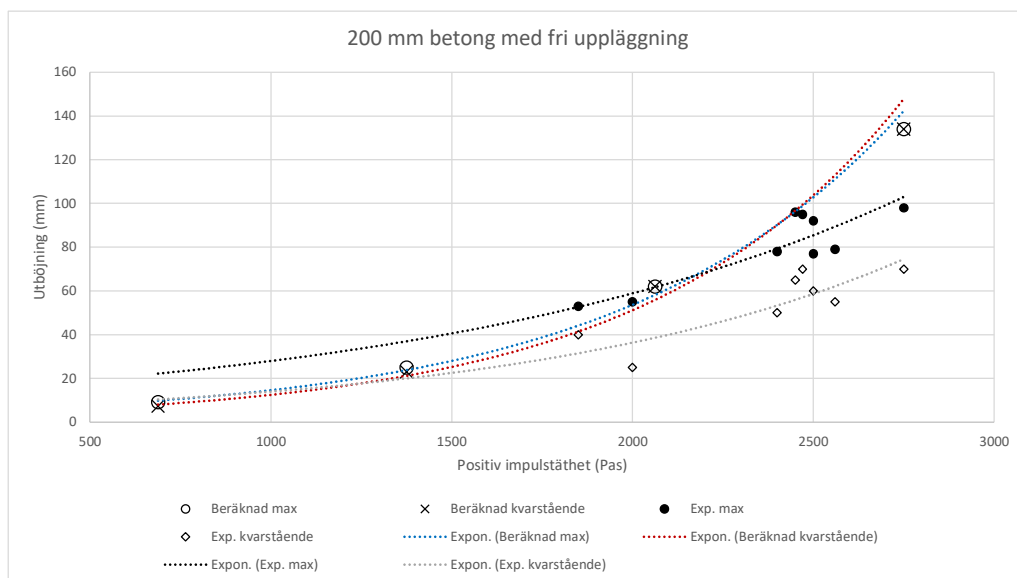
Ett annat test är att se hur transversallasten påverkar utböjningsförloppet, baserat på ett av försöken, D1a, vilket redovisas i Tabell 8. Variation har där genomförts av topptrycket och därigenom positiv impulstäthet, men bibehållna parametrar i övrigt. Med maxtrycket baserat på experimentet, 1719 kPa, erhöles vid experiment 98 mm maxutböjning och kvarstående ca 70 mm. Beräkningar gav för samma belastning 134 mm för både maximal och kvarstående deformation.

Tabell 8. Beräknade värden vid olika transversalbelastningar.

Parameter				
Maxtryck (kPa)	1719	1289	860	430
Pos. impuls-täthet (Pas)	2750	2062	1375	688
Maxut-böjnin. (mm)	134	62	25	9,2
Tid till maxut-böjn. (ms)	220	220	≈16	≈11
Kvar-stående utböjn. (mm)	134	62	23	7,3



Det framgår bland annat att beräknad maximal och kvarstående utböjning blir den samma vid aktuell impulstäthet samt vid 0,75 gånger den aktuella. Vid 0,5 och 0,25 gånger den aktuella impulstätheten skiljer sig maximal och kvarstående utböjning något. Förhållandet illustreras i Figur 14 där jämförelse görs med experimentella värden från flera försök enligt Tabell 4.



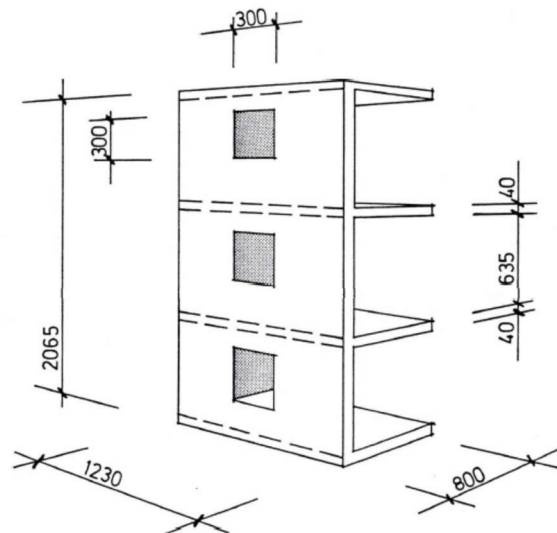
Figur 14. Jämförelse mellan beräknade maximala och kvarstående utböjningar och experimentella som funktion av positiv impulstäthet.

Det visar sig bland annat att skillnaden mellan maximal och kvarstående utböjning är större vid experimenten än vid beräkningarna. Det framgår också att vid stora impulstätheter överskrider beräknade utböjningar de experimentella.

4.2 Luftstöt vågsbelastade armerade betongväggar i skala 1:4

En bärande betongväggs motståndsförmåga mot luftstöt vågsbelastning beror bland annat på spännvidd, tjocklek, armeringsmängd och utförande. Dessutom påverkas motståndsförmågan av eventuell inspanning i anslutande bjälklag, eventuella tvärgående bärande innerväggar och fönsteröppningar. Ytterligare en viktig parameter är den normalkraft i väggen som uppkommer vid belastning från ovanför liggande våningar. Normalkraftens storlek påverkas bl.a. av masströgheten som uppkommer vid dynamisk belastning.

För att försöka kartlägga responsen vid luftstöt vågsbelastning mot bärande betongväggar i flervåningsbyggnader genomfördes (Edin och Forsén 1991) experiment med betongväggar i skala 1:4. Väggarna hade tjockleken 40 mm vilket (motsvarar 160 mm i full skala) och utfördes i tre våningar (se Figur 15).

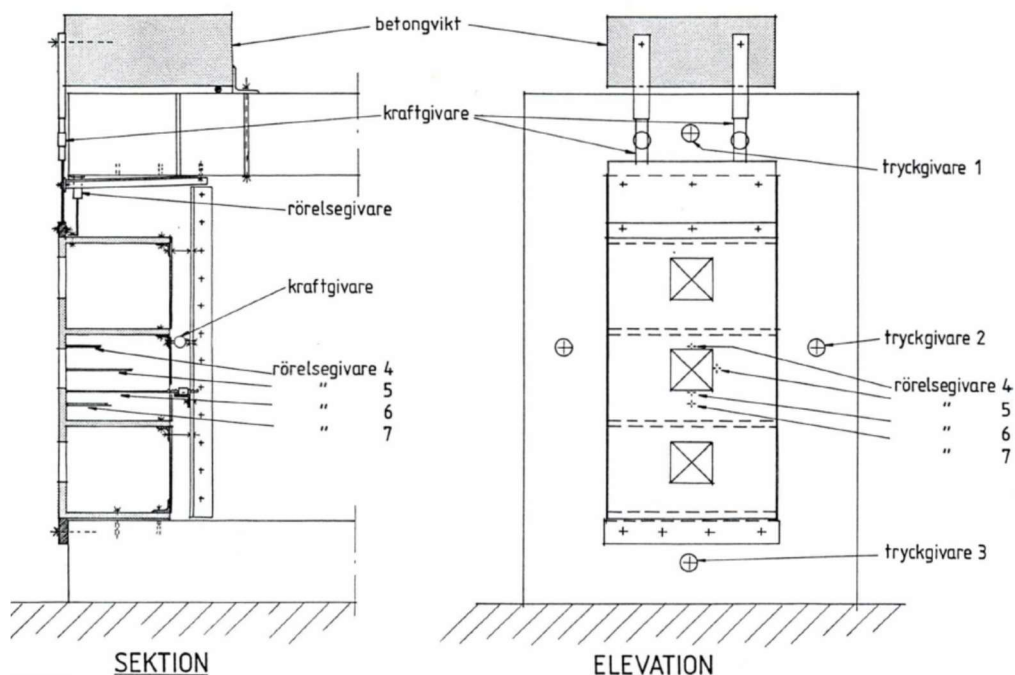


Figur 15. Provkroppsutformning vid experiment med väggar i skala 1:4.

Två försöksserier genomfördes med delvis olika armeringsutformning. Avsikten var att simulera utformningen i verkliga byggnader. I ena fallet användes en relativt svag armering och i andra fallet en relativt kraftig armering. I båda fallen var väggarna inspända mot anslutande bjälklag. För att efterlikna verkliga byggnader försågs de bärande väggarna med fönsteröppningar. Även ett par försök gjordes med provkroppar med anslutande tvärgående innerväggar. Dessa sistnämnda redovisas inte här.

För att simulera belastning från våningar högre upp placerades en betongvikt på provbänkens tak. Betongviktens ena upplag förde ner belastning mot toppen av provobjektet (se Figur 16). Betongviktens andra upplag flyttades vid vissa försök för att variera den statiska belastningen mot provobjektet. Den masströghet från betongvikten som överfördes mot provobjektet vid de dynamiska försöken förblev dock densamma och representerade en massa på ca 660 kg. Fokus lades på att studera responsen hos den mellersta våningens vägg. Den ovanförliggande väggen och hälften av de båda ovanförliggande bjälklagen vägde tillsammans ca 160 kg. Det betyder att den totala massan som dynamiskt belastade den mellersta våningens vägg var ca 820 kg. Approximativt kan 820 kg beräknas motsvara $820/160 \approx 5$ ovanförliggande våningars massa.

Varje väggstrimla vid sidan av fönstret med bredden 0,465 m belastades alltså med ca 410 kg, vilket motsvarar $0,022 \text{ kg/mm}^2$. I Figur 16 redovisas även placering av de olika mätgivarna som användes vid försöken.

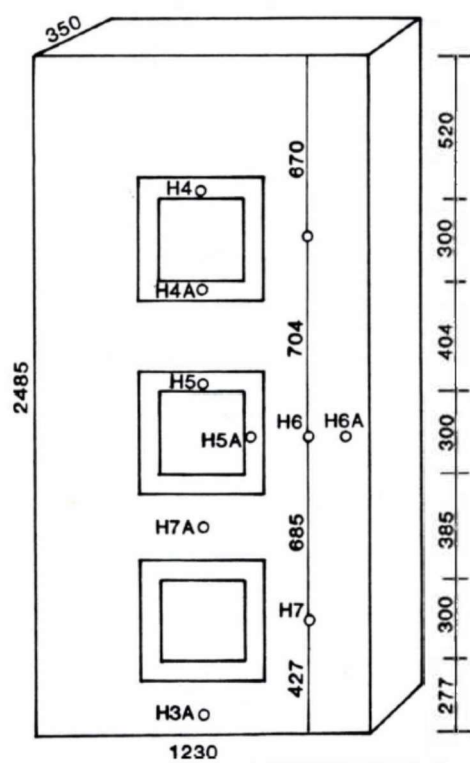


Figur 16. Provkroppens placering i provbänken samt använda mätgivare.

