

Vibration i PP-bjälklagselement

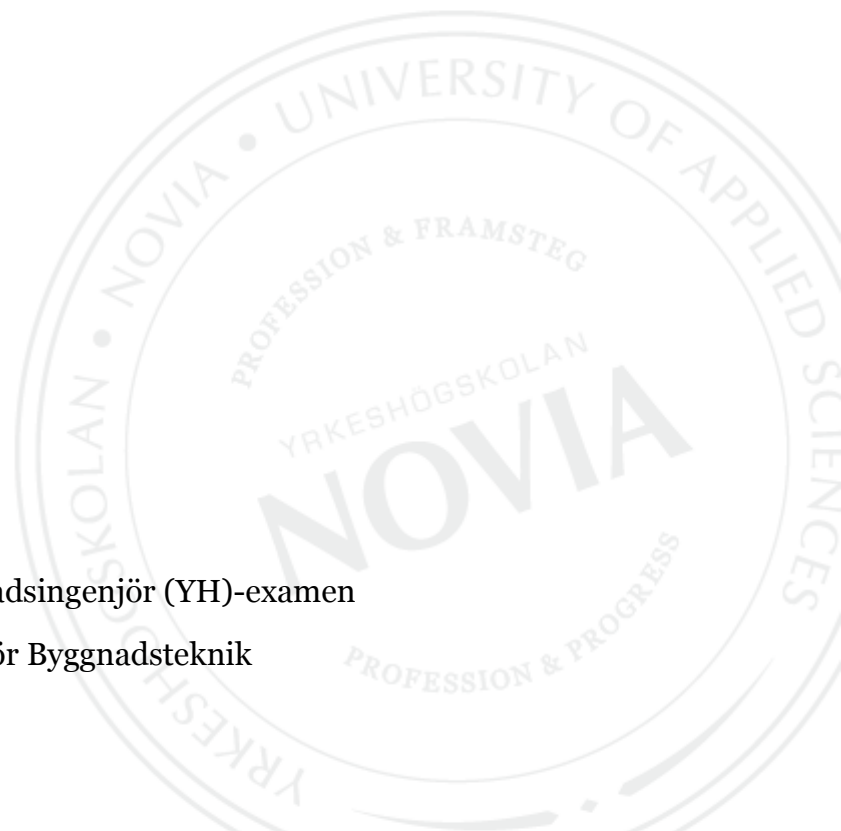
Teoretisk beräkning av vibration i PP-värmebjälklagen

Tommy Helenius

Examensarbete för Byggnadsingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet för Byggnadsteknik

Raseborg 2012



FÖRORD

Arbetet gjordes vid Yrkeshögskolan Novias utbildningsprogram för byggnadsteknik under vintern och våren 2012. PP-laatta Oy är beställare för arbetet. Som handledare från skolans sida fungerade lektor Niklas Nyman och som handledare från PP-laatta Oy fungerade diplomingenjör Martti Peljo.

Arbetet började hösten 2011 med att jag själv och två andra studerande byggde sex stycken prototyper av element, som sedan kopplades ihop till ett testgolv på vilket vibrationsmätningar i ett senare skede skall utföras och som beräkningarna gjordes för. En del av idéerna i produkten är patentskyddade, men en del av lösningarna är också sådana som inte går att patentera, varför alla deltagande i början av projektet skrev under ett kontrakt om sekretess. I och med detta tas det i detta arbete inte upp noggranna konstruktionstekniska detaljer av elementen, dessutom visas inte alla resultat noggrant i denna version.

PP-laatta Oy är ett nygrundat företag som grundades av Leif Sebbas och Martti Peljo i samband med att de började utveckla idén om PP-bjälklagelementen. Företagets verksamhetsområde är betong och betongprodukter, och företagets verkställande direktör är diplomingenjör Martti Peljo.

Arbetet var en unik möjlighet att få ta del av utvecklingen av en ny produkt, och lämpade sig därför också väl som ämne för en byggnadsingenjörs examensarbete.

Raseborg 10.01.2012

Tommy Helenius

EXAMENSARBETE

Författare: Tommy Helenius

Utbildningsprogram och ort: Byggnadsteknik Raseborg

Inriktning/alternativ/Fördjupning: Byggnadingenjör

Handledare: Niklas Nyman, Martti Peljo

Titel: Vibration i PP-bjälklagselement

Datum	Sidantal	Bilagor
06.02.2012	29	4

Sammanfattning

PP-bjälklagselement är en kombination av betong, en stålprofil och trä. Elementen har utvecklats med syftet att få ett miljövänligare alternativ till betongbjälklag genom att man minskar på användningen av betong och ersätter det med trä. Dessutom är elementen planerade så att de är mera energieffektiva eftersom de lagrar och sprider värme bättre än traditionella betongbjälklag.

I denna typ av konstruktioner där olika material kombineras till en helhet, är det viktigt att ta i beaktande materialens egenskaper som en helhet och i detta fall speciellt de olika fastsättningarnas inverkan på konstruktionens styvhet (EI). Styvheten är det som har största inverkan på vad man kommer till för resultat.

Syftet med mitt examensarbete är att ta reda på vilken vibrationsklass PP-elementen uppnår. För att göra detta måste elementens egenfrekvens, accelerationsamplitud och den lokala nedböjningen orsakad av en 1000 kN stor punktlast beräknas.

Som startdata för arbetet gavs olika styvheter (EI -värden) för elementen, tvärsnitt samt elementens mått. Med hjälp av dessa beräknades sedan egenfrekvensen, accelerationen och nedböjningen orsakad av en punktlast.

Beräkningarna visade att PP-elementens egenfrekvens är ca 9,94 Hz, accelerationsamplituden ca 0,06 m/s², vilket motsvarar normalklass för bostäder alltså klass C, och att nedböjningen är ca 0,074 mm, vilket motsvarar specialklass för bostäder, alltså klass A.

Språk:	Nyckelord:
Svenska	Vibration, styvhet, egenfrekvens, acceleration, nedböjning

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Tommy Helenius

Koulutusohjelma ja paikkakunta: Rakennustekniikka Raasepori

Suuntautumisvaihtoehto/Syventävät opinnot: Rakennusinsinööri

Ohjaajat: Niklas Nyman, Martti Peljo

Nimike: Värähtely PP-lattiaelementeissä

Päivämäärä	Sivumäärä	Liitteet
06.02.2012	29	4

Tiivistelmä

Työn tarkoitus on selvittää mihin värähtelyluokkaan PP-lattiaelementit sijoittuu. Tämän selvittämiseksi lasketaan elementtien ominaistaajuus, kiihtyvyyssamplitudi ja paikallisesta pistekuormasta aiheutuvan taipuman.

PP-lattiaelementti on eräänlainen liittorakenne jossa on yhdistetty betoni, teräsprofiili sekä puu. Ideana on saavuttaa ympäristöystävällisempiä elementtejä vähentämällä betonin käyttöä, ja lisäämällä puun käyttöä. Lisäksi elementit ovat suunniteltu energiatehokkaiksi niin että ne levittävät ja varaavat lämpöä paremmin kuin tavalliset välipohjalelementit.

Liittorakenteissa on olennaista ottaa huomioon eri materiaalien yhteisvaikutus sekä tässä tapauksessa liitosten vaikutus rakenteen jäykkyyteen (EI). Laskettaessa ominaistaajuutta, kiihtyvyyssamplitudia ja paikallista taipumaa juuri rakenteen jäykkyydellä on suuri vaikutus siihen mihin tuloksiin päädytään.

Lähtötietoina laskelmille oli jäykkyydet (EI), rakenteen poikkileikkaus sekä mitat. Näiden perusteella pystyttiin laskemaan teoreettinen ominaistaajuus, kiihtyvyyssamplitudi ja paikallinen taipuma.

Laskelmissa tultiin siihen tuloksiin että PP-elementtien ominaistaajuus on noin 9,94 Hertziä, kiihtyvyyssamplitudi noin $0,06 \text{ m/s}^2$, mikä vastaa asuintilojen normaali luokkaa eli luokka C, ja paikallinen taipuma on noin 0,074 mm, mikä vastaa asuintilojen erikoisluokkaa, eli luokka A.

Kieli: Avainsanat:

Ruotsi Jäykkyys, värähtely, ominaistaajuus, kiihtyvyys, taipuma

BACHELOR'S THESIS

Author: Tommy Helenius

Degree Programme: Construction

Specialization: Engineer

Supervisors: Niklas Nyman, Martti Peljo

Title: Vibrations in PP-preassembled floor units

Date	Number of pages	Appendices
06.02.2012	29	4

Summary

The purpose of this thesis is to determine which vibration class the PP-preassembled floor units achieve. In order to do this the following qualities of the units must be determined: the natural frequency, the acceleration and the deflection in the floors surface created by a local concentrated load of 1000 N.

The PP-preassembled floor units are a combination of concrete, a steel profile and wood. The purpose of this is to achieve more environmentally friendly preassembled units by decreasing the use of concrete and increasing the use of wood. The preassembled units are also designed to achieve better energy efficiency, by storing and spreading heat better than traditional preassembled floor units.

Essential in studying this type of preassembled units, where different materials are combined, is to consider how the different materials work together, and especially in the calculations done in this thesis, to consider the effect that the connections between the materials have on the stiffness of the construction. The stiffness is essential to the values you get when calculating the frequency, acceleration and deflection.

Start data that was given for this thesis was a section of the units, measurements of the floor being studied and different calculated stiffness's for the units.

The calculations give the PP-preassembled floor units a natural frequency of 9,94 Hz, an acceleration of 0,06 m/s², which would place it in class C, in other words normal class for residential buildings, and an deflection of 0,074 mm, which would place it in class A, in other words special class for residential and office buildings.

