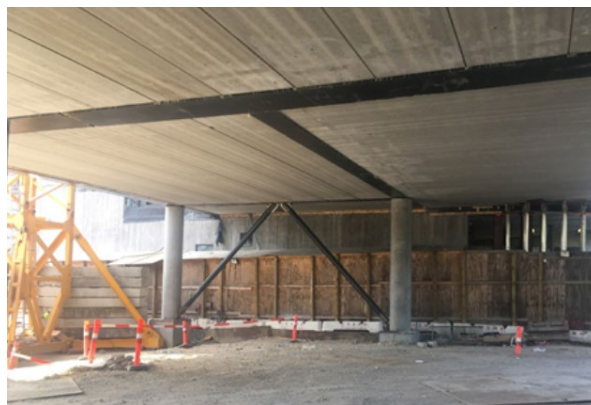


KI – Egenfrekvenser og grænseaccelerationer

Af Einar Thór Ingólfsson

I denne artikel diskuteres beregning af personinducerede svingninger, egenfrekvens og komfort i forskellige konstruktionstyper, bl.a. i forbindelse med 'rytmisk personlast', og hvorvidt de gældende regler og anbefalinger er rimelige.

I moderne byggerier forekommer anvendelse af lette og slanke konstruktioner ganske hyppigt. Især gangbroer, tribuner, gulvkonstruktioner og lette trapper er ofte følsomme overfor personinducerede svingninger, og der findes et stort antal artikler og vejledninger til design af disse konstruktioner. Især indenfor design af gangbroer er der skrevet meget de sidste 20 år [1 – 4].



Tribuner oplever væsentligt større personinduceret dynamisk last end andre konstruktioner, da de skal eftervises for koordineret hop fra en stor gruppe mennesker – 'rytmisk personlast'. Det samme gælder konstruktioner, hvor mange mennesker forventes at kunne samles og udføre rytmiske aktiviteter - såsom fitnesscentre, sportshaller og forsamlingslokaler. Rytmisk personlast er karakteriseret ved et større antal mennesker, der udfører en koordineret og synkron bevægelse ved en konstant bevægelsesfrekvens. Rytmisk personlast giver således anledning til væsentligt større dynamiske belastninger end hidrørende fra almindelig og ukoordineret gang – dog er grænseværdierne for tilladelige bevægelser én til to størrelsesordner større på tribuner (og lignende konstruktioner) end for kontorer, boliger og gangbroer. Dette understreger vigtigheden af, at belastningen ses i sammenhæng med komfortkravene, og at den enkelte konstruktion vurderes både med hensyn til forventet belastning og tilladelig respons.

I denne artikel vil vi fokusere på design af slanke gulvkonstruktioner, da de indgår i langt de fleste større og moderne bygningskonstruktioner i dag, og er noget de fleste konstruktionsingeniører stifter bekendtskab med igennem deres daglige arbejde. I Danmark er der en tradition for anvendelse af huldæk på opsvejste stålhatprofiler, et såkaldt Slim-floor system. Slim-floor systemet tillader relativt store spænd og åbne rum som sædvanligvis kræver en eftervisning for svingningskomfort.

Tabel A1.4 DK NA Erfaringstal for acceptable egenfrekvenser og grænseaccelerationer

Konstruktion	Last	Normalt tilfredsstillende funktion	Ofte ikke-tilfredsstillende funktion	Grænseacceleration i % af tyngdeacceleration
Tribuner, fitnesscentre, sportshaller og forsamlingslokaler	Rytmask personlast	$n_e > 10$ Hz	$n_e < 6$ Hz	10 %
Boliger	Ganglast	$n_e > 8$ Hz	$n_e < 5$ Hz	0,1 %
Kontorlokaler	Ganglast	$n_e > 8$ Hz	$n_e < 5$ Hz	0,2 %

NOTE – Egenfrekvenser og accelerationer beregnes under normal brug, hvor den fluktuerende last typisk er væsentligt mindre end lasten svarende til den kvasipermanente kombination specificeret i afsnit 6.5.3 i DS/EN 1990. Accelerationskravet til kontorlokaler er baseret på, at de generende svingninger forekommer flere gange per time