De laddningar som användes för att skapa en utvändig belastning mot väggarna vägde ca 2,1 kg, vilket i fullskala motsvarar ca 135 kg ($2.1 \cdot 4^3$). Avståndet mellan laddningar och vägg varierades mellan 0,7 och 4,5 m, vilket i fullskala motsvarar 2,8 och 18 m.

Vid försöken mot provkropparna mättes trycket enbart mot provbänkens ram. För att bestämma den faktiska tryckbelastning som väggarna utsattes för, genomfördes inledande kalibreringsförsök mot en "dummy" (Åseborn 1988). Placering av givare i dummy visas i Figur 17. Det visade sig att tryckbelastningen mot givarna i provbänksramen skilde sig från belastningen mot dummy särskilt vid de kortaste laddningsavstånden. Mest representativ för belastningen mot väggstrimlorna bedömdes givare H6 vara. För samtliga laddningsavstånd väljs i våra beräkningar registreringar med givare H6 från försöken med dummy.

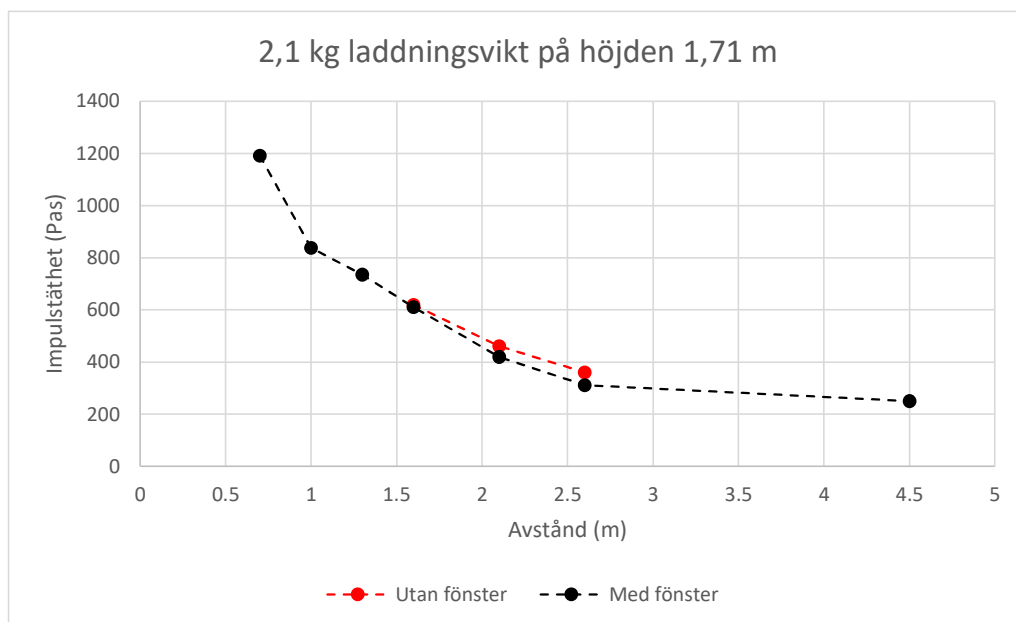
Belastningar som används i beräkningar för responsen hos väggelementen (se Tabell 9) är baserade på försöken med 2,1 kg laddningar redovisade av Åseborn. I tabellen redovisas som jämförelse impulstäthetvärden från försök med dummy utan fönsteröppningar. Jämförelsen presenteras även i Figur 18. Det visar sig att belastningen påverkas ganska lite av fönsteröppningarna.



Figur 17. Hål-dummys dimensioner med mätpunkternas beteckningar och placeringar.

Tabell 9. Förenklade tryck-tidfunktioner baserade på försök (Åseborn 1988). Impulstäthetsvärde inom parentes visar värden från försök utan fönsteröppningar.

Avstånd	Positiv impuls-	Tid	Tryck
0,7	1192	0	0
		0.001	7450
		0,32	0
1,0	838	0	0
		0.001	2149
		0,8	0
		6,2	-9,4
		27	0
1,3	735	0	0
		0.001	1531
		0,96	0
		6,2	-13
		27	0
1,6	611 (619)		
2,1	420 (461)	0	0
		0.001	452
		1,9	0
		7,3	-13
		29	0
2,6	312 (361)		
4,5	250	0	0
		0.001	104
		4,8	0
		12	-12
			0



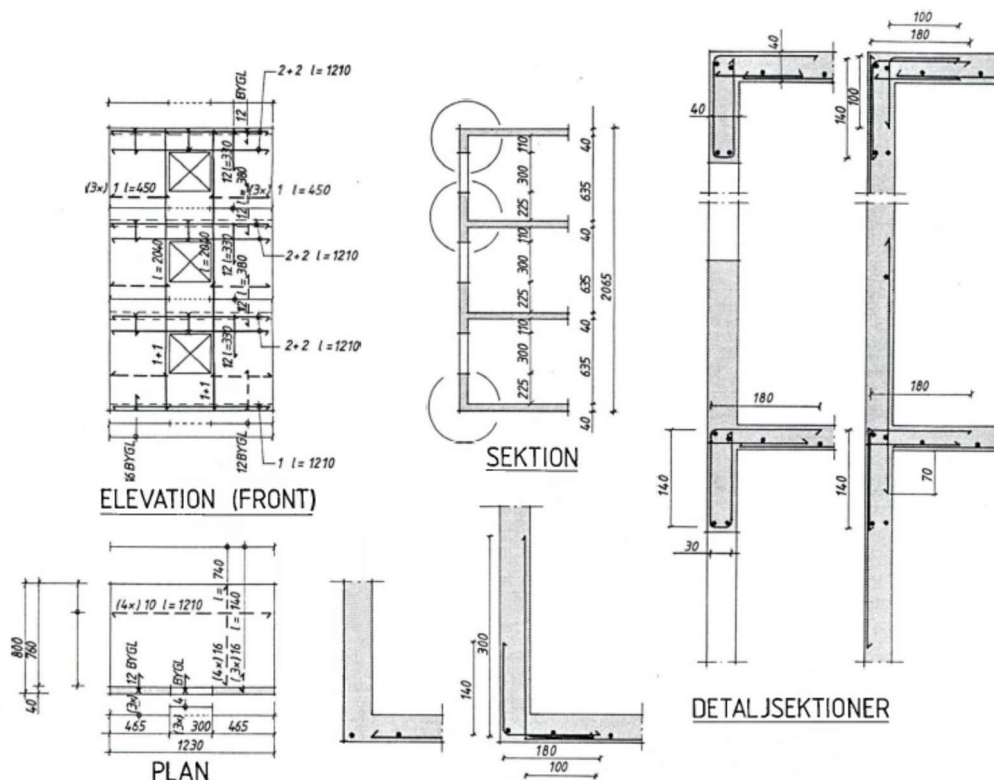
Figur 18. Jämförelse av uppmätta impulstätheter vid försök med och utan fönsteröppningar.

4.2.1 Svag armering

Geometri och armeringsutformning för provkropparna med svag armering visas i Figur 19. Beräkningar görs för en väggstrimla i den mellersta våningen vid sidan av fönstret. Fönsterbröstningen och fönsteröverstycket, som är tre-sidigt upplagda, påverkar sannolikt bärförmågan hos väggstrimlan i någon mån. En viss andel av belastningen mot fönsterbröstningen och fönsteröverstycket förs över mot väggstrimlan, men någon hänsyn tas inte till detta i våra beräkningar. En sammanställning av materialdata samt belastning och resultat redovisas i Tabell 10.

Det bör noteras att armeringsutformningen inte är väldefinierad med samma stöd- som fältarmering. I beräkningarna bortses från detta och värdet för fältarmeringen används.

Försöken nr 470 – 474 utfördes mot samma provobjekt liksom försöken 475 – 478.



Figur 19. Provkropp typ 1 – svag armering.

Tabell 10. Sammanställning av data från experiment med svagt armerade provkroppar. Bedömda osäkra registreringar från originalreferensen har markerats med frågetecken.

Försöks-littera	470	471	472	473	474	475	476	477	478
Laddn. (kg)	2,10	2,10	2,10	2,10	2,12	2,12	2,09	2,09	2,15
Avst. (m)	4,5	4,5	4,5	1,3	1,0	2,1	2,1	2,1	1,0
Höjd (m)	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71
p+ (kPa)	167	167	167	6560	16700	1319	1319	1319	16700
i+ (Pas)	250	250	250	735	838	420	420	420	838
t+ (ms)	4,8	4,8	4,8	0,96	0,78	1,86	1,86	1,86	0,78
p- (kPa)	-30	-30	-30	-81	-69	-47	-47	-47	-69
i- (Pas)	-220	-220	-220	-170	-127	-180	-180	-180	-127
t- (ms)	36	36	36	26	27	27	27	27	27
y _{max} (mm) ⁵	1,1	1,3	0,4?	-	25,3 ⁷	-	6,5 ⁸	6,9 ⁹	30,9
t _u (ms)	10,6 ?	-	-	-	13,5	0,5?	2,3 ¹⁰	2,7	0,8
y _{rest} (mm)	-	-	-	-	-	-	-	0,6	8,9
R _{max} (kN)	17,5	15,5	14,2	46,7	68	42,5	50	26	45
Max vert. deform. (mm)	0,4	0,5	0,4	4,5	9,6	6,3	5,7	6,7	>10,9
Tid till max vert def (ms)	11,7	14,1	13,5	1,1	6,4	23	27	24,7	2,1
Maxkraft uppåt ¹¹ (kN)	16,9	15,5	23,9	135	198	97	140	125	177
Tid t. maxkraft upp ¹²	-	-	-	1,6	1,9	2,3	1,9	2,3	1,7
Btg-kval (MPa)	49								
Densitet (kg/m ³)	2150								
Arm.-kvalitet ¹³	≈ Ks40								
Fält: A _{st} (mm ²)	4,9 (per sida om fönster)								
Fält: A _{sc} (mm ²)	4,9 (per sida om fönster)								
A _s /A _c (ρ) i fält	0,00052								
Layers i fält	2								
L (mm)	675								
W (mm)	465 (strimla vid sidan fönsteröppning)								
d (mm)	40								
A _{st} /A _{sc} i fält	1,0								
C _{st} (mm)	5?								
C _{sc} (mm)	5?								
Axial massa (kg/mm ²)	0,022								
Anm.	Inspänd								

⁵ Normalt avses givare 5

⁶ Tveksam avläsning

⁷ Givare 6

⁸ Givare 6

⁹ Givare 6

¹⁰ Givare 6

¹¹ Summa av två givare

¹² Medelvärde av två givare

¹³ Verkliga uppmätta värden är 450 MPa flytgräns och brottgräns 790 MPa, samt brottförlängning 23% (25 mm mätlängd)

Använda tryck-tidförlopp redovisas i Tabell 11. En sammanställning över jämförelser mellan experimentella resultat och beräkningar presenteras i Tabell 12.