Language:	Key words:
Swedish	stiffness vibration, natural frequency, acceleration, deflection

Innehåll

EXAMENSARBETE	3
OPINNÄYTETYÖ	4
BACHELOR'S THESIS	5
Bilageförteckning	8
1 Inledning.....	1
2 Syfte och målsättning	3
3 Utgångspunkter.....	4
3.1 Störande vibration för människor	5
3.2 Vibration orsakad av gång	5
3.3 Lågfrekvensgolv	7
3.4 Högfrekvensgolv.....	7
4 Gränsvärden och klasser.....	8
4.1 Vibrationsklasser	8
4.2 Gränsvärden	10
4.3 Standarder i Nordamerika	13
5 Formler och beräkningssätt	14
5.1 Storheter och enheter	14
5.2 Räkneformler	14
5.2.1 Egenfrekvens	14
5.2.2 Nedböjning	15
5.2.3 Accelerationsamplitud	16
6 Uträkningar.....	18
6.1 Jämförelsevärden, hålbjälklagselement	18
6.2 PP-bjälklagselementen.....	19
6.3 PP-bjälklagselementen med $(EI)_1$ utgående från belastningsprov	21
6.3.1 Egenfrekvensen	21
6.3.2 Accelerationsamplituden	21
6.3.3 Nedböjningen	Error! Bookmark not defined.
6.4 PP-bjälklagselementet med $(EI)_1$ utgående från belastningsprov, och dämpning tagen i beaktande	22
6.4.1 Accelerationsamplituden	22
7 Resultat.....	23
8 Resultatgranskning	24
9 Förbättringsåtgärder.....	24
10 Slutsatser.....	25
Källförteckning.....	26
Bilagor	
Definitoner och termer.....	

Storheter, enheter, naturkonstanter och matematiska konstanter:	
Testupplägg:	
Uträkningar:.....	
PP-bjälklagsselementen utan träförstyvning	
Egenfrekvensen	
Accelerationsamplituden	
Nedböjningen	
PP-bjälklagsselementen med träförstyvning	
Egenfrekvensen	
Accelerationsamplituden	
Nedböjningen	
PP-bjälklagsselementen med medelvärdet för $(EI)_1$	
Egenfrekvensen	
Accelerationsamplituden	
Nedböjningen	
PP-bjälklagsselementet med medelvärde för $(EI)_1$,och dämpning tagen i beaktande	
Accelerationsamplituden	
Hålbjälklag P27	
Styvheten	
Egenfrekvensen	
Accelerationsamplituden	
Nedböjningen	
PP-bjälklagsselementen med (EI) utgående från belastningsprov	
Egenfrekvensen	
Accelerationsamplituden	
Nedböjningen	
PP-bjälklagsselementen med (EI) utgående från belastningsprov och dämpning tagen i beaktande.	
Beräkningar för de Nordamerikanska gränsvärdena	
Källor:.....	

Bilageförteckning

BILAGA 1. Definitoner och termer

BILAGA 2. Storheter, enheter, naturkonstanter och matematiska konstanter

BILAGA 3. Testupplägg

BILAGA 4. Uträkningar

1 Inledning

PP-värmebjälklagen som undersöks i detta arbete är bjälklagselement som är uppbyggda med en kombination av betong, stål och trä. Det faktum att elementen består av tre olika material gör det mera krävande att undersöka deras fysikaliska egenskaper eftersom man inte kan se på de olika materialens egenskaper skilt för sig, utan man måste analysera dem som en helhet. Detta innebär i praktiken att det blir det svagaste materialet som begränsar helhetens hållfasthet att om man till exempel undersöker hållfastheten för elementet som helhet. Elementets tvärsnitt ser ut som följande:

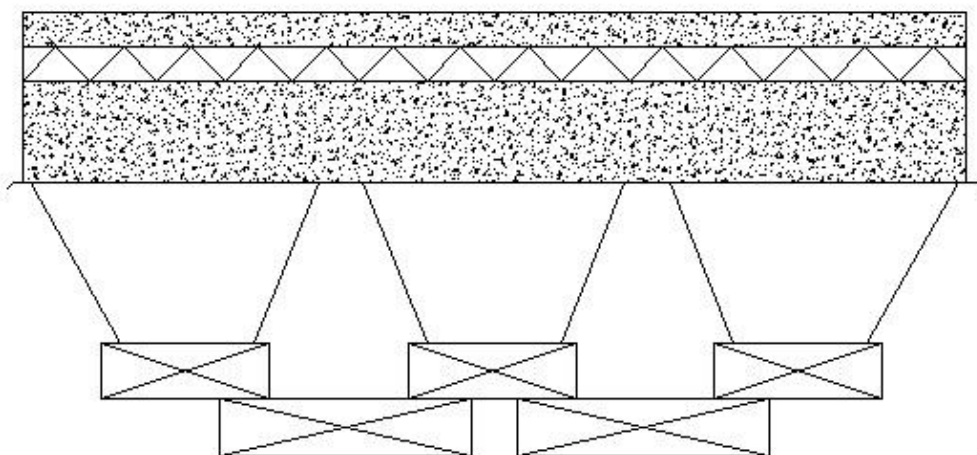


Bild 1 Tvärsnitt av ett PP-bjälklagselement, överst två lager betong med bergull mellan för ljudisolering, under det en stålprofil, och underst träplankor.

Målet med att kombinera dessa material till ett element, är att få en ny miljövänligare lösning till mellanbjälklag i och med att man i dessa element använder mindre betong än i traditionella mellanbjälklagselement och dessutom tillför trä. Men elementen är också uppbyggda så att de effektivare skall sprida och lagra värme i mellanbjälklagen, så att de i praktiken är en del av uppvärmningssystemet. Betongen är delad i två olika gjutningar med 50 mm:s bergullsskivor mellan sig som fungerar som ljudisolering för stegljud.

I detta arbete undersöker jag hurdan vibration som kan uppstå i elementen vid normal användning. Detta görs teoretiskt genom beräkningar, men som rekommenderad följdåtgärd görs också praktiska mätningar på elementen. De ingår inte i detta arbete. Vibrationsklasser och formler för beräkning av vibrationen kommer till största del från VTT:s anvisningar om vibrationsberäkningar för mellanbjälklag, men också en del värden och riktlinjer kommer från Eurokoodi 0. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Orsaken till att inte en större del kommer från Eurokoderna är att vibration ännu inte finns så grundligt behandlat där, och i den del där vibration tas upp gäller det närmast träbjälklag.

För en noggrannare uppfattning om de olika termer och begrepp som används i detta arbete, samt termer och begrepp som angår vibration i allmänhet se bilaga (1).

2 Syfte och målsättning

Målet med detta arbete är ta reda på vilka vibrationer som kan uppstå i elementen, dels dess egenfrekvens, dels vibration som kan uppstå av användning. Utgående från dessa resultat granskas sedan huruvida elementen uppfyller de krav som ställs för bostadshus och kontorsutrymmen och i vilken användningsklass de hamnar. Dessutom görs även en utredning av vilka åtgärder man kan tänkas vidta för att förbättra egenskaperna om man vill uppnå en bättre användningsklass. Som jämförelse görs även en teoretisk granskning av ett typiskt hålbjälklagselement med motsvarande vikt, tjocklek och spännvidd.

Arbetet begränsas så att endast den vibration som människor uppfattar beräknas och mäts, och den vibration som påverkar föremål lämnas bort. Detta görs eftersom det krävs speciella instrument och mera praktisk prövning för att bestämma den vibration som påverkar föremål. I praktiken är dessa ändå kopplade till varandra så att om konstruktionen av människan upplevs vibrera för mycket, så märks det också i föremål i form av skrammel, och om människan inte upplever vibrationen som störande, så uppstår ej heller störande vibration i föremål.

Anvisningarna utgivna av VTT är utarbetade med så kallad kvantitativ forskningsmetod, d.v.s. man har utfört flera tester och jämförelser på ett antal olika typer av golv för att kunna bestämma hur vibration i golv beter sig och kunna definiera gränsvärden. Också resultaten i detta arbete är beräknade enligt en kvantitativ forskningsmetod i och med att det i beräkningar prövas ett antal olika användningssituationer och startvärden.

3 Utgångspunkter

Yttre faktorer som kan orsaka vibration i en konstruktion som bör tas i beaktande är gång, simultana rörelser i samma rytm gjorda av människor, vibration från trafik som överförs via markgrunden samt vindbelastningar. Allmänna regler för en konstruktion vad gäller vibration är att den inte får orsaka användaren obehag, och får ej heller skada konstruktionens eller andra konstruktionsdelars funktionsduglighet. Skador som kan uppstå av vibration är bl.a. sprickor i mellanväggar, skador i ytmaterial och skador i känsliga material som lagras i byggnaden. (SFS-käsikirja 200, 2007, s. 96)

Vibration orsakad av gång granskas särskilt i bostads-, samlings-, försäljnings- och kontorsutrymmen utgående från hur människan känner den. Detta görs genom att granska den nedböjning som 1 KN orsakar i konstruktionen eller den acceleration som orsakas av en vuxen persons gång. I praktiken finns det belastningar som orsakar en större väckningskraft än vad normal gång av en vuxen gör, till exempel springande och hoppande barn, men dessa förekommer inte lika ofta i normalt bruk. Om golvkonstruktionen i någon av dessa har en egenfrekvens som överstiger 9-10 Hz, krävs det noggrannare granskning där man bl.a. beaktar eventuella dämpande faktorer och förstärkningar. Om egenfrekvensen är över 9-10 Hz är det oftast nedböjningen som blir det avgörande kriteriet vid beräkningar, medan det för konstruktioner med egenfrekvens under 9-10 Hz är accelerationen i rörelsen som sker som är avgörande.

Då man däremot granskar hurdan effekt vibrationen har på föremål i en bostad, använder man istället den lutning på golvets yta som sker då den belastas med en punktlast på 1KN, som avgörande kriterier. (RIL 205-1-2007, 2007, s. 196 ; Talja, Toratti, Järvinen, 2002 ; Suomalainen, 2007)

3.1 Störande vibration för människor

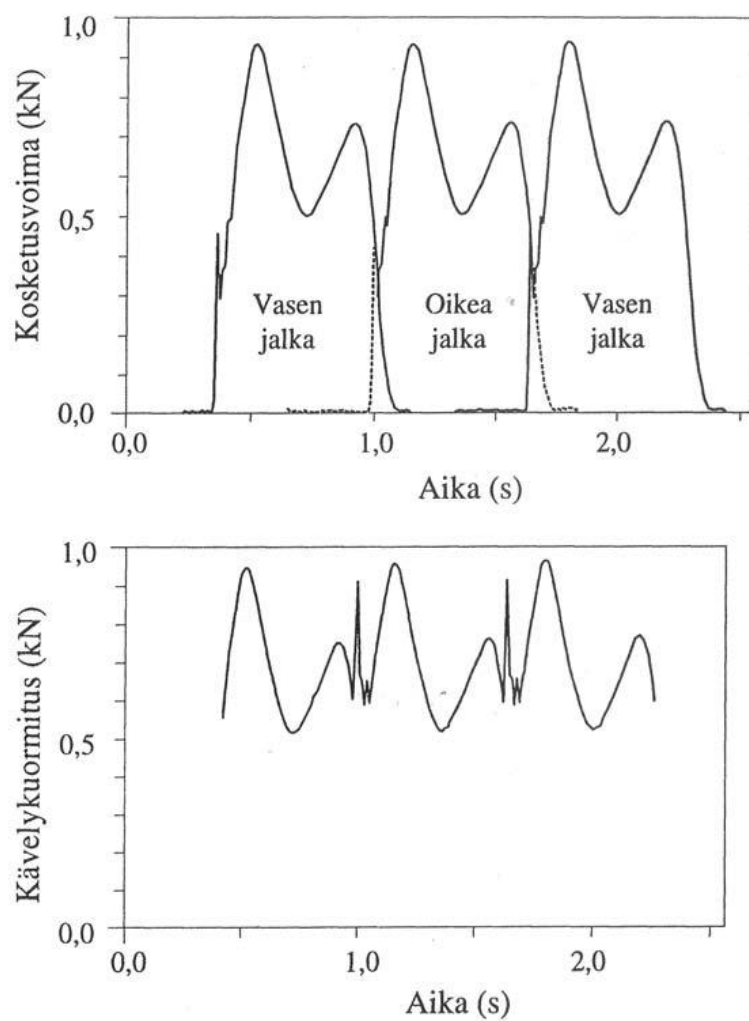
Människor kan uppleva vibrationer som störande antingen genom att de känner det i kroppen som gungande i golvet, eller också genom att föremål inne lägenheten vibrerar och har ljud till exempel då glas och kärl i skåpen börjar skramla.

Fastän en liten vibration eller gungning i golvet kan ses som en trivial sak vad gäller en konstruktions funktionsduglighet, så kan långvarig utsättning för vibrationer och darrningar vara direkt skadligt för människan. Det kan bland annat orsaka illamående och stress, som sedan i sig kan leda till allvarligare sjukdomar.

3.2 Vibration orsakad av gång

En människa som går på ett golv och orsakar vibration känner oftast inte själv av vibrationen eller nedböjningen den orsakar, utan den uppfattas snarare av människor i samma rum som sitter stilla, som kan känna av vibration, resonans och nedböjning. Vibrationen som gång orsakar beror oftast på förhållandet mellan konstruktionens egenvikt och dess egenfrekvens. I golv där vikten är stor och egenfrekvensen låg, blir det egenfrekvensen som orsakar vibration, medan det i golv med liten massa och hög egenfrekvens blir nedböjningar orsakade av gången som orsakar vibrationen. På basen av detta brukar man dela in golvkonstruktioner i lågfrekvensgolv och högfrekvensgolv. I praktiken blir det oftast så att tunga golv är lågfrekvensgolv och lätta golv är högfrekvensgolv. (Talja, Toratti, Järvinen, 2002, s. 9)

En människas gång sker oftast med en stegfrekvens på 1,4 - 2,5 Hz, och inomhus ligger den oftast på ca 1,6 Hz, medan stegfrekvensen för en springande människa är ca 3 Hz. Belastningen som uppstår av personens steg kan visas enligt följande figur: (Suomalainen , 2007, s. 20)



Figur 1 Belastningen av en människas steg i kN som en funktion av tiden i sekunder. (Suomalainen, , 2007, s. 20)

3.3 Lågfrequensgolv

Ett typiskt lågfrequensgolv har en egenvikt på över 300 kg/m^2 , en egenfrekvens under 10 Hz och en relativt lång spännvidd på över 10 m. I dessa golv känner människan sällan av vibration orsakad av egna steg, utan det blir snarare golvets egenfrekvens som märks i form av att man upplever att hela golvet gungar, vilket kan orsaka människan en känsla av obehag. Några exempel på ett sådant golv är till exempel, hålbjälklag av betong, som har en egenvikt som varierar mellan $265 - 560 \text{ kg/m}^2$ och en max spännvidd som kan gå från 8,5 m upp till 20 m, och t-formade bjälklagselement av betong, med egenvikt som varierar mellan $200-600 \text{ kg/m}^2$ och max spännvidder mellan 12 – 25 m. (Talja, Toratti, Järvinen, 2002, s. 14-15)

3.4 Högfrequensgolv

Ett typiskt högfrequensgolv har en egenvikt under 300 kg/m^2 , en egenfrekvens över 10 Hz och oftast korta spännvidder under 10 m. Här är den vibration som människan känner oftast mera lokal, så att man upplever att golvet under fötterna vibrerar där man stiger då man går, och också detta kan orsaka en känsla av obehag. Ett exempel på högfrequens golv är träbjälklag i egnahemshus, där egenvikten oftast ligger mellan $50 - 100 \text{ kg/m}^2$ och spännvidderna oftast är under 10 m. (Talja, Toratti, Järvinen, 2002, s. 14-15)

PP-bjälklagselementen som undersöks i detta examensarbete har en spännvidd på 6,75 m och en egenvikt på ca 300 kg/m^2 som alltså ligger precis vid gränsvärdet. Utgående från det kan man anta att dess egenfrekvens kommer att ligga mellan 9-10 Hz. Därför blir det också nödvändigt att granska elementen både för de egenskaper som gäller för högfrequensgolv och för de som gäller lågfrequensgolv.

4 Gränsvärden och klasser

4.1 Vibrationsklasser

För att dela in golv i olika klasser enligt hur gång orsakar vibration i dem, lönar det sig att skilja på den vibration som uppfattas av en människa, och den som märks i form av att föremål i rummet kan börja röra på sig. Detta görs i följande tabell (tabell 1) så att bokstaven motsvarar den vibration som människan känner, och siffran motsvarar den vibration som påverkar föremål. I detta fall används kärl och blad på växter som exempel på föremål som kan påverkas av vibration.

Tabell 1. Vibrationsklasser indelade enligt hur människan märker det och hur det märks på föremål.

Vibration som uppfattas av människan	Vibration som uppstår i föremål
A – Märkbar vibration förekommer oftast inte	1 – Skrammel i kärl och darningar i växters blad förekommer oftast inte
B – Vibration förekommer men den är knappt märkbar	2 – Inget skrammel i kärl förekommer och darningar i blad är knappt märkbart
C – Vibrationen är märkbar	3 – Knappt märkbart skrammel i kärl och märkbara darningar i växters blad
D – Vibrationen är tydligt märkbar	4 – Tydligt märkbart skrammel i kärl och tydligt märkbara darningar i växters blad
E – Kraftig vibration	5 – Kraftigt skrammel i kärl och kraftiga darningar i växters blad

(Talja, Toratti, Järvinen, 2002, s. 16)

Som följande kan man då slå ihop dessa till en tillämpad klass utifrån vilken man kan bedöma vad som lämpar sig för kontorsutrymmen och bostäder. I dessa klasser som visas i tabell (2), skiljer man också på vibration som leds från en lägenhet till en annan, och vibration där källan för vibrationen finns i samma rum. I detta fall görs alla beräkningar och mätningar enligt vibration där källan för vibrationen är i samma rum.

Tabell 2. Tillämpade vibrationsklasser för bostads- och kontorsutrymmen.

Vibrationsklass för golvet	Tillämpningsområde
A1	Normalklass för vibration som leds från en lägenhet till en annan. Specialklass då källan för vibrationen är i samma rum.
B2	Lägre klass för vibration som leds från en lägenhet till en annan. Högre klass för bostads- och kontorsutrymmen då källan för vibrationen är i samma rum.
C3	Normalklass för bostads- och kontorsutrymmen då källan för vibrationen är i samma rum.
D4	Lägre klass för bostadshus då källan för vibration är i samma rum. (t.ex. vindsvåningar i egnahemshus eller fritidsbostäder)
E5	Inga begränsningar för vibration

(Talja, Toratti, Järvinen, 2002, s. 17)

4.2 Gränsvärden

Följande steg är då att definiera de olika gränsvärden som ställs för de olika klasserna, samt vilka alla egenskaper som skall granskas. De egenskaper för golven som granskas i detta arbete är:

- Golvets lägsta egenfrekvens f_0 [Hz]. Golvens egenfrekvens f_0 delar in golven i lågfrekvensgolv och högfrekvensgolv enligt: $f_0 > 10$ Hz = högfrekvensgolv, och $f_0 < 10$ Hz = lågfrekvensgolv.
- Accelerationsamplituden a [m/s^2]. Detta gäller i praktiken oftast vibration som sker i lågfrekvensgolvets egenfrekvens.
- Nedböjningen δ [mm] orsakad av en 1 kN stor punktlast. Detta gäller i praktiken oftast för högfrekvensgolv. Avståndet mellan punkten som granskas och kraften, bör vara minst 600 mm.

Då vibration som förekommer i föremål tas i beaktande, granskas även lutningen ϕ [mm/1,2m] som orsakad av en 1 kN stor punktlast, men i detta fall granskas endast vibration som påverkar människan.

Dessa egenskaper och gränsvärden gäller dock endast för vibration, och förutom dessa bör golven uppfylla nedböjnings- och hållfasthetskraven som ställs i Eurokod-standarderna. (Talja, Toratti, Järvinen, 2002, s. 17)

Då dessa egenskaper och dess gränsvärden används i bedömningen kan man använda de gränsvärden som visas i tabell 3.