Tabell 11. Använda tryck-tidförlopp i beräkningar för provkroppar med svag armering.

Försök	Tid (ms)	Tryck (kPa)
470, 471	0	0
	0,001	104
	4,8	0
	12	-12
	41	0
474, 478	0	0
	0,001	2149
	0,8	0
	6,2	-9,4
	27	0
476, 477	0	0
	0,001	452
	1,9	0
	7,3	-13
	29	0

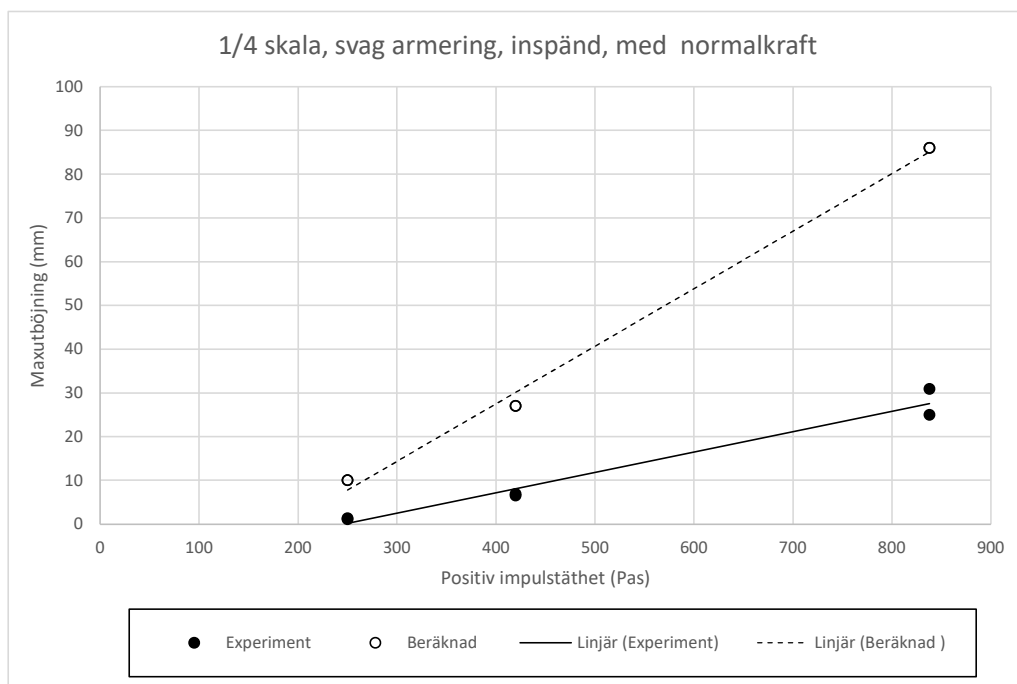
Tabell 12. Sammanställning av experimentella och beräknade resultat för provkroppar med svag armering.

Parameter		470	471	474	476	477	478
Maxutböjn. (mm)	Exp.	1,1	1,3	25,3	6,5	6,9	30,9
	Beräkn.	10	10	86	27	27	86
Kvarstående ¹⁴ utböjn. (mm)	Exp.	-	-	-	-	0,6	8,9
	Beräkn.	10	10	86	22	22	86
Max upp- lagskraft ¹⁵ (kN)	Exp.	8,8	7,8	34	25	13	23
	Beräkn.	5	5	92	19	19	92

En jämförelse vad gäller maximal utböjning mellan experimentella resultat och beräkning med programmet (Wang 2021) redovisas i Figur 20.

¹⁴ Kvarstående utböjning uppmättes inte i alla experiment

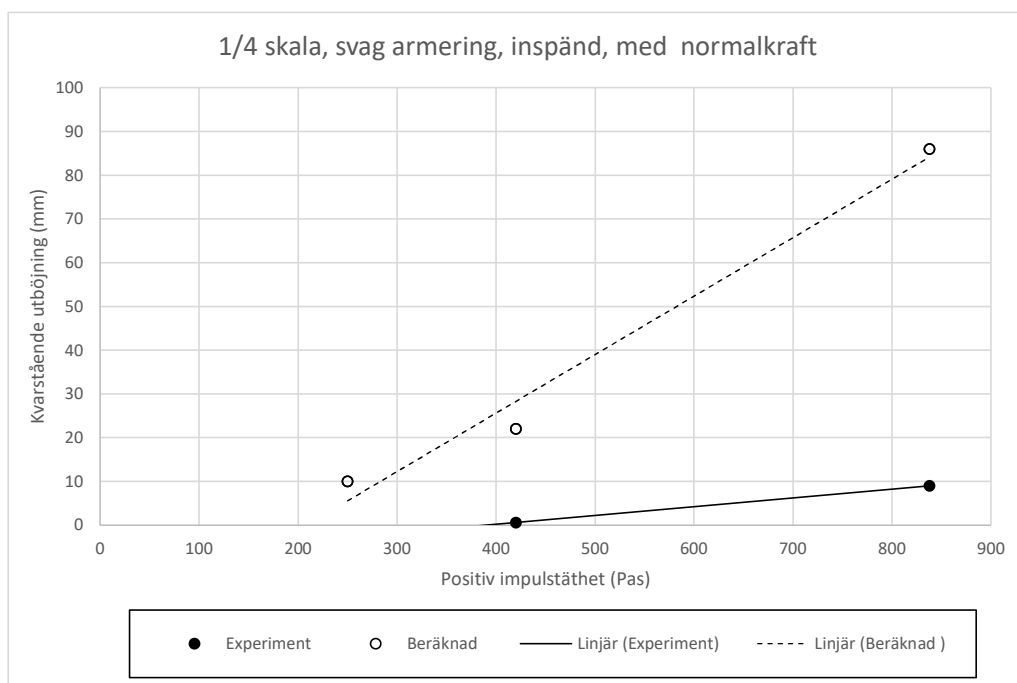
¹⁵ Experimentellt värde avser hälften av värde för hela provkroppen



Figur 20. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar gällande maximal utböjning.

Beräkningar av maximala utböjningar överskrider kraftigt de experimentella resultaten.

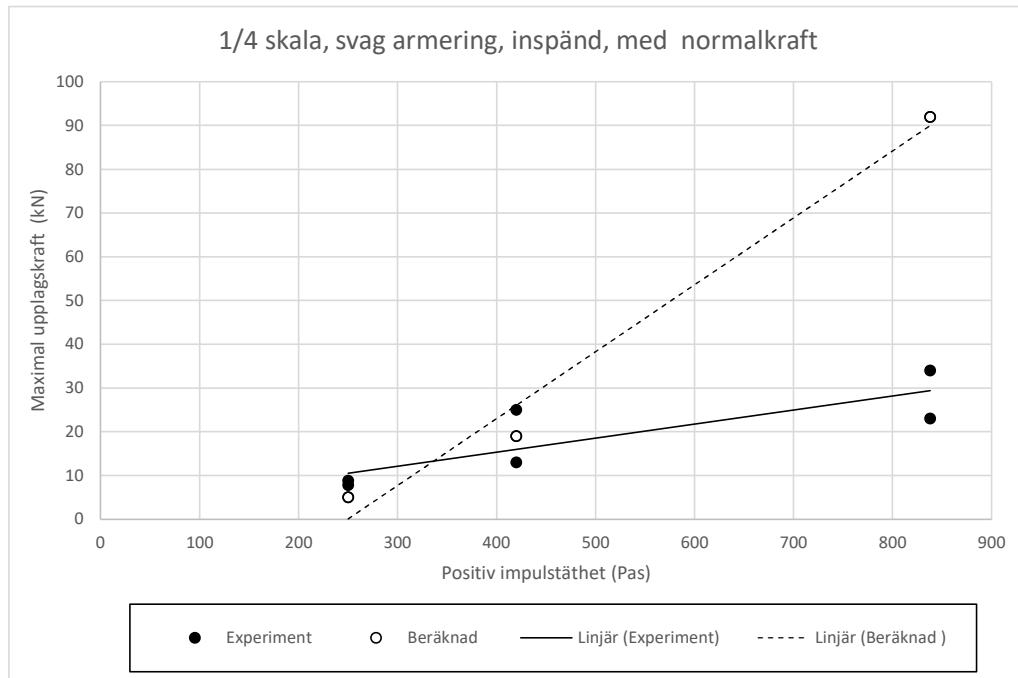
En jämförelse vad gäller kvarstående utböjning mellan experimentella resultat och beräkning med programmet (Wang 2021) redovisas i Figur 21.



Figur 21. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar gällande kvarstående utböjning.

Beräkningar av kvarstående utböjningar överskrider mycket kraftigt de experimentella resultaten, i ännu högre grad än för de maximala utböjningarna.

En jämförelse mellan försöksresultat och beräkningar av maximal upplagskraft redovisas i Figur 22.