Tabell 3. Gränsvärden för vibration i lågfrekvensgolv och högfrekvensgolv, där a är accelerationsamplituden och δ är nedböjningen

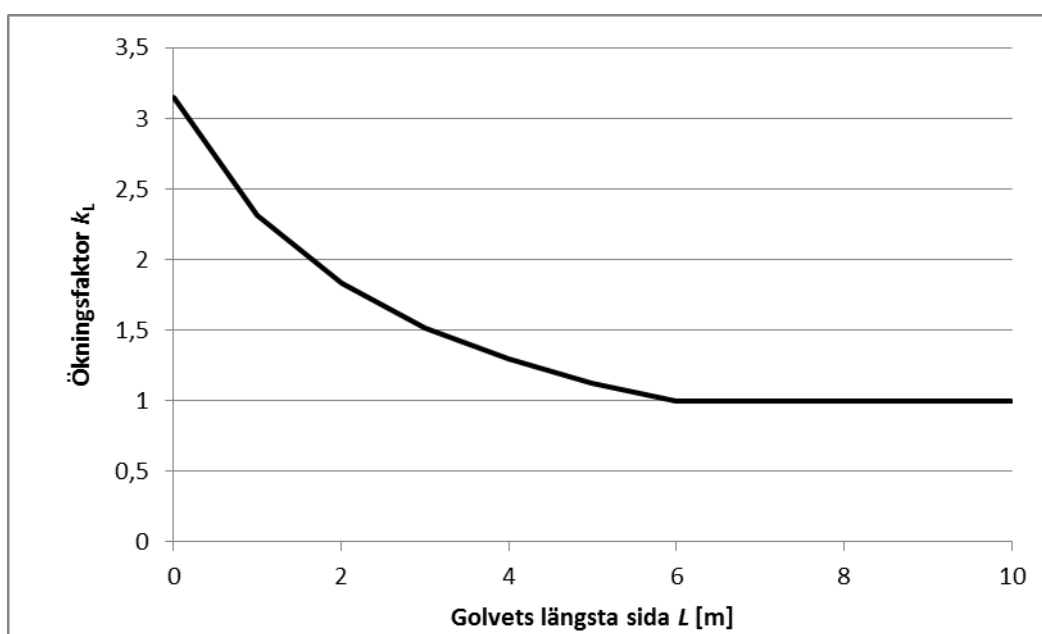
Lågfrekvensgolv: Accelerationsvillkor		Högfrekvensgolv: Nedböjningsvillkor	
Klass	$3 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 10 \text{ Hz}$	Klass	$f_0 > 10 \text{ Hz}$
A	$a \leq 0,03 \text{ m/s}^2$	A	$\delta \leq 0,12 \text{ mm}$
B	$a \leq 0,05 \text{ m/s}^2$	B	$\delta \leq 0,25 \text{ mm}$
C	$a \leq 0,075 \text{ m/s}^2$	C	$\delta \leq 0,5 \text{ mm}$
D	$a \leq 0,12 \text{ m/s}^2$	D	$\delta \leq 1,0 \text{ mm}$
E	$a > 0,12 \text{ m/s}^2$	E	$\delta > 1,0 \text{ mm}$

(Talja, Toratti, Järvinen, 2002, s. 19)

Av dessa gränsvärden kan villkoren för acceleration och nedböjning ökas med faktorn k_L om golvets längsta sida är mindre än 6 m. Faktorn k_L beräknas enligt följande (formel 1):

$$k_L = \frac{1}{0,318 + 0114 \cdot L}, \quad (1)$$

där L är golvets längsta sida mätt i meter. Faktorn k_L är beroende av golvets längd enligt följande figur (figur 2): (Talja, Toratti, Järvinen, 2002, s. 18-19; RIL 205-1-2007, 2007)



Figur 2. Ökningsfaktorn k_L som funktion av golvets längsta sida L .

I detta fall är dock måtten på golvet som provas 6,75 m x 5,04 m (se bilaga 3), alltså kan inte ökningsfaktorn tillämpas i detta fall. Om golvets spännvidd skulle förkortas, så att det till exempel skulle bli ett kvadratisk golv med måtten 5,04 m x 5,04 m, skulle ökningsfaktorn, enligt beräkningar med formel 1, bli 1,12. Detta skulle i praktiken alltså innebära att värdena för accelerationsamplituden och nedböjningen i tabell 3, skulle få ökas med 12 %.

4.3 Standarder i Nordamerika

Som jämförelse med de standarder som finns VTT:s anvisningar kan man se på standarder som används i Nordamerika. De innehåller också olika gränsvärden för vibration beroende på användningsändamålet av byggnaden. Dessa anvisningar är utformade i ett samarbete mellan det amerikanska stålkonstruktionsinstitutet och det kanadensiska stålkonstruktionsinstitutet. Räkneformlerna som används i dessa anvisningar är liknande de i VTT:s anvisningar, men i dessa anges endast gränsvärden för accelerationen och den anges enligt hur många procent av tyngdkraftsaccelerationen den utgör. Dessutom tas det upp vilken dämpningsfaktor ζ , som kan användas i olika fall. Dämpningsfaktorn ζ , används också i de beräkningar som görs enligt VTT:s anvisningar, men i de anvisningarna är värdet antingen 0,02 eller 0,03 medan det i de nordamerikanska standarderna kan vara ännu högre. De olika gränsvärdena ser ut som följande:

Tabell 4. Gränsvärden för vibration enligt Nordamerikanska standarder, där a_{max} är accelerationen i konstruktionen och g är tyngdkraftsaccelerationen.

Typ av byggnad eller konstruktion	Dämpningsfaktor	Gränsvärde för acceleration $a_{max}/g \times 100 \%$
Kontor, bostad eller kyrka	0,02-0,05	0,5 %
Köpcenter	0,02	1,5 %
Gångbro, inomhus	0,01	1,5 %
Gångbro, utomhus	0,01	5 %

(Allen, Ungar, Murray, 2003, s. 18)

5 Formler och beräkningssätt

5.1 Storheter och enheter

De olika storheter, enheter, naturkonstanter samt matematiska konstanter som används i beräkningarna för vibration i detta arbete, finns uppräknade samt förklarade i bilaga (2)

5.2 Räkneformler

5.2.1 Egenfrekvens

Då man gör beräkningar för vibration skiljer man på om golvet är stött enbart på två sidor eller om det stöds på alla fyra sidor. Beroende på detta ser formlerna för beräkningen lite olika ut. I detta fall beräknas golvet som att det endast är stött på två sidor, eftersom det uppbyggda testgolvet också enbart är stött på två sidor (se bilaga 3). I praktiken blir det för den här typen av element, liksom också för hålbjälklag, så att de alltid är stödda enbart från två sidor eftersom elementen fungerar som balkar och i sidled endast stöds på varandra. För att beräkna egenfrekvensen f_0 , statiska nedböjningen δ_{\max} , accelerationsamplituden a_{\max} och effektiva tyngden W i ett golv stött på två eller fyra sidor används följande formler:

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[2\left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_l}}, \quad (2)$$

där $(EI)_b$ är konstruktionens styvhet på bredden, $(EI)_l$ är konstruktionens styvhet på längden, l är konstruktionens längd, b är avståndet mellan golvbalkarna och m är egenvikten inklusive nyttolast. Detta gäller då konstruktionen är stödd på alla fyra sidor. Oftast har dock stöd som går i samma riktning som balkarna i konstruktionen inte så stor effekt på vibrationen, och eftersom vi dessutom i detta fall använder endast två stöd för konstruktionen, kan formeln i detta fall förenklas enligt följande:

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}, \quad (3)$$

där $(EI)_l$ är konstruktionens styvhet på längden, l är konstruktionens längd och m är konstruktionens egenvikt inklusive nyttolast.

5.2.2 Nedböjning

Om man sedan får ett resultat för f_0 som är över 10 Hz måste man alltså granska hurdan nedböjning som orsakas vid en 1 kN stor punktlast, detta görs enligt följande:

$$\delta_{\max} = \gamma \cdot \frac{Fl^2}{(EI)_l}, \quad (4)$$

där F är punktlastens storlek, d.v.s. 1 kN, $(EI)_l$ är konstruktionens styvhet på längden, l är konstruktionens längd och γ är en faktor som för ett golv stött på fyra sidor beräknas enligt följande:

$$\gamma = \frac{4}{\alpha\pi^4} \sum_m \sum_n \frac{1}{(2m-1)^4 + \beta \left(\frac{2n-1}{\alpha} \right)^4}, \quad (5)$$

där m är konstruktionens egenvikt inklusive nyttolast, och där α beräknas enligt följande:

$$\alpha = \frac{b}{l}, \quad (6)$$

där b är konstruktionens bredd och l är konstruktionens längd, och β beräknas enligt följande:

$$\beta = \frac{(EI)_b}{(EI)_l}, \quad (7)$$

där $(EI)_b$ är konstruktionens styvhet på bredden och $(EI)_l$ är konstruktionens styvhet på längden.

Men också i detta fall har stöd som går i samma riktning som golvbalkarna liten betydelse för konstruktionens funktion, i detta fall nedböjningen, och oftast kan en förenklad formel användas för att beräkna faktorn γ . Eftersom konstruktionen som granskas i detta arbete sannolikt kommer att få en beräknad egenfrekvens f_0 som är nära gränsvärdet 10 Hz, granskas både accelerationen och nedböjningen. Och då nedböjningen för konstruktionen i fråga i detta arbete beräknas, kan också den förenklade formeln för faktorn γ , användas i detta fall eftersom golvet som granskas endast stöds från två sidor (se bilaga 3). Den förenklade formeln för faktorn γ , då golvet stöds på två sidor, ser ut enligt följande:

$$\gamma = \frac{1}{42 \cdot \left[\frac{(EI)_b}{(EI)_l} \right]^{1/4}}, \quad (8)$$

där $(EI)_b$ är konstruktionens styvhet på bredden och $(EI)_l$ är konstruktionens styvhet på längden.

5.2.3 Accelerationsamplitud

Om beräkningarna av egenfrekvensen f_0 ger ett resultat som är mindre än 10 Hz, bör alltså accelerationsamplituden a_{\max} granskas. Detta görs med följande formel:

$$a_{\max} = \frac{R \cdot P}{W \cdot \zeta} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,35f_0}, \quad (9)$$

där R är reduceringsfaktorn ($=0,7$), P är tyngden av personen som går på konstruktionen, e är konstanten nepers tal ($=2,718$), f_0 är egenfrekvensen, ζ är dämpningsförhållandet och W är effektiva tyngden. För dämpningsförhållandet ζ , används 0,02 om sekundära konstruktioner som mellanväggar och fasta möbler inte tas i beaktande, och 0,03 om de tas i beaktande.

I detta fall görs beräkningarna enligt belastningen som uppstår då en person som väger ca 80 kg, går på konstruktionen. Detta ger då en tyngd på 800 N ($80 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 800 \text{ N}$). Dämpningsförhållandet ζ väljs oftast till 0,03, men om golvet inte har mycket icke-bärande konstruktioner på sig, som t.ex. mellanväggar och fasta möbler, används ett värde på 0,02 som dämpningsförhållande. I detta arbete görs beräkningar både med dämpningsförhållande 0,02 och 0,03. Den effektiva tyngden W beräknas enligt följande:

$$W = m \cdot b_{\text{eff}} \cdot l, \quad (10)$$

där m är konstruktionens egenvikt inklusive nyttolast, l är konstruktionens längd och b_{eff} är effektiva bredden som beräknas enligt följande:

$$b_{\text{eff}} = 1,0 \cdot \left[\frac{(EI)_b}{(EI)_l} \right]^{1/4} \cdot l, \quad (11)$$

där $(EI)_b$ är konstruktionens styvhet på bredden, $(EI)_l$ är konstruktionens styvhet på längden och l är konstruktionens längd. Faktorn 1,0 ändras till 2,0 om det är fråga om en konstruktion som stöds från alla fyra sidor.

(Talja, Toratti, Järvinen, 2002 ; Suomalainen, 2007; RIL 205-1-2007, 2007)

6 Uträkningar

6.1 Jämförelsevärden, hålbjälklagselement

Som utgångspunkt beräknas egenvikten för ett typiskt hålbjälklagselement. Beräkningarna ger dock endast ett ungefärligt resultat eftersom tröghetsmomentet för elementet i fråga inte går att beräkna exakt enligt det tvärsnitt som elementet har i verkligheten, men resultaten kan ändå anses riktgivande. Hålbjälklagselementet som granskas är i detta fall ett P27-element med en bredd på 1200 mm, en höjd på 265 mm, en längd på 6,75 m och en egenvikt på 360 kg/m^2 . Som betongens elasticitetsmodul E används 31000 N/mm^2 . Beräkningarna görs utan att ta i beaktande dämpande egenskaper beroende på sekundära konstruktioner som mellanväggar och fasta möbler, och golvet anses stött endast från två sidor.

Då beräkningar görs med föregående exempel får man att hålbjälklagselementets egenfrekvens $f_0 \approx 10,2 \text{ Hz}$, accelerationsamplitud $a_{\max} \approx 0,034 \text{ m/s}^2$ och nedböjningen $\delta_{\max} \approx 0,02 \text{ mm}$. Då dessa värden jämförs med de värdena som finns i tabell (3), får man alltså att elementet är på gränsen mellan ett högfrequensgolv och ett lågfrequensgolv, det når accelerationsklass B, samt klass A för nedböjning. För noggrannare uträkningar se bilaga (4).

Eftersom hålbjälklagselement som granskades i föregående exempel hamnade på gränsen mellan högfrequensgolv och lågfrequensgolv, vilket också PP-elementet som granskas högst troligt kommer att göra, utgör det ett passligt exempel att jämföra med de resultat som uppnås då PP-elementen granskas.

6.2 PP-bjälklagslementen

Som följande görs en teoretisk granskning av PP-bjälklagslementen, vilket är huvudsyftet med detta arbete. Också i detta fall spelar konstruktionens styvheter en stor roll i beräkningarna, och också här är styvheten svår att bestämma exakt. Styvheterna för PP-bjälklagslementen som används i beräkningarna i detta arbete har beräknats av DI Martti Peljo från PP-Laatta Oy. Styvheten är beräknad både utan träförstyvning och med den, detta för att den verkliga styvheten för elementet kommer att ligga någonstans där emellan eftersom träförstyvnings fastsättning kan röra på sig. Därför görs beräkningar både med styvheten utan träförstyvning och med styvheten med träförstyvning, samt med ett medeltal av dessa två. Dessutom görs en beräkning med medeltalet för styvheten, där också sekundära konstruktioners dämpande effekt tas i beaktande, d.v.s. om det skulle finnas icke-bärande mellanväggar och fasta möbler på golvet. Som sista görs även en beräkning där det används en styvhet som beräknas utifrån ett belastningsprov som görs på ett element. Denna beräkning görs också med den högre dämpningsfaktorn.

Elementen som granskas har en längd på 6,75 m, en bredd på 0,84 m och en egenvikt på ca 300 kg/m². Elementets styvhet på bredden $(EI)_b = 2210000 \text{ Nm}^2/\text{m}$, på längden, utan träförstyvning, $(EI)_l = 10800000 \text{ Nm}^2/\text{m}$, med träförstyvning, $(EI)_l = 34300000 \text{ Nm}^2/\text{m}$ och medeltalet av styvheterna på längden, $(EI)_l = 25550000 \text{ Nm}^2/\text{m}$.

Utgående från ett belastningsprov som gjordes på ett PP-element, där det belastades tills det gav efter helt och hållet, kan man beräkna att då elementet belastades med 1,5 kN/m², vilket ungefär motsvarar normal användning, hade det en styvhet $(EI)_l \approx 27420000 \text{ Nm}^2/\text{m}$. Enligt Eurokoderna räknas dock 2,0 kN/m² som normal vistelselast, men bland resultaten från belastningsprovet fanns endast avläsningar för styvheten vid 1,5 kN/m² och 4,0 kN/m². (RIL 201-1-2011, 2011)

Som följande visas en del av beräkningarna för PP-elementen med $(EI)_1$ utgående från belastningsprov, samt med $(EI)_1$ utgående från belastningsprov och med högre dämpningsförhållande. Detta eftersom dessa sannolikt kommer att vara de resultat som bäst motsvarar den verkliga situationen. De övriga beräkningarna visas i bilaga (4), och dess resultat sammanställs i tabell (6).

6.3 PP-bjälklagselementen med $(EI)_1$ utgående från belastningsprov

6.3.1 Egenfrekvensen

För att beräkna egenfrekvensen f_0 för elementet, med den styvhet som beräknats enligt belastningsprovet, används formel (3) enligt följande:

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot 6,75^2} \sqrt{\frac{27420000}{330}}, \quad (12)$$

Detta ger att egenfrekvensen $f_0 \approx 9,94 \text{ Hz}$, vilket skulle innebära att elementet är ett lågfrekvensgolv, dock väldigt nära gränsen för att vara ett högfrekvensgolv.

6.3.2 Accelerationsamplituden

För att beräkna accelerationsamplituden a_{\max} , beräknas först effektiva bredden b_{eff} med hjälp av formel (11) enligt följande:

$$b_{\text{eff}} = 1,0 \cdot \left[\frac{2210000}{27420000} \right]^{1/4} \cdot 6,75, \quad (13)$$

vilket ger att effektiva bredden $b_{\text{eff}} \approx 3,6 \text{ m}$. Därefter kan effektiva tyngden W , beräknas med formel (10)

6.4 PP-bjälklagselementet med $(EI)_1$ utgående från belastningsprov, och dämpning tagen i beaktande

6.4.1 Accelerationsamplituden

Då man gör beräkningarna för vibrationen på ett golv i ett rum där det finns mycket sekundära konstruktioner, som icke-bärande mellanväggar och fasta möbler, kan man som dämpningsförhållande ζ , använda värdet 0,03 istället för 0,02. Detta är möjligt eftersom de sekundära konstruktionerna har en förstyvande och en dämpande effekt på golvets svängningsrörelser. I beräkningarna är det accelerationsamplituden a_{\max} som får ett lägre värde då dämpningsfaktorn ökar.

Då man alltså beräknar accelerationsamplituden för elementet, med ett medelvärde för styvhetererna och med högre dämpningsförhållande, använder man formel (9) enligt följande:

$$a_{\max} = \frac{0,07 \cdot 800}{8011 \cdot 0,03} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,359,94}, \quad (18)$$

Detta ger att accelerationsamplituden $a_{\max} \approx 0,06 \text{ m/s}^2$, då den med den lägre dämpningsfaktorn fick värdet $a_{\max} \approx 0,09 \text{ m/s}^2$. Då man igen jämför med de värden som finns i tabell (3), kan man konstatera att klassen då blir C, d.v.s. normalklass för bostadsutrymmen.

7 Resultat

Som följande kan resultaten för de olika konstruktionernas accelerationsamplitud a_{\max} och nedböjning δ_{\max} sammanställas i en tabell enligt vilken vibrationsklass de hamnar i. För PP-bjälklagssegmenten har alltså gjorts beräkningar med styvheten utan trädelen, med styvheten med trädelen, med ett medelvärde av styvheterna med och utan trädelen, med ett medelvärde för styvheterna med och utan trädelen och med ett högre dämpningsförhållande, med en styvhet beräknad utgående från ett belastningsprov och med en styvhet beräknad utgående från ett belastningsprov med högre dämpningsförhållande.

8 Resultatgranskning

Av alla de olika (EI) värdena kan det som beräknats utgående från ett belastningsprov, anses som det mest trovärdiga, och om man dessutom tänker sig att elementen används i ett golv med mellanväggar och fasta möbler på som dämpar vibration, uppnår det klass C för acceleration, d.v.s. normalklass för bostäder. Dock bör man komma ihåg att det element som ett belastningsprov gjordes på var en av de första prototyperna, och den kanske inte är konstruerad lika noggrant som den färdiga produkten kommer att vara, men dessa resultat kan ändå ses som riktgivande. För att ordentligt kunna fastställa elementens styvhet måste ett större antal belastningsprov göras så att man uppnår konsekventa resultat. Dessutom bör det utföras praktiska mätningar på accelerationen i elementen för att kunna jämföra den med den teoretiskt beräknade accelerationen, och kunna bedöma dess trovärdighet.