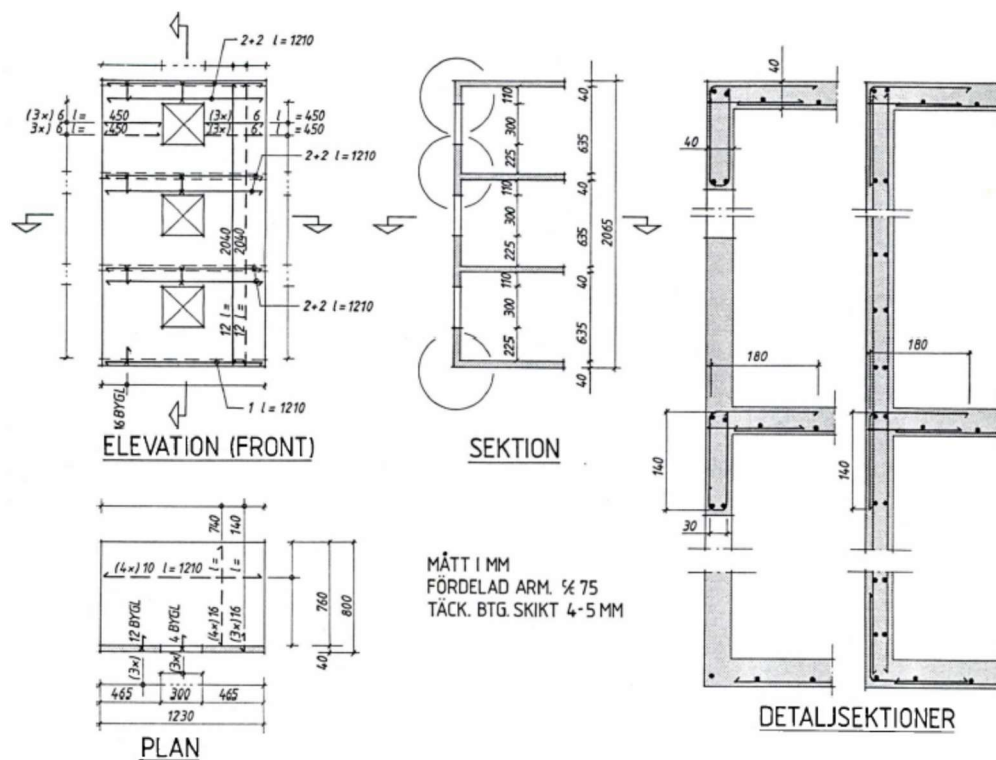
Figur 22. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar gällande maximal upplagskraft.

Jämförelsen mellan experimentella resultat och beräkningar av maximal upplagskraft visar god överensstämmelse vid relativt låga impulstäthetsvärden medan de beräknade värdena kraftigt överskrider de experimentella vid höga impulstäthetsvärden.

4.2.2 Stark armering

Geometri och armeringsutformning för provkropparna med stark armering visas i Figur 23. På samma sätt som för provkropparna med svag armering görs beräkningar för en väggstrimla i den mellersta våningen vid sidan av fönstret. En sammanställning av materialdata samt belastning och resultat redovisas i Tabell 13.

Försöken nr 479 – 481 utfördes mot samma provobjekt.



Figur 23. Provkropp typ 2 – stark armering.

Tabell 13. Sammanställning av data från experiment med starkt armerade provkroppar. Bedömda osäkra registreringar från originalreferensen har markerats med frågetecken.

Försöks-littera	479	480	481	509
Laddn. (kg)	2,12	2,11	2,10	2,10
Avst. (m)	2,1	2,1	0,7	0,7
Höjd (m)	1,71	1,71	1,71	1,71
p+ (kPa)	918	1020	3620	1790
i+ (Pas)	392	384	479	467
t+ (ms)	1,86	1,85	1,25	1,2
p- (kPa)	-56	-62	-42	-25
i- (Pas)	-225	-194	-314	-262
t- (ms)	23	25	29	28
y _{max} ¹⁶ (mm)	4,5	5,1	32	39,9
t _u (ms)	1,3 ¹⁷	1,4	16? ¹⁸	10,4
y _{rest} ¹⁹ (mm)	0,5	0,5	11	35
R _{max} (kN)	31,5	36,6	53,6	39
Max vert. deform. (mm)	5,6	5,9	7	13,2
Maxkraft uppåt ²⁰ (kN)	61?	100,5	224	163
Tid till max vert def (ms)	28,4	26,5	26	51
Tid t. maxkraft upp ²¹	≈1,8	2,2	2,1	2,2
Btg-kval (MPa)	49			
Densitet (kg/m ³)	2150			
Arm.-kvalitet ²²	≈ Ks40			
Fält: A _{st} (mm ²)	29,4 (per sida om fönster)			
Fält: A _{sc} (mm ²)	29,4			
Övre stöd A _{st} (mm ²)	58,9			
Övre stöd A _{sc} (mm ²)	29,4			
Nedre stöd A _{st} (mm ²)	29,4			
Nedre stöd A _{sc} (mm ²)	29,4			
A _s /A _c (ρ) (i fält)	0,0032			
Layers i fält	2			
Layers över stöd	2			
L (mm)	675			
W (mm)	465			
d (mm)	40			
A _{st} /A _{sc} i fält	1,0			
c _{st} (mm)	5?			
c _{sc} (mm)	5?			
Axial massa (kg/mm ²)	0,022			
Anm.	Inspänd			

¹⁶ Maximalt värde från givare 4, 5 och 6

¹⁷ Givare 6

¹⁸ Givare 4

¹⁹ Maximalt värde från givare 4, 5 och 6

²⁰ Summa av två givare

²¹ Medelvärde av två givare

²² Verkliga uppmätta värden är 450 MPa flytgräns och brottgräns 790 MPa, samt brottförlängning 23% (25 mm mätlängd)

Använda tryck-tidförlopp redovisas i Tabell 14. En sammanställning över jämförelser mellan experimentella resultat och beräkningar presenteras i Tabell 15.

Tabell 14. Använda tryck-tidförlopp i beräkningar för provkroppar med stark armering.

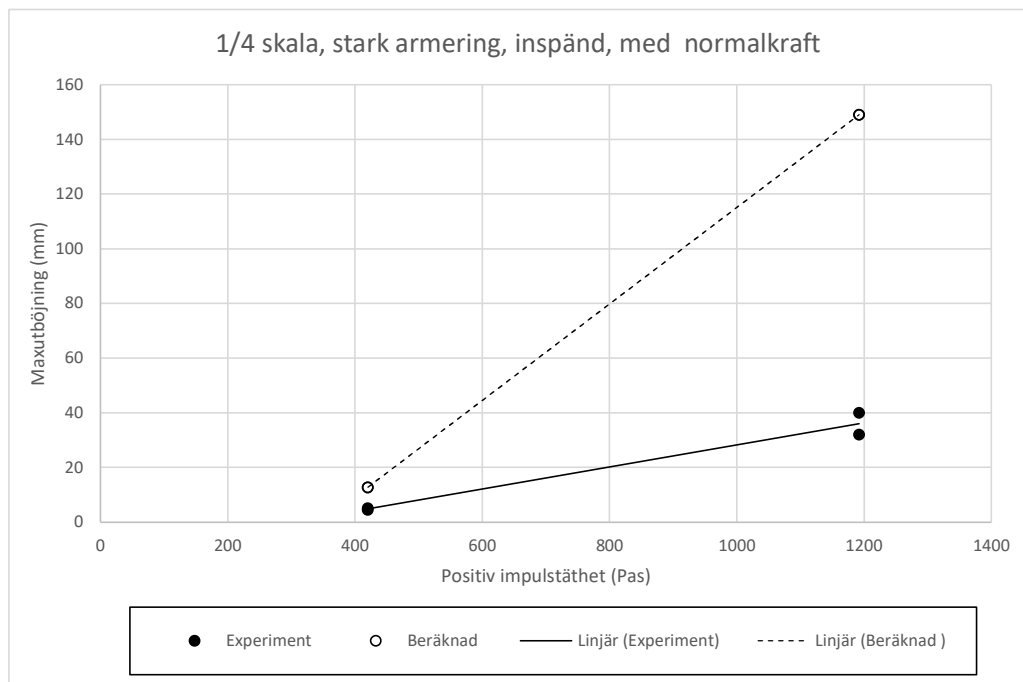
Försök	Tid (ms)	Tryck (kPa)
479, 480	0	0
	0,001	452
	1,9	0
	7,3	-13
	29	0
481, 509	0	0
	0,001	7450
	0,32	0

Tabell 15. Sammanställning av experimentella och beräknade resultat för provkroppar med stark armering.

Parameter		479	480	481	509
Maxutböjn. (mm)	Exp.	4,5	5,1	32	39,9
	Beräkn.	12,7	12,7	149	149
Kvar- stående	Exp.	0,5	0,5	11	35
	Beräkn.	12,4	12,4	149	149
Max upp- lagskraft ²³	Exp.	16	18	27	20
	Beräkn.	20	20	314	314

En jämförelse vad gäller maximal utböjning mellan experimentella resultat och beräkning med programmet (Wang 2021) redovisas i Figur 24.

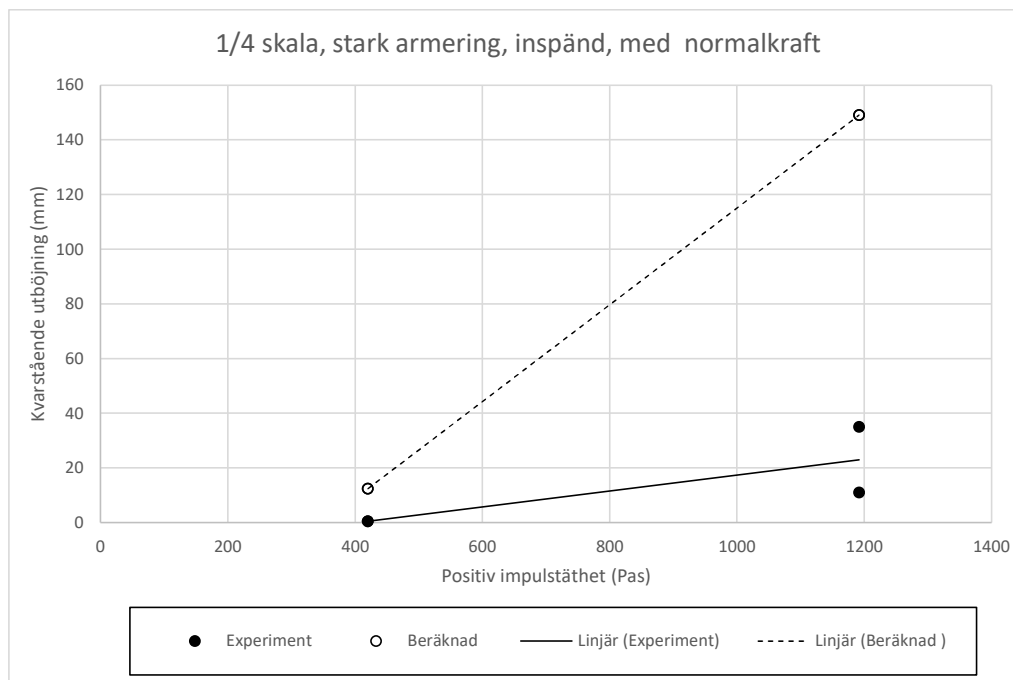
²³ Experimentellt värde avser hälften av värde för hela provkroppen



Figur 24. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar gällande maximal utböjning.