9 Förbättringsåtgärder

Om man önskar uppnå bättre vibrationsklass för elementen då man granskar accelerationen, är de enklaste åtgärderna att minska på elementens egenvikt eller att förkorta spännvidden. I detta fall var accelerationen avgörande kriteriet eftersom nedböjningen i de flesta fall motsvarade högsta klass. Att minska på elementens egenvikt är dock i praktiken svårt eftersom det då högst troligt skulle minska på konstruktionens hållfasthet. Att minska på spännvidden skulle inte utgöra några problem, men det minskar istället på elementens användbarhet och eftersom ett tänkt användningssyfte för elementen är trähöghus, är spännvidder under 6 meter inte väldigt användbart. Det bästa sättet att uppnå bättre vibrationsklasser skulle vara att göra konstruktionen styvare, d.v.s. uppnå högre (EI)-värde. Detta t.ex. genom att förhindra rörelse i fastsättningar mellan materialen, eller att lämna bort de understa träplankorna från elementet och istället montera dem efteråt i andra ledet så att de binder ihop alla elementen i sidled.

10 Slutsatser

Av detta arbete kan man dra slutsatsen att PP-bjälklagselementen troligtvis lämpar sig för användning i bostads- och kontorsutrymmen och hamnar i vibrationsklass C, d.v.s. normalklass. Dock bör ytterligare belastningsprov på dessa element utföras för att noggrannare kunna bestämma dess styvhet och således kunna göra noggrannare beräkningar för vibration. Dessutom vore det rekommenderbart att göra ett antal praktiska mätningar av bl.a. acceleration på dessa element för att kunna jämföra resultaten och värdera dess trovärdighet. Vad gäller själva elementen och deras konstruktion vore det bra att göra en noggrannare undersökning av hur dess styvhet kan förbättras.

Den största utmaningen med detta arbete var att tolka givna startdata med olika styvheter för konstruktionen, och tillämpa dessa i räkneformlerna i VTT:s anvisningar för att få trovärdiga resultat och sen kunna jämföra dem med gränsvärdena. En del av utmaningen var också att söka information om ämnet och hitta de olika räkneformlerna och gränsvärdena, eftersom det varken i Eurokoderna eller Finska byggbestämmelserna finns några noggrannare gemensamma anvisningar och gränsvärden vad gäller vibration i golv. I Eurokoderna och Finska byggbestämmelserna anges endast ett gränsvärde för egenfrekvens, samt formler för beräkning av den, men acceleration och nedböjning tas inte upp noggrannare.

Under arbetets gång har jag naturligtvis lärt mig massor om vibration och beräkning av den, men förutom det har jag också lärt mig en hel del om själva processen i att utveckla en ny produkt för byggnadsindustrin. Förutom detta arbete har jag även deltagit i byggandet av prototyper av dessa element och testat olika lösningar och aktivt fått delta i utvecklandet av dem.

Slutligen vill jag tacka Leif Sebbas och Martti Peljo som gav mig möjligheten att göra detta arbete och delta i processen, samt gav mig handledning och stöd under arbetets gång. Dessutom vill jag tacka Niklas Nyman för handledning från skolans sida gällande själva examensarbetsprocessen.

Källförteckning

Allen, D., Ungar, E., Murray, T. (2003) *Floor vibrations due to human activity – Steel Design Guide Series 11*. USA: American Institute of Steel Construction, Canadian Institute of Steel Construction.

Byggnadskalendern (2008) *Svenska Byggmästare- och Ingenjörsförbundet YH i Finland r.f.* Ekenäs: Ekenäs Tryckeri AB.

Kujanpää, M. (2011) *Liittolaatan leikkausliitoksen kestävyys kokeellinen tutkimus ja taustateoria*. Opublicerat examensarbete för ingenjörsexamen. Vaasan ammattikorkeakoulu, Tekniikka ja liikenne.

Langesten, B. (2008) *Byggekonstruktion 1 Byggnadsstatik*. Stockholm: Liber

Naeim, F. (1991) *Design practice to prevent floor vibrations - Structural steel educational council*. www.johnmartin.com/publications/Vibration/Design.pdf (hämtat: 01.02.2012)

SFS-Käsikirja 200 (2007) *Eurokoodi 0. Rakenteiden suunnitteluperusteet 2007*. Helsingfors: Suomen Standardisoimisliitto SFS RY.

Suomalainen, E. (2007) *Välipohjan värähtelymitoitus – NR päivät, Seinäjoki 18-19.1.2007*. www.slly.fi/ES1Varahtely.pdf. (hämtat: 29.12.2011)

Talja, A., Toratti, T., Järvinen, E. (2002) *VTT-Tiedote 2124 - Lattioiden värähtelyt, Suunnittelu ja kokeellinen arviointi*. Esbo: Statens tekniska forskningscentral (VTT).

RIL 201-1-2011 (2011) *Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat – Eurokoodi*. Helsingfors: Suomen Rakennusinsinöörien liitto, RIL.

RIL 205-1-2007 (2007) *Puurakenteiden suunnitteluohje - Eurokoodi*. Helsingfors: Suomen Rakennusinsinöörien liitto, RIL.

Yang, T. (u.å.) *CE 248 Behavior of plastic design of steel structures – Topic: Floor vibrations (1)*. University of California, Berkley.
http://peer.berkley.edu/~yang/courses/ce248/CE248_CN_Floor_vibrations1.pdf (hämtat: 01.02.2012)

Yang, T. (u.å.) *CE 248 Behavior of plastic design of steel structures – Topic: Floor vibrations (2)*. University of California, Berkley.
http://peer.berkeley.edu/~yang/courses/ce248/CE248_CN_Floor_vibrations2.pdf (hämtat: 01.02.2012)

Sladki, M. (1999) *Prediction of floor vibration response using the finite element method*. Thesis for the degree of master of science in civil engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University. <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-120899-180603/unrestricted/Thesis.pdf> (hämtat: 01.02.2012)

Bilagor

Definitoner och termer

Vibration – Rörelsen som sker i en konstruktion i tre olika led, x, y och z. Då det är frågan om vibration i golv är det dock rörelser i x-led d.v.s. horisontellt eller uppåt-nedåt led, som det är frågan om

Frekvens – Antalet fulla svängningar som sker per sekund, anges i Hertz (Hz)

Svängning – Konstruktionens rörelse från nolläge till maximal förändring och tillbaka till nolläge.

Nolläge – Konstruktionens läge i obelastat tillstånd, även kallat *Viloläge*.

Eigenfrekvens – Den frekvens som uppstår i en konstruktion enbart som resultat av dess egentyngd och en väckningskraft.

Belastningsfrekvens – Den frekvens som uppstår i en konstruktion då den konstant belastas av en yttre väckningskraft som tvingar den att vibrera.

Väckningskraft – En yttre kraft som belastar konstruktionen och orsakar en svängning, t.ex. en person som går på konstruktionen.

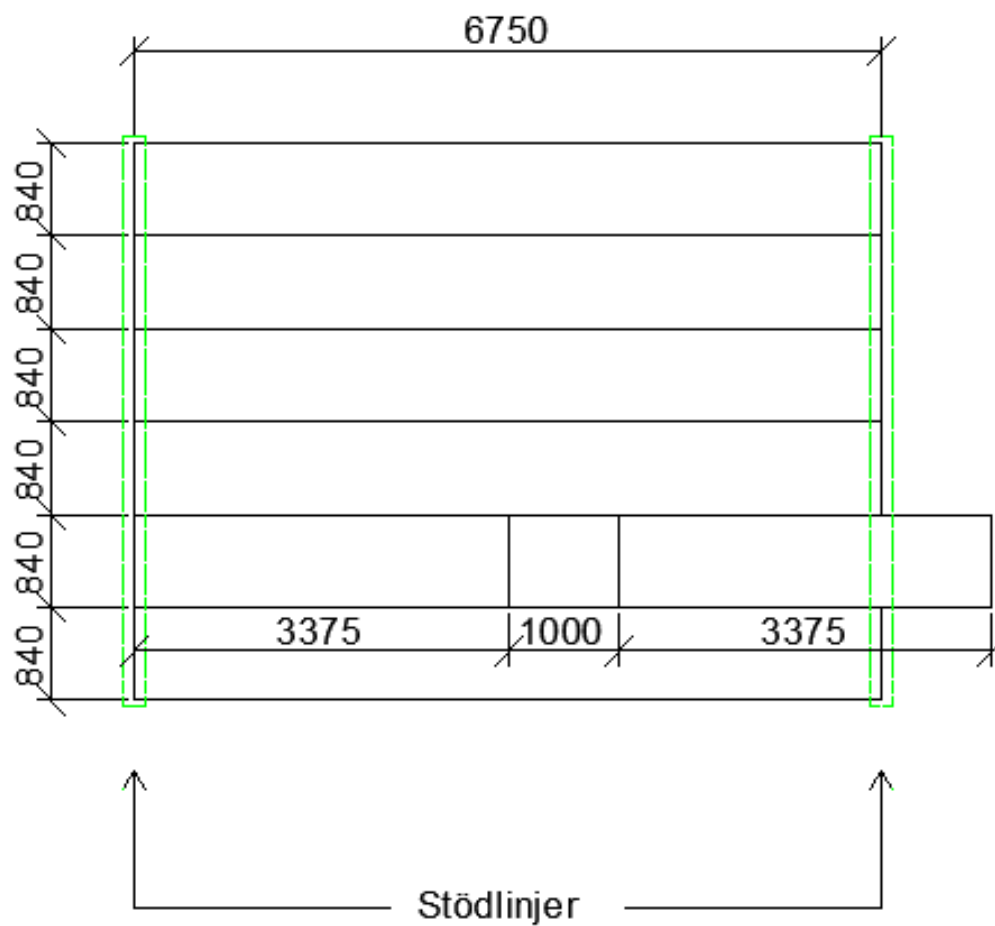
Accelerationsamplitud – Den acceleration som uppstår då konstruktionen går från nolläge till en full svängning, anges i m/s^2 , kan också anges som procent av tyngdkraftsaccelerationen, d.v.s. hur många procent av $9,81 m/s^2$ den utgör

Dämpningsfaktor – En faktor som används i beräkning av accelerationsamplituden för att ta i beaktande den dämpande effekt som andra konstruktioner, som t.ex. mellanväggar och fasta möbler, har på vibrationen i ett golv.