Beräkningar av maximala utböjningar överskrider kraftigt de experimentella resultaten speciellt för höga impulstätheter där maximala utböjningen är nästa fyra gånger plattjockleken.

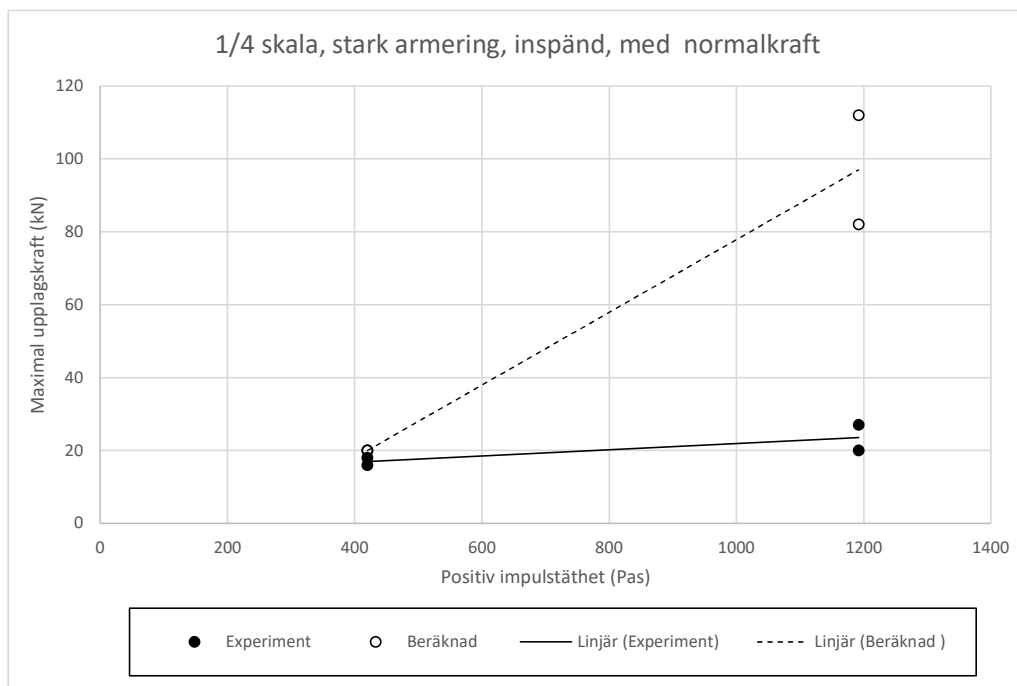
En jämförelse vad gäller kvarstående utböjning mellan experimentella resultat och beräkning med programmet (Wang 2021) redovisas i Figur 25.



Figur 25. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar gällande kvarstående utböjning.

Beräkningar av kvarstående utböjningar överskrider mycket kraftigt de experimentella resultaten.

En jämförelse mellan försöksresultat och beräkningar av maximal upplagskraft redovisas i Figur 26.



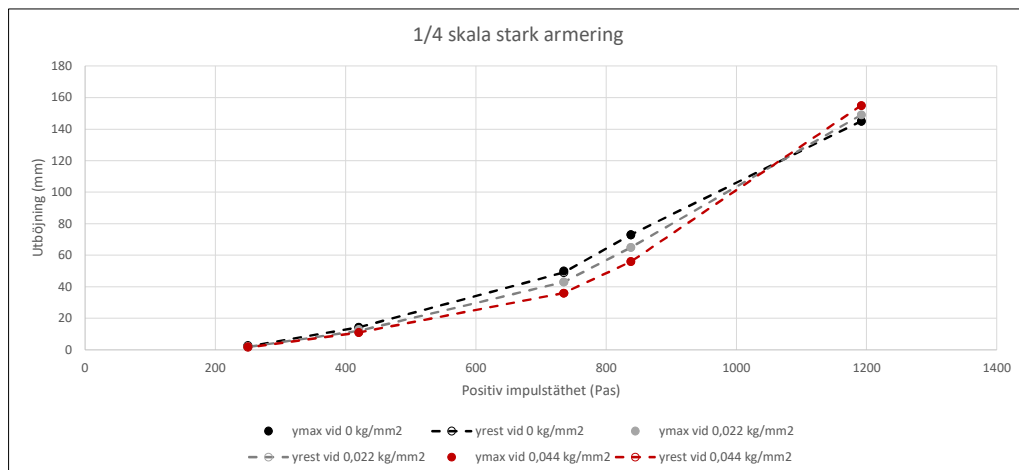
Figur 26. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar gällande maximal upplagskraft.

Jämförelsen mellan experimentella resultat och beräkningar av maximal upplagskraft visar god överensstämmelse vid relativt låga impulstäthetsvärden medan de beräknade värdena kraftigt överskrider de experimentella vid höga impulstäthetsvärden.

I Tabell 16 och Figur 27 redovisas resultat av en parameterstudie gällande beräknade maximala och kvarstående utböjningar vid olika antaganden om axiallast. Belastningar (se Tabell 9) är baserade på försöken med 2,1 kg laddningar redovisade av Åseborn (1988).

Tabell 16. Parameterstudie med olika axiallaster.

Avst. (m)	I+ (Pas)	Utan axiallast		0,022 kg/mm ² (motsv. ca 5 ovanförliggande våningar)		0,044 kg/mm ² (motsv. ca 10 ovanförliggande våningar)	
		y _{max} (mm)	y _{rest} (mm)	y _{max} (mm)	y _{rest} (mm)	y _{max} (mm)	y _{rest} (mm)
0,7	1192	145	145	149	149	155	155
1,0	838	73	73	65	65	56	56
1,3	735	50	49	43	43	36	36
2,1	420	14,4	14,2	13	12	11	11
4,5	250	2,7	2,2	2,3	1,8	2	1,5



Figur 27. Resultat av parameterstudie gällande beräknade maximala och kvarstående utböjningar vid olika antaganden om axiallast.

Det visar sig att det enligt dessa beräkningar är väldigt lite skillnad mellan maximal och kvarstående utböjning. För just denna väggtyp, fast inspänd med relativt stark armering, visar det sig också vara ganska liten skillnad på utböjningar vid antagande utan axiallast, eller 0,022 kg/mm² (som i experimenten), eller 0,044 kg/mm². Skillnaden i gränsvärdet för impulstätheten då utböjningen överskrider väggjockleken är därmed också ganska liten, ungefär 650 till 750 kPas vid antagen axiallast noll till 0,044 kg/mm².

4.3 Tidigare analyser av försök med väggelement i 1/4 skala

I samband med försöken mot väggelementen i skala 1:4 togs en beräkningsmodell fram (Kihlström 1988). Modellen tar hänsyn till den masströghetsberoende normalkraften som uppkommer i en bärande vägg av betong vid dynamisk transversalbelastning. Analyser gjordes av de praktiska försöken och redovisas i rapporten. Även programkoden redovisas i rapporten. Resultat av jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar vad gäller maximala utböjningar redovisas i Tabell 17.

Tabell 17. Jämförelse mellan experimentella resultat och beräkningar (Kihlström 1988).

Försök	Armeringsalt.	Laddn.-avstånd (m)	Maximala utböjningar (mm)		
			Av samtl. givare	Givare 5	Beräknad
474	Svag	1,0	25,3	15	>40
476	Svag	2,1	6,5	4,5	5,6
477	Svag	2,1	6,9	6,0	5,6
478	Svag	1,0	31	31	>40
479	Stark	2,1	4,5	4,0	5,2
480	Stark	2,1	5,1	4,5	5,2

Kihlströms analys följs upp av Forsén (1989) med applikation på tegelväggar där även resonemang förs om betydelsen av stötvägens negativa fas.

4.4 Tryck och splitterbelastade betongväggar

Skador på byggnader orsakade av konventionella vapen såsom flygbomber och artillerigranater, samt även i någon på improviserade laddningar såsom bilbomber, beror både på trycket och på de splitter som kastas iväg. Flera försöksserier har genom åren genomförts vid FOA/FOI för att studera detta. En serie med ett fåtal försök (Forsén och Edin 1991) genomfördes mot samma typ av konstruktion, ett tränings väggelement i skala 1:4, som beskrivs i avsnitt 4.2. Vid försöken framkom bland annat att kombinationen av tryck och splitter kan ge betydligt mer omfattande skador än enbart tryck, särskilt för relativt svagt armerade konstruktioner.

Exempel på övriga försök och analyser för att studera effekterna av utvändigt belastning från kombination av tryck och splitter är Nordström (1992, 1993, 1995a och 1995b) med uppföljning av Forsén och Nordström (1992) och Nordström och Forsén (1994), samt Forsén (1996). Fokus i detta arbete vara att med modellskaletförsök bestämma den virtuella avskalningen av armerade betongplattor med renodlad splitterbelastning med olika egenskaper.

Fullskaliga försök för bestämning av icke normalkraftsbelastade armerade betongväggar med kombination av tryck och splitterbelastning redovisas av Forsén 1997. Ett beräkningsprogram för att hantera responsen av kombinerad tryck- och splitterbelastning sammanställdes (Forsén 1999). Baserat på kompletterande försök uppdaterades senare beräkningsprogrammet (Forsén 2015).

För att få en grov uppskattning av kollapsavstånd från konventionella vapen gjordes försök (Lindqvist och Gustavsson, 1997 samt Lindqvist och Forsén, 1997) med ett antal väggkonstruktioner, sandwich, lättbetongelement resp. lättbetongmur, tegel, träregelvägg

med och utan kombination av tegel, betong i kombination med lättbetong respektive tegel. Väggarna var inte normalkraftsbelastade. Försöken gjordes dels med 250 kg minbomber och dels med 155 mm artillerigranater.

4.5 Fyrsidigt upplagda plattor i stötvågstub

Flera försöksserier har genomförts där fyrsidigt upplagda armerade betongplattor, utan axialbelastning, belastats med luftstötvågor från detoneringar i stötvågstub (Ågårdh 1997a, Ågårdh 1997b, Forsberg och Ågårdh 1997, Magnusson och Ågårdh 1998). Plattorna har antingen varit försedda med konventionell armering eller med stålfiberarmering. Måtten på plattorna var 1,2·1,2 m med 0,06 m tjocklek och var inspända längs kanterna. Tryckbelastning och utböjning har registrerats.

4.6 Tvåsidigt upplagda balkar i stötvågstub

Flera försöksserier har också genomförts där tvåsidigt upplagda betongbalkar, utan axialbelastning, belastats med luftstötvågor från detoneringar i stötvågstub (Magnusson 1998, Hallgren och Balazs 1999, Magnusson och Hallgren 2001a, 2001b, 2003). Balkarna har antingen varit försedda med konventionell armering eller med stålfiberarmering. Betongens hållfasthet har varierats i olika försök mellan ca 40 MPa upp till ca 215 MPa. I vissa fall har betongen varit skiktad med olika hållfasthet i tryck- och dragzon. Måtten på plattorna var ca 0,3 m bredd, 0,16 m tjocklek och ca 1,7 m längd. De var fritt upplagda med 1,5 m spännvidd. Tryckbelastning och utböjning har registrerats.

4.7 Axialbelastade betongväggar i skala 1:2 i stötvågstub

Berglund och Hansson (2017) beskriver systematiska försök med två-sidigt upplagda betongelement i skala 1:2. Elementen var inspända vid upplag och flertalet belastades med en kombination av normalkraft från domkrafter och transversell luftstötvågsbelastning. Försöken utfördes i en stötvågstub med relativt långvarig belastning. Dessa försök har analyserats av Wang (2019). En liknande försöksserie, också i stötvågstub, genomfördes under 2020 (Hansson och Berglund 2021) med mer kortvarig belastning. Båda dessa försöksserier har jämförts med beräkningar med enfrihetsgradsmetoden (Wang 2021).

4.8 Väggar med andra material, fullskaleförsök i provbänk

4.8.1 Luftstötvågsbelastade lättbetongväggar i full skala

Johansson och Edin (1978) rapporterar om experiment med väggar av fritt upplagda, 250 mm tjocka, armerade lättbetongelement. I samma rapport rapporteras även om experiment med 300 mm tjocka väggar av murade lättbetongblock, stumt infästa mot tak och golv i provbänken. Väggarna belastades med tryck från detoneringar 50 kg laddningar. Även experiment med statisk belastning genomfördes. Experimenten är väl dokumenterade. Bland annat uppmättes vid de dynamiska försöken tryckbelastningen och utböjningen som funktion av tiden. För lättbetongelementen mättes även upplagsreaktionen som funktion av tiden.

4.8.2 Luftstötvågsbelastade sandwichväggar i full skala

Forsén (1984) rapporterar om experiment med väggar av sandwichtyp (betong, isolering, betong), som belastades statiskt och dynamiskt från detoneringar 8 eller 48 kg laddningar.

Även statiska belastningsförsök genomfördes. Två något olika typer av sandwichkonstruktion användes med total tjocklek 280 respektive 315 mm och olika armering. För att efterlikna ett realistiskt funktionssätt monterades väggelementens inre betongskal mot provbänken via ett antal ”kraftmaximerare”. Kraftmaximerarna bestod av perforerade cylinderkonstruktioner av stål, s k chockdämpare, som gav en relativt konstant axiell kraft vid hoptryckning (Jonasson 1986). Experimenten är väl dokumenterade. Bland annat uppmättes vid de dynamiska försöken tryckbelastningen och utböjningen som funktion av tiden.

4.8.3 Luftstötvågsbelastade tegelväggar i full skala

Erkander och Forsén (1988) Rapporterar om experiment med 250 mm tjocka murade tegelväggar. Väggarna belastades från detonering 8 eller 48 kg laddningar. Även statiska belastningsförsök genomfördes. Två olika tegelsorter användes vid försöken, dels håltegel och dels massivtegel. Något olika förband användes för de olika väggarna. Väggarna murades stumt mot provbänkens golv och tak. En överraskande effekt som noterades var att i flertalet försök uppkom skjuvbrott i de stenar som förband ytter- och innerkant. Experimenten är väl dokumenterade. Bland annat uppmättes vid de dynamiska försöken tryckbelastningen och utböjningen som funktion av tiden. I samband med försöken gjordes också olika typer av materialanalys liksom analys av fenomenet normalkraftsbelastning.

4.8.4 Sammanfattning av försöken enligt ovanstående avsnitt

Forsén (1985) redovisar en sammanställning av resultaten från de fullskaliga försöken med de olika väggtyperna av betong (se avsnitt 4.1), lättbetong, tegel och sandwich. I sammanställningen redovisas beräknade samband mellan tryck och impulstäthet som ger olika skadenivåer.

5 Slutsatser

Experimentella resultat av tvåsidigt upplagda betongväggars utböjning och upplagsreaktion har beskrivits och jämförts med beräkningar baserade på enfrihetsgradsanalys (Wang 2021). En viktig parameter för bestämning av om en vägg klarar att upprätthålla sin integritet och sin lastbärande förmåga vid en viss dynamisk transversalbelastning är utböjningen vinkelrätt mot väggens plan. Vid genomförda praktiska experiment skiljer det ofta avsevärt mellan maximal och kvarstående utböjning. Bräkningsprogrammet anger emellertid ganska liten, eller ingen, skillnad mellan maximal och kvarstående utböjning.

Vid jämförelse av maximala utböjningar visar det sig att för 150 mm tjocka väggar (fullskala, fri uppläggning och utan normalkraft) råder god överensstämmelse mellan experiment och beräkningar. Även för 200 mm tjocka väggar (fullskala, fri uppläggning och utan normalkraft) råder ganska god överensstämmelse, dock ger beräkningar större maxutböjningar vid högre impulstätheter än vad som uppmäts. För $\frac{1}{4}$ skaleväggar (inspända och med normalkraft) med svag respektive stark armering överskrider beräknade maximala utböjningar kraftigt de uppmätta.

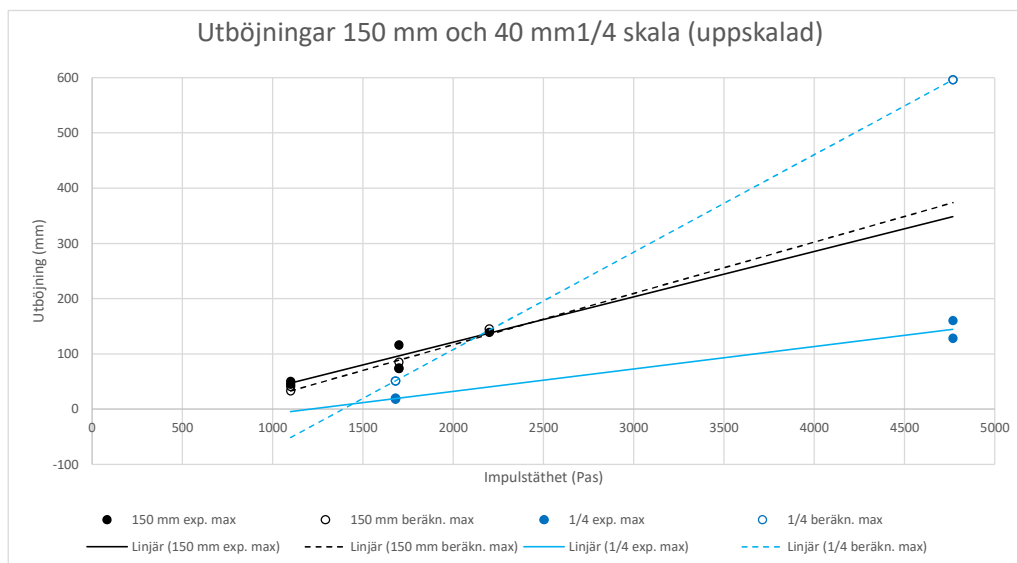
Vid jämförelse av kvarstående utböjningar visar det sig att dessa vid beräkningar blir större än vid experiment med 200 mm väggar och mycket större vid $\frac{1}{4}$ skaleväggar vid såväl svag som stark armering.

Med hjälp av beräkningsprogrammet kan betydelsen vad gäller utböjningens storlek som funktion av axialbelastningen beräknas. Det visar sig t.ex. som förväntat att såväl maximal som kvarstående utböjning minskar vid ökande axialbelastning. Sannolikt är inverkan på utböjningen av axialbelastningens storlek olika för olika väggtyper (upplagsförhållanden och armeringsmängd).

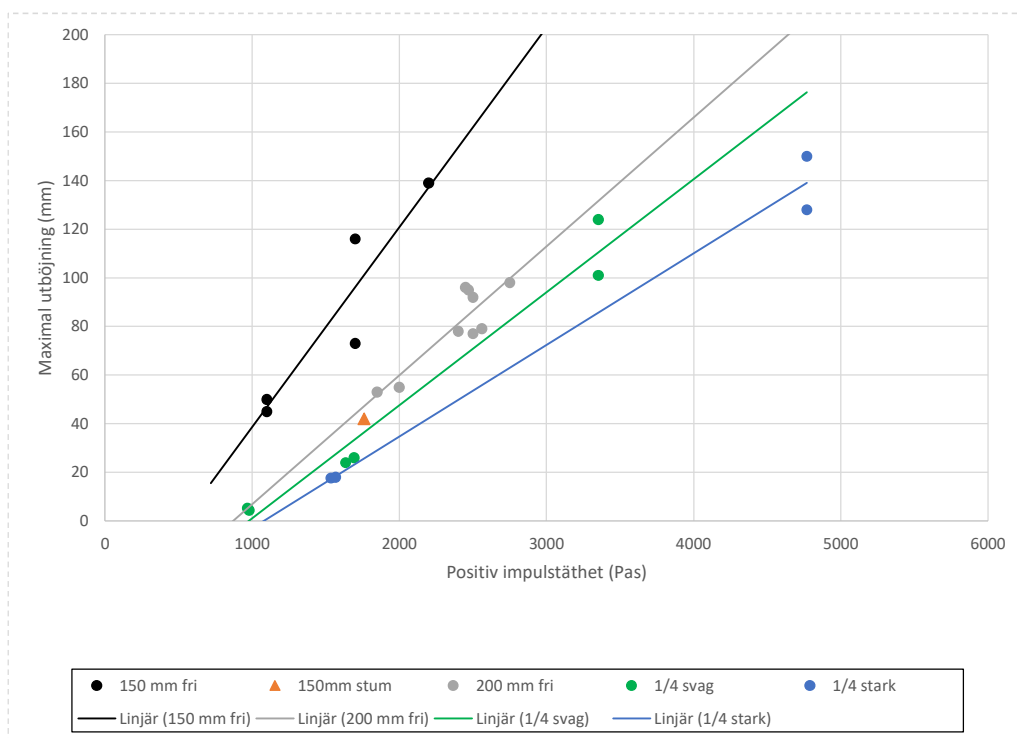
Vid jämförelse av upplagsreaktioner mellan experiment och beräkningar visar det sig att för 150 och 200 mm fritt upplagda fullskaleväggar är beräknade värden generellt betydligt mindre än de experimentella. För $\frac{1}{4}$ skala försöken med normalkraftsbelastade inspända väggar, för såväl svag som stark armering, visar det sig att experimentella resultat och beräkningar visar god överensstämmelse vid relativt låga impulstäthetsvärden medan, tvärt emot det som gäller för fullskaleväggarna, de beräknade värdena kraftigt överskrider de experimentella vid höga impulstäthetsvärden.