Storheter, enheter, naturkonstanter och matematiska konstanter:

f_0	[Hz]	Egenfrekvensen i elementen
a_{\max}	[m/s ²]	Acceleration som uppstår i elementen p.g.a. gång
b	[m]	Elementets bredd
b_{eff}	[m]	Den effektiva bredden för det vibrerande området
e	[-]	Nepers tal= 2,718
I	[mm ⁴]	Tröghetsmoment
g	[m/s ²]	Gravitationens acceleration
l	[m]	Golvbalkarnas spännvidd
m	[kg/m ²]	Bjälklagets vikt per ytenhet + nyttolast på 30 kg/m ²
EI_b	[Nm/m]	Elementets styvhet på bredden i b :s riktning
EI_l	[Nm/m]	Elementets styvhet på längden i l :s riktning
P	[N]	Tyngden av personen som orsakar vibrationen
R	[-]	Reduceringsfaktor för accelerationen
W	[kg]	Effektiva vikten av den vibrerande delen
ζ	[-]	Dämpningsförhållande
δ_{\max}	[m]	Maximal statisk nedböjning orsakad av en 1 kN stor kraft punktlast
E	[N/mm ²]	Elasticitetsmodulen för ett specifikt material
π	[-]	Förhållandet mellan en cirkels omkrets och diameter (=3,14)

Testupplägg:



Uträkningar:

PP-bjälklagselementen utan träförstyvning

Egenfrekvensen

För att beräkna egenfrekvensen f_0 för elementet utan dess trädel används formel (3) enligt följande:

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot 6,75^2} \sqrt{\frac{10800000}{330}},$$

Detta ger att egenfrekvensen $f_0 \approx 6,24$ Hz.

Accelerationsamplituden

För att beräkna accelerationsamplituden a_{\max} , beräknas först effektiva bredden b_{eff} med hjälp av formel (11) enligt följande:

$$b_{\text{eff}} = 1,0 \cdot \left[\frac{2210000}{10800000} \right]^{1/4} \cdot 6,75,$$

vilket ger en effektiv bredd b_{eff} , på ca.4,54. Därefter kan effektiva tyngden W , beräknas med formel (10) enligt följande:

$$W = 330 \cdot 4,54 \cdot 6,75,$$

vilket ger en effektiv tyngd W , på ca.10113. Därefter kan accelerationsamplituden a_{\max} , beräknas med formel (9) enligt följande:

$$a_{\max} = \frac{0,07 \cdot 800}{10113 \cdot 0,02} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,356 \cdot 24},$$

Detta ger att accelerationsamplituden $a_{\max} \approx 0,26 \text{ m/s}^2$.

Nedböjningen

För att få nedböjningen δ_{\max} , beräknas först faktorn γ med hjälp av formel (8) enligt följande:

$$\gamma = \frac{1}{42 \cdot \left[\frac{2210000}{10800000} \right]^{1/4}},$$

Detta ger att $\gamma \approx 0,035$. Som följande kan då nedböjningen δ_{\max} , beräknas med formel (4) enligt följande:

$$\delta_{\max} = 0,035 \cdot \frac{1000 \cdot 6,75^2}{10800000},$$

Detta ger att nedböjningen $\delta_{\max} \approx 0,15 \text{ mm}$.

PP-bjälklagselementen med träförstyvning

Egenfrekvensen

För att beräkna egenfrekvensen f_0 för elementet med dess trädel tagen i beaktande används formel (3) enligt följande:

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot 6,75^2} \sqrt{\frac{34300000}{330}},$$

Detta ger att egenfrekvensen $f_0 \approx 11,1$ Hz.

Accelerationsamplituden

För att beräkna accelerationsamplituden a_{\max} , beräknas först effektiva bredden b_{eff} med hjälp av formel (11) enligt följande:

$$b_{\text{eff}} = 1,0 \cdot \left[\frac{2210000}{34300000} \right]^{1/4} \cdot 6,75,$$

vilket ger en effektiv bredd b_{eff} , på ca.3,4. Därefter kan effektiva tyngden W , beräknas med formel (10) enligt följande:

$$W = 330 \cdot 3,4 \cdot 6,75,$$

vilket ger en effektiv tyngd W , på ca.7575,23. Därefter kan accelerationsamplituden a_{\max} , beräknas med formel (9) enligt följande:

$$a_{\max} = \frac{0,07 \cdot 800}{7575,23 \cdot 0,02} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,3511,1},$$

Detta ger att accelerationsamplituden $a_{\max} \approx 0,063 \text{ m/s}^2$.

Nedböjningen

För att få nedböjningen δ_{\max} , beräknas först faktorn γ med hjälp av formel (8) enligt följande:

$$\gamma = \frac{1}{42 \cdot \left[\frac{2210000}{34300000} \right]^{1/4}},$$

Detta ger att $\gamma \approx 0,047$. Som följande kan då nedböjningen δ_{\max} , beräknas med formel (4) enligt följande:

$$\delta_{\max} = 0,047 \cdot \frac{1000 \cdot 6,75^2}{34300000},$$

Detta ger att nedböjningen $\delta_{\max} \approx 0,063 \text{ mm}$.

PP-bjälklagselementen med medelvärdet för $(EI)_1$

Egenfrekvensen

För att beräkna egenfrekvensen f_0 för elementet, med ett medelvärde av elementets syvheter med och utan trädelen, används formel (3) enligt följande:

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot 6,75^2} \sqrt{\frac{22550000}{330}},$$

Detta ger att egenfrekvensen $f_0 \approx 9,01$ Hz.

Accelerationsamplituden

För att beräkna accelerationsamplituden a_{\max} , beräknas först effektiva bredden b_{eff} med hjälp av formel (11) enligt följande:

$$b_{\text{eff}} = 1,0 \cdot \left[\frac{2210000}{22550000} \right]^{1/4} \cdot 6,75,$$

vilket ger en effektiv bredd b_{eff} , på ca.3,78. Därefter kan effektiva tyngden W , beräknas med formel (10) enligt följande:

$$W = 330 \cdot 3,78 \cdot 6,75,$$

vilket ger en effektiv tyngd W , på ca.8412,7. Därefter kan accelerationsamplituden a_{\max} , beräknas med formel (9) enligt följande:

$$a_{\max} = \frac{0,07 \cdot 800}{8412,7 \cdot 0,02} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,359 \cdot 0,01},$$

Detta ger att accelerationsamplituden $a_{\max} \approx 0,118$ m/s².

Nedböjningen

För att få nedböjningen δ_{\max} , beräknas först faktorn γ med hjälp av formel (8) enligt följande:

$$\gamma = \frac{1}{42 \cdot \left[\frac{2210000}{22550000} \right]^{1/4}},$$

Detta ger att $\gamma \approx 0,043$. Som följande kan då nedböjningen δ_{\max} , beräknas med formel (4) enligt följande:

$$\delta_{\max} = 0,043 \cdot \frac{1000 \cdot 6,75^2}{22550000},$$

Detta ger att nedböjningen $\delta_{\max} \approx 0,086$ mm.

PP-bjälklagselementet med medelvärde för $(EI)_1$, och dämpning tagen i beaktande

Accelerationsamplituden

Då man gör beräkningarna för vibrationen på ett golv i ett rum där det finns mycket sekundära konstruktioner, som icke-bärande mellanväggar och fasta möbler, kan man som dämpningsförhållande ζ , använda värdet 0,03 istället för 0,02. Detta är möjligt eftersom de sekundära konstruktionerna har en förstyvande och en dämpande effekt på golvets svängningsrörelser. I beräkningarna är det accelerationsamplituden a_{\max} som får ett lägre värde då dämpningsfaktorn ökar.

Då man alltså beräknar accelerationsamplituden för elementet, med ett medelvärde för styvheter och med högre dämpningsförhållande, använder man formel (9) enligt följande:

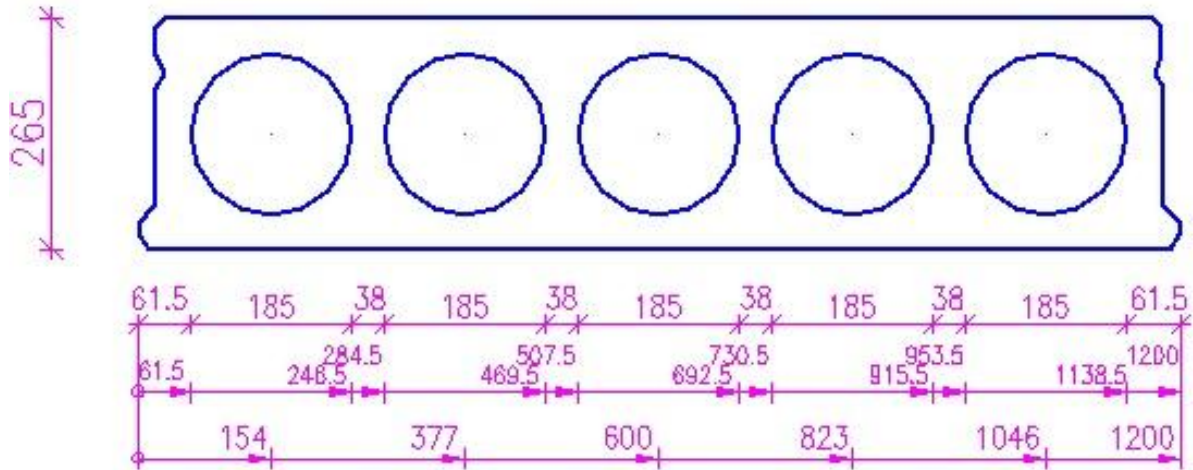
$$a_{\max} = \frac{0,07 \cdot 800}{8412,7 \cdot 0,03} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,359 \cdot 0,01},$$

Detta ger att accelerationsamplituden $a_{\max} \approx 0,079 \text{ m/s}^2$, då den med den lägre dämpningsfaktorn fick värdet $a_{\max} \approx 0,118 \text{ m/s}^2$.