För bärande väggar i byggnader som är relativt tunga (t.ex. av betong eller tegel) och därmed har relativt lång utsvängningstid, som utsätts för last från konventionella vapen och andra typer av laddningar mindre än i storleksordning 1000 kg, är den viktigaste parametern hos belastningen den positiva impulstätheten. Figuren nedan (Figur 28) visar experimentella och beräknade maximala utböjningar, för de fritt upplagda 150 mm fullskaleväggarna, som jämförs med uppskalade (till 160 mm tjocklek) $\frac{1}{4}$ skaleväggar med stark armering (som har lite större relativ armeringstäthet, är inspända och har en viss normalkraft jämfört med fullskaleväggarna). I diagrammet är såväl impulstätheter som utböjningar uppskalade med en faktor fyra för modellförsöken. En tydlig iakttagelse är att vad gäller experimentella värden ger de uppskalade $\frac{1}{4}$ skaleväggarna betydligt mindre utböjning än fullskaleväggarna. Vad gäller beräknade värden överskrider emellertid utböjningarna för de uppskalade $\frac{1}{4}$ skalförsöken utböjningarna för 150 mm väggarna.

I Figur 29 görs fler jämförelser av maximal utböjning vid experiment också med 200 mm fullskalevägg samt uppskalad $\frac{1}{4}$ skalevägg med svag armering. Dessutom visas resultatet av det enda försök som genomfördes med en 150 mm fullskalevägg med stum infästning mot upplagen. Bland annat framgår att för en viss impulstäthet blir utböjningen större för $\frac{1}{4}$ skaleväggar med svag armering jämfört med stark. Dessutom framgår att 200 mm väggen med relativt mycket armering ger mindre utböjningar än 150 mm väggen men större än de uppskalade relativt tunnare $\frac{1}{4}$ skaleväggarna ($40 \cdot 4 = 160$ mm) med inspänning och normalkraft. Det enda försöket med stum infästning mot upplagen av en 150 mm vägg indikerar att denna får mindre utböjning än den tjockare 200 mm väggen som dessutom har mer armering.



Figur 28. Experimentella och beräknade utböjningar, för de fritt upplagda 150 mm fullskaleväggarna, som jämförs med uppskalade 1/4 skaleväggar med stark armering.



Figur 29. Experimentella utböjningar för de fritt upplagda 150 och 200 mm fullskaleväggarna, som jämförs med uppskalade 1/4 skaleväggar med svag och stark armering. Dessutom visas resultatet av ett försök med en 150 mm vägg med stum infästning.

De redovisade fullskaleförsöken är utförda med täta väggelement medan civila byggnaders bärande väggar ofta är försedda med fönsteröppningar. En jämförelse av resultat från kalibreringsskjutningar indikerar att tryckbelastningen förändras ganska marginellt av fönsteröppningar. Det är emellertid viktigt att ta hänsyn till att en vägg som bär mellan golv

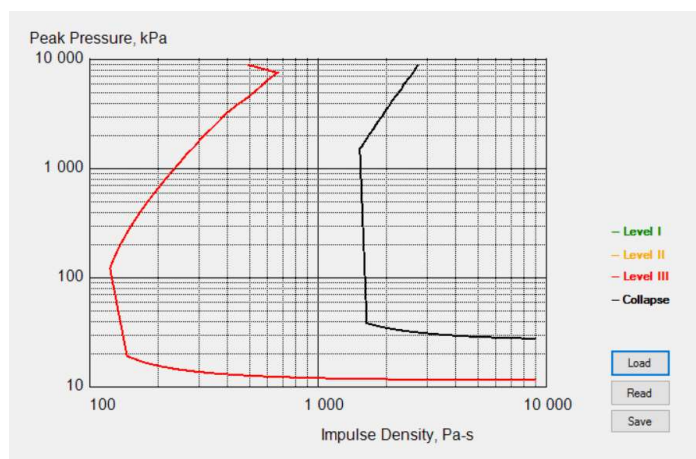
och tak påverkas av det avbrott i bärning som fönsteröppningarna kan innebära. Det innebär att väggstrimlor jämte fönsterna kan få bära en extra last från t.ex. fönsterbröstningar.

Bedömningen är att det nyligen utvecklade beräkningsprogrammet kan användas för att ge en, i de flesta fall, konservativ och grov uppfattning om påverkan på axialbelastade byggnadsväggar vid transversell explosionsbelastning.

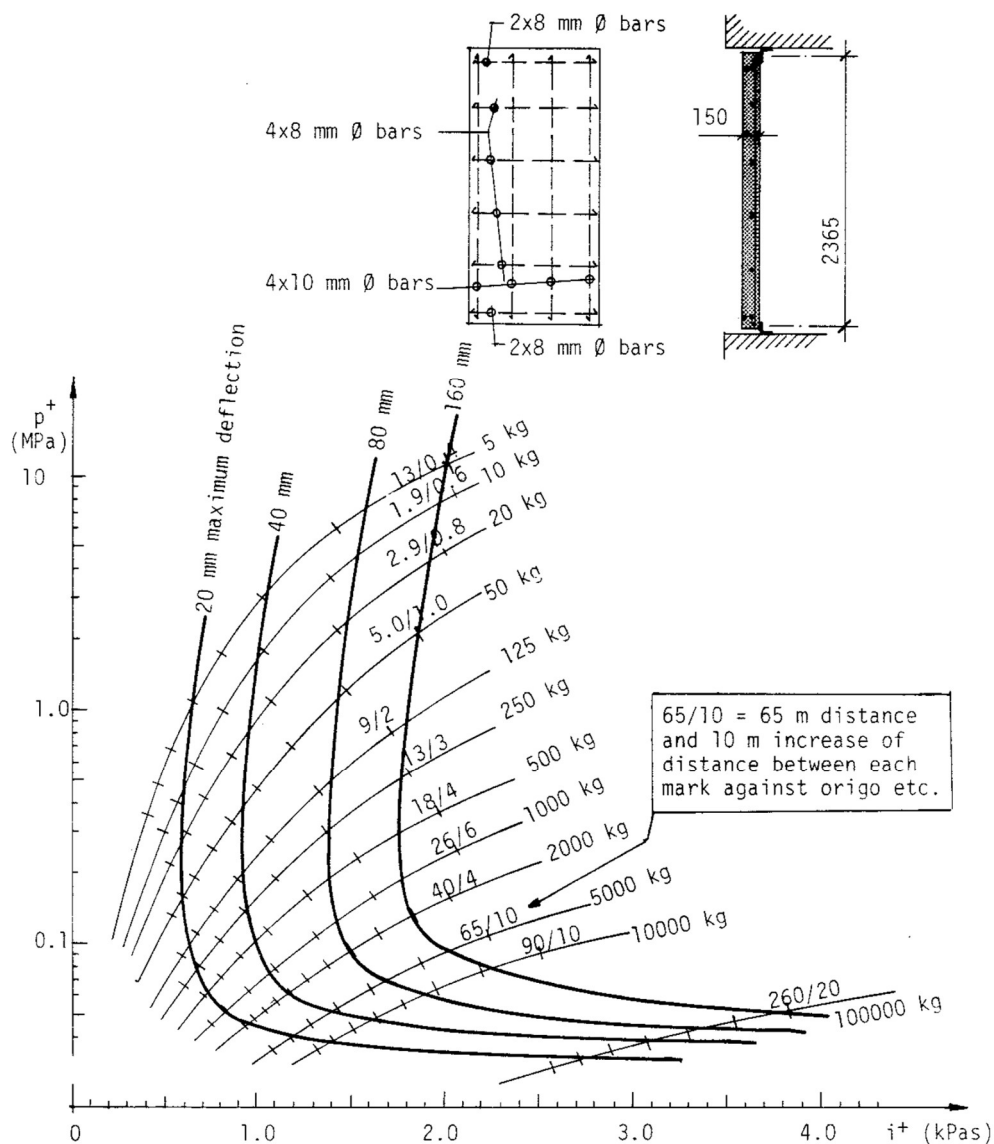
För att förbättra programmet bör övervägas hur algoritmerna kan modifieras för att minska graden av konservatism. Dessutom är säkrare prediktion av upplagsreaktioner angeläget. I fortsatt utvecklingsarbete är angeläget att göra fler jämförelser med experimentella resultat. I den mån nya experiment genomförs är angeläget att genomföra dessa med axialbelastning från massor i stället för domkrafter samt att mäta upplagsreaktioner vid försöken.

En tänkbar användning av programmet skulle kunna vara att för olika egenskaper hos bärande väggar av betong, såsom vägg tjocklek, armeringsmängd, spännvidd och axiallast göra beräkningar som sammanställs i diagram- eller tabellform för snabb indikation om bärförmåga. Eftersom resultaten från beräkningsprogrammet är approximativa är det angeläget att de också är konservativa.