Hålbjälklag P27

Styvheten

Ifrågavarnade hålbjälklagselement har ett tvärsnitt som ser ut som följande:



Eftersom tvärsnittet inte är liksidigt blir det svårt att beräkna ett noggrant tröghetsmoment för konstruktionen. För att enklare kunna beräkna ett tröghetsmoment görs beräkningarna enligt ett förenklat tvärsnitt som ser ut som följande:

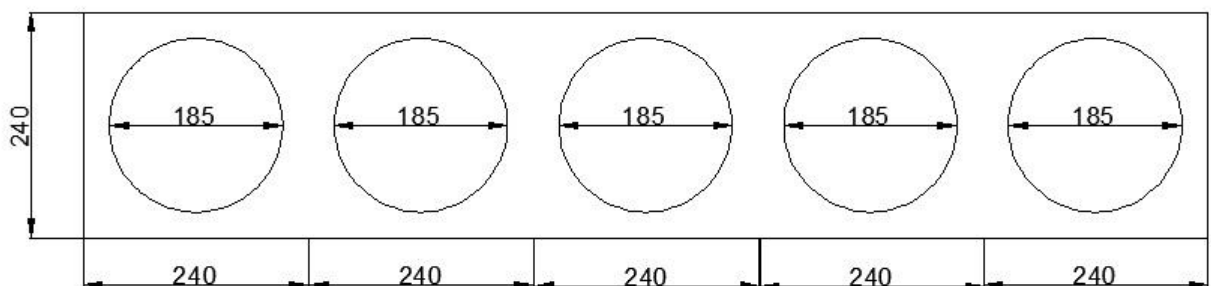


Bild 2. Förenklat tvärsnitt för beräkning av tröghetsmomentet I

Då beräkningarna görs enligt detta tvärsnitt kan man använda formeln för en kvadrat med ett hål i mitten som ser ut enligt följande:

$$I = \frac{1}{12} \cdot \left(a^4 - \frac{3 \cdot \pi}{16} \cdot d^4 \right),$$

där a är kvadratens sida och d är diametern på hålet i mitten, enligt följande bild: (bild 3)

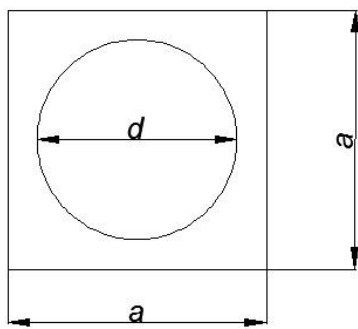


Bild 3. Måtten som används för beräkning av tröghetsmomentet I , för ett rektangulärt tvärsnitt med hål i mitten.

Då man alltså beräknar tröghetsmomentet för det förenklade tvärsnittet ser det ut som följande:

$$I = \frac{1}{12} \cdot \left(240^4 - \frac{3 \cdot \pi}{16} \cdot 185^4 \right),$$

För att sedan beräkna konstruktionen tröghetsmoment på bredden, beräknas det som en rektangulär betongplatta, för vilken formeln för tröghetsmomentet är:

$$I_l = \frac{b \cdot h^3}{12},$$

där h är rektangelns höjd och b är rektangelns bredd, enligt följande bild: (bild 4)

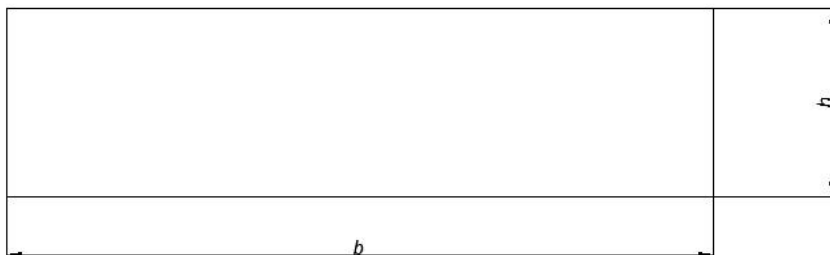


Bild 4. Måtten som används för beräkning av tröghetsmomentet I , för ett kvadratisk tvärsnitt.

Då tröghetsmomentet sedan beräknas används som bredden b , 1 meter eftersom konstruktionens styvhet granskas per meter. Då ser beräkningen ut som följande:

$$I_b = \frac{1000 \cdot 265^3}{12},$$

Som följande multipliceras tröghetsmomentet med elasticitetsmodulen för betongen för att få styvheterna $(EI)_l$ och $(EI)_b$. Detta ger att styvheten på längden $(EI)_l = 33942100 \text{ Nm}^2/\text{m}$, och styvheten på bredden $(EI)_b = 48074900 \text{ Nm}^2/\text{m}$.

Egenfrekvensen

För att sedan beräkna egenfrekvensen f_0 används formel (3) enligt följande:

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot 6,75^2} \sqrt{\frac{33942100}{390}},$$

Detta ger att egenfrekvensen $f_0 \approx 10,2 \text{ Hz}$.

Accelerationsamplituden

Då man som följande skall beräkna accelerationsamplituden, beräknas först den effektiva bredden b_{eff} med formel (11) enligt följande:

$$b_{\text{eff}} = 1,0 \cdot \left[\frac{48074900}{33942100} \right]^{1/4} \cdot 6,75,$$

Detta ger en effektiv bredd $b_{\text{eff}} \approx 7,364$. Därefter beräknas effektiva tyngden W med formel (10) enligt följande:

$$W = 390 \cdot 7,364 \cdot 6,75,$$

Detta ger en effektiv tyngd $W \approx 19385$. Som följande kan man då beräkna accelerationsamplituden a_{max} med hjälp av formel (9) enligt följande:

$$a_{\text{max}} = \frac{0,7 \cdot 800}{19385 \cdot 0,02} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,35 \cdot 10,2},$$

Detta ger att accelerationsamplituden $a_{\text{max}} \approx 0,034 \text{ m/s}^2$.

10.1.1 Nedböjningen

För att få nedböjningen δ_{max} , beräknas först faktorn γ med hjälp av formel (8) enligt följande:

$$\gamma = \frac{1}{42 \cdot \left[\frac{48074900}{33942100} \right]^{1/4}},$$

Detta ger att $\gamma \approx 0,022$. Som följande kan då nedböjningen δ_{max} , beräknas med formel (4) enligt följande:

$$\delta_{\max} = 0,022 \cdot \frac{1000 \cdot 6,75^2}{33942100},$$

Detta ger att nedböjningen $\delta_{\max} \approx 0,02$ mm.

PP-bjälklagselementen med (EI) utgående från belastningsprov

Egenfrekvensen

För att beräkna egenfrekvensen f_0 för elementet utan med (EI) utgående från belastningsprov används formel (3) enligt följande:

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot 6,75^2} \sqrt{\frac{27428570}{330}},$$

Detta ger att egenfrekvensen $f_0 \approx 9,94$ Hz.

Accelerationsamplituden

För att beräkna accelerationsamplituden a_{\max} , beräknas först effektiva bredden b_{eff} med hjälp av formel (11) enligt följande:

$$b_{\text{eff}} = 1,0 \cdot \left[\frac{2210000}{27428570} \right]^{1/4} \cdot 6,75,$$

vilket ger en effektiv bredd b_{eff} , på ca.3,6. Därefter kan effektiva tyngden W , beräknas med formel (10) enligt följande:

$$W = 330 \cdot 3,6 \cdot 6,75,$$

vilket ger en effektiv tyngd W , på ca.8011. Därefter kan accelerationsamplituden a_{\max} , beräknas med formel (9) enligt följande:

$$a_{\max} = \frac{0,07 \cdot 800}{8011 \cdot 0,02} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,359,94},$$

Detta ger att accelerationsamplituden $a_{\max} \approx 0,09 \text{ m/s}^2$.

Nedböjningen

För att få nedböjningen δ_{\max} , beräknas först faktorn γ med hjälp av formel (8) enligt följande:

$$\gamma = \frac{1}{42 \cdot \left[\frac{2210000}{27428570} \right]^{1/4}},$$

Detta ger att $\gamma \approx 0,047$. Som följande kan då nedböjningen δ_{\max} , beräknas med formel (4) enligt följande:

$$\delta_{\max} = 0,047 \cdot \frac{1000 \cdot 6,75^2}{10800000},$$

Detta ger att nedböjningen $\delta_{\max} \approx 0,074 \text{ mm}$.

PP-bjälklagselementen med (EI) utgående från belastningsprov och dämpning tagen i beaktande.

För att beräkna accelerationsamplituden för elementen med (EI) utgående från belastningsprov och med dämpning tagen i beaktande används formel (9) enligt följande:

$$a_{\max} = \frac{0,07 \cdot 800}{8011 \cdot 0,03} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,359,94},$$

vilket ger en att $a_{\max} \approx 0,06 \text{ m/s}^2$.

Beräkningar för de Nordamerikanska gränsvärdena

För att granska resultaten enligt de Nordamerikanska gränsvärdena används följande formel:

$$\frac{a_{\max}}{9,81} \cdot 100$$

Detta ger ett värde på hur många procent av tyngdkraftsaccelerationen a_{\max} utgör. Då man t.ex. beräknar detta värde för hålbjälklagselementet som används som jämförelse, ser det ut som följande:

$$\frac{0,034}{9,81} \cdot 100,$$

Vilket ger att a_{\max} i detta fall utgör 0,35% av tyngdkraftsaccelerationen g .

Källor:

Byggnadskalendern (2008) *Byggnadskalendern – Utarbetat av Svenska Byggmästare- och Ingenjörssförbundet YH i Finland r.f.* Ekenäs: Ekenäs Tryckeri AB.

Suomalainen, E. (2007) *Välipohjan värähtelymitoitus – NR päivät, Seinäjoki 18-19.1.2007.* www.slly.fi/ES1Varahtely.pdf. (hämtat: 29.12.2011)

Talja, A., Toratti, T., Järvinen, E. (2002) *VTT-Tiedote 2124 - Lattioiden värähtelyt, Suunnittelu ja kokeellinen arviointi.* Esbo: Statens tekniska forskningscentral (VTT).

RIL 205-1-2007 (2007) *Puurakenteiden suunnitteluohje - Eurokoodi.* Helsingfors: Suomen Rakennusinsinöörien liitto, RIL.