Nedan visas ett exempel på resultatutskrift från beräkningsprogrammet som anger samband mellan maxtryck och impulstäthet för två olika skadenivåer (Figur 30). Beräkningen är gjord för en 150 mm fritt upplagd betongvägg, med armeringskvalitet Ks40, enligt avsnitt 4.1.1. Skadenivån "Level III" anger gränsen för flytning i armeringen och "Collapse" anger gränsen för brott i armeringen. En jämförelse med tidigare beräknade samband baserad på försök (Figur 31 hämtad från Forsén, 1985) visar stor likhet.



Figur 30. Beräknade samband mellan maxtryck och impulstäthet för två olika skadenivåer för en 150 mm tjock betongvägg.



Figur 31. Redovisade samband mellan maxtryck och impulstäthet för olika skadenivåer hos en 150 mm tjock betongvägg (Forsén 1985).

I Figur 30 och Figur 31 anges den positiva impulstätheten på den vågräta x-axeln. Sambanden mellan maxtryck och impulstäthet i graferna för viss typ av skada eller utböjning är emellertid beräknade med antagande om en realistisk luftstöt våg med både positivt och negativt tryck (vilket framgår t.ex. av Tabell 2). Relativt små laddningsvikter på relativt korta avstånd, vilket motsvaras av kombinationer av maxtryck och impulstäthet i den övre delen av diagrammen, ger en luftstöt våg med kortare varaktighet än för större laddningsvikter på större avstånd. Vid kort varaktighet hos luftstöt vågen, kommer både den positiva och den negativa delen av trycket att hinna påverka väggarnas rörelse till maximal utböjning, vilket inte sker för större laddningsvikter och avstånd. Detta innebär att den negativa delen av trycket kommer att minska den maximala utböjningen vid sådan kortvarig belastning jämfört med mer långvarig. Den positiva impulstätheten måste då ökas för att uppnå en viss skada eller utböjning jämfört med mer långvarig luftstöt våg. Resultatet blir

att linjerna som anger en viss skada eller utböjning kommer att böja av åt höger i den övre delen av diagrammen, vilket framgår av Figur 30 och Figur 31.

I många sammanhang bortser man från undertryckets effekt och graferna som anger kombinationer av maxtryck och impulstäthet kommer då inte att böja av åt höger i sin övre del utan fortsätta rakt uppåt. Om man vill bedöma en väggs motstånd mot inåtgående deformation vid luftstötstångsbelastning så är det konservativt (motståndsförmågan överskattas inte) om man bortser från effekterna av undertrycket.

Användbara parametrar som beskriver bärförmågan hos en bärande vägg är den karakteristiska impulstätheten (I_c) och det karakteristiska trycket (P_c) som ger en viss skadenivå. I_c och P_c är asymptoterna till de kurvor som redovisas i de diagramtyper som visas i Figur 30 och Figur 31. Som tidigare nämnts är för relativt tunga väggar och belastningar från laddningsvikter under i storleksordning 1000 kg impulstätheten den viktigaste parametern. Den karakteristiska impulstätheten för kollaps är enligt Figur 30 ca 1,4 kPas och för uppnådd flytgräns i armeringen ca 0,12 kPas. Dessa värden motsvaras i Figur 31 av ca 80 mm respektive $\ll$ 20 mm utböjning, vilket indikerar ett konservativt resultat av beräkningsprogrammet. Enligt Figur 6 inträffar flytning i armeringen vid ca 10 mm utböjning och brott vid över 200 mm utböjning.

6 Referenser

Axelsson, H., Tollbom, B. (1983). Luftstötvtågverkan på byggnadselement. Bestämning av belastningsförloppet från 8.4 kg hexotolladdningar. FOA Rapport C 20522-D4.

Berglund, R., Hansson, H. (2017). Experiments of Axially Loaded Walls for Urban Damage Assessment. FOI-R--4494--SE.

Edin, K. (1986). Luftstötvtågverkan på byggnadselement. Bestämning av belastningsförloppet från 48 kg sfäriska hexotol/trotylladdningar. FOA Rapport C 20622-2.6(2.4,2.3).

Edin, K., Forsén, R. (1991). Vapenverkan mot flervånings betongbyggnad II. Bestämning av skador från 2.1 kg sfäriska hexotolladdningar mot husfasad i skala 1:4. FOA Rapport C 20859-2.3.

Erkander, Å., Forsén, R. (1988). Luftstötvtågsbelastade tegelväggar. FOA Rapport C 20682-2.6.

Forsberg, A.-S., Ågårdh, L. (1997). Stålfiberarmerade betongplattor utsatta för tryckstöt i stötvtågstub- Försöksresultat 1997, FOA-R--97-00635-311--SE.

Forsén, R. (1984). Luftstötvtågsbelastade sandwich-väggelement. FOA Rapport C 20560-D4(A3).

Forsén, R. (1985). Airblast Loading of Wall Panels. Presented at the 9th International Symposium on Military Applications of Blast Simulation, Oxford, England, 23-27 September 1985. FOA Rapport C20586-D4.

Forsén, R. (1989). Increase of in-plane compressive forces due to inertia in wall panels subjected to air blast loading. FOA C 20769-2.3, 2.6.

Forsén, R. (1996). Splitterbelastning av betongplattor. Jämförelse av energiupptagande förmåga hos armerade betongplattor i två olika skalor. FOA-R--96-00262-7(6, 2.6)--SE.

Forsén, R. (1997). Belastning av betongplattor med tryck och splitter från 250 kg minbomber. FOA-R--00418-311--SE.

Forsén, R. (1999). Vapenverkan. Kombination av tryck och splitterbelastning mot betongplattor. (Weapon effects. Combination of blast and fragment loading of concrete slabs.) FOI dnr 99-3484/S.

Forsén, R. (2015). Response to RC slabs subjected to combined blast and fragment loading. Presented at DAPS2015, The Fifth International Conference on Design and Analysis of Protective Structures, Singapore, 2015-05-19 - 2015-05-21. FOI-S--5101--SE.

Forsén, R., Edin, K. (1991). Vapenverkan mot flervånings betongbyggnad III. Bestämning av skador från splitterladdningar mot husfasad i skala 1:4. FOA Rapport C 20860-2.3.

Forsén, R., Nordström, M. (1992). Damage to Reinforced Concrete Slabs Due to the Combination of Blast and Fragment Loading. Presented at Structures Under Shock and Impact, 2nd International Conference, Portsmouth, U.K., 16-18 June, 1992. FOA Report B20101-2.6.

Hallgren, M., Balazs, P. (1999). Armerade balkar av högpresterande betong belastade med luftstötstång, FOA-R--99-00983-311.

Hansson, H., Berglund, R. (2021). Experimental Investigation of Axially Loaded Wall Elements. FOI report in preparation.

Johansson, I. (1978). Försök med enkelspända betongplattor utsatta för luftstötstångbelastning. FOA Rapport C 20256-D4(A3).

Johansson, I., Edin, K. (1978). Försök med luftstötstångbelastade lättbetongväggar. FOA Rapport C 20257-D4(A3).

Jonasson, J.-E. (1986). Valvverkan i betongväggar. Luftstötstångbelastning av oarmerade väggelement. FOA Rapport C 20612-D6(D5).

Kihlström, U. (1988). Vapenverkan mot flervånings betongbyggnad I. Modell för beräkning av dynamiskt motstånd mot luftstötstångbelastning vid masströghetsberoende valvverkan. FOA Rapport C 20735-2.3.

Lindqvist, S., Gustavsson, T. (1996). Kombinerad verkan av stötstång och splitter. Skador på olika väggtyper vid detonation av spränggranater och minbomber. Experiment i full skala. FOA-R--96-00356-2.6--SE.

Magnusson, J. (1998). Fiberarmerade balkar i höghållfast betong utsatta för transient last, FOA-R--98-00808-311.

Magnusson, J. (2001). High performance concrete beams subjected to shock from air blast, FOA-R--00-01586-311.

Magnusson, J., Ågårdh, L. (1998). Armerade betongplattor utsatta för tryckstöt i stötstångstub – Försöksomgång 1998, FOA-R--99-01000-311.

Magnusson, J., Hallgren, M. (2001). High strength concrete beams subjected to shock waves from air blast – experimental results. In Proceedings of the 10th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. FOA-S--0206---SE.

Magnusson, J., Hallgren, M. (2003). High Performance Concrete Beams Subjected to Shock Waves from Air Blast, Part 2. FOI-R--1116--SE.

Nordström, M. (1992). Splitterbelastning av betongplattor I. Metodik för bestämning av energiupptagande förmåga hos armerade betongplattor belastade med olika splittertätheter. FOA Rapport D 20209-2.3.

Nordström, M. (1993). Splitterbelastning av betongplattor II. Energiupptagande förmåga hos armerade betongplattor belastade med olika splittertätheter. FOA Rapport D 20226-2.3.

Nordström, M. (1995a). Försök med experimentladdningar för simulering av splitterlast från spränggranater och minbomber. FOA Rapport R--95-00109-7(6, 2.6)--SE.

Nordström, M. (1995b). Splitterbelastning av betongplattor III. Energiupptagande förmåga hos armerade betongplattor belastade med olika kombinationer av splitterhastigheter, splittertätheter och splitterstorlekar. FOA Rapport R--95-00094-7(6,2.6)---SE.

Nordström, M., Forsén, R. (1994). Damage to Reinforced Concrete Slabs Due to Fragment Loading with different Fragment Velocities, Fragment Areal Densities and Sizes of Fragment. In Proceedings of "Third International Conference on Structures under Shock and Impact", Madrid, Spain, FOA-B--94-00017-2.6--SE.

Wang, G., (2019). Analyses and Simulation of Axially Loaded RC Walls Subjected to Airblast Load. FOI-R--4886--SE.

Wang, G., (2021). SDOF Solution for the response of gravity loaded walls subjected to blast load. FOI rapport under utarbetande.

Ågårdh, L. (1997a). Stålfiberarmerade betongplattor utsatta för detonationslaster i stötvågstub, FOA-R--97-00535-311--SE.

Ågårdh, L. (1997b). Stålfiberarmerade betongplattor utsatta för detonationslaster i stötvågstub - Mätresultat, FOA-R--97-00536-311--SE.

Åseborn, I. (1988). Luftstötvågsverkan på husfasad i skala 1:4. Bestämning av belastningsförloppet från 2,1 kg sfäriska hexotolladdningar. FOA C 20722-2.6.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se