Figur 1: Vejledning til design af svingningsfølsomme konstruktioner

Det danske nationale annekst til EN 1990 (DS/EN 1990 DK NA) giver en vejledning til design af svingningsfølsomme konstruktioner. Tabellen er at opfatte som vejledende, idet den repræsenterer erfaringstal for henholdsvis acceptable egenfrekvenser og grænseværdier for svingninger i forskellige konstruktionstyper. For at kunne anvende tabellen og de angivne erfaringstal, kræver det en grundlæggende forståelse for konstruktionsdynamik og analyse af personinducerede svingninger. En forkert anvendelse af tabellen kan medføre kraftig overdimensionering og et uøkonomisk design uden den tilsigtede forbedring af konstruktionens komfort. I denne artikel gives en kort baggrund for de krav som nuværende norm bygger på, og hvordan den kan anvendes til beregninger og eftervisning af svingningsfølsomme konstruktioner. Indholdet i artiklen bygger primært på internationale normer [5-7], Eurocodes [8-9], omfattende forskning i England og de på nuværende tidspunkt mest moderne guidelines [10-13] kombineret med forfatterens egen forskning og erfaringer på området.

Generelt om komfortkriterier – Responsfaktor R

Der er i litteraturen angivet forskellige forslag til komfortkriterie. Som det bedste mål for komforten, definerer ISO standarderne [5, 6, 7] en såkaldt 'base curve' (basiskurven) svarende til en jævn sansning af vibrationer ved 16 timers konstant påvirkning:

"[base curve] ... represents magnitudes of vibration in buildings for approximately equal human response with respect to human annoyance and/or complaints about interference with activity."

For vibrationer lavere end værdierne defineret af basiskurven siges at:

"For vibration magnitudes below the base curves adverse comments or complaints are rare."

Basiskurven er vist grafisk i Figur 1 og defineret matematisk på efterfølgende måde:

$$a_{b,RMS} = \begin{cases} \frac{0.010}{\sqrt{f}} & \text{for } 1 \text{ Hz} \leq f \leq 4 \text{ Hz} \\ 0.005 & \text{for } 4 \text{ Hz} \leq f \leq 8 \text{ Hz} \\ 625 \cdot 10^{-6} f & \text{for } f > 8 \text{ Hz} \end{cases}$$

Denne definition er bekvem, idet der således defineres (lidt løst men trods alt) en frekvensafhængig grænse for hvilke vibrationer mennesker generelt kan sanse. Generelt tillades et højere respons end basiskurven afhængigt af konstruktionen og den forventede brug. ISO-standarden [7] definerer derfor komfortkriteriet som en responsfaktor R , der multipliceres med basiskurven. Dette betyder at den maksimale tilladelige acceleration der kan accepteres for den for den pågældende type konstruktion er givet ved:

$$a_{max,RMS} = a_{b,RMS} \cdot R$$

Det bemærkes, at komfortkravet er angivet som RMS-værdien af accelerationen. RMS står for "Root-Mean-Square" – altså spredningen af accelerationen. Den maksimale acceleration (peak-accelerationen) fås ved at multiplicere spredningen på accelerationen med $\sqrt{2}$.

Værdien for hvilke accelerationer der generelt vil opleves acceptable, er afhængig af brugen af rummet, og vil derudover være individuel fra person til person. Vibrationer opleves desuden forskelligt afhængigt af hvordan personen er orienteret (ligger, står, sidder mm.), og om man er i bevægelse samt hvad man laver (altså om man ligger, sidder, hopper osv. eller om man udfører finmotorisk arbejde eller lignende). Der sættes derfor forskellige krav til komforten afhængigt af brugen af rummet.

Type konstruktion	DK NA til EN 1990 [8]	SCI P354 [13]
Kritiske arbejdsområder (fx operationsstuer i hospitaler)	-	R = 1
Boliger	R = 2	R = 2 – 4
Kontorer	R = 4	R = 8
Shoppingcentre	-	R = 4
Trapper – let trafik (fx i kontorer)	-	R = 32
Trapper – tung trafik (fx offentlige bygninger, stadiums)	-	R = 24
Tribuner, fitnesscentre, sportshaller og forsamlingslokaler	R = 200	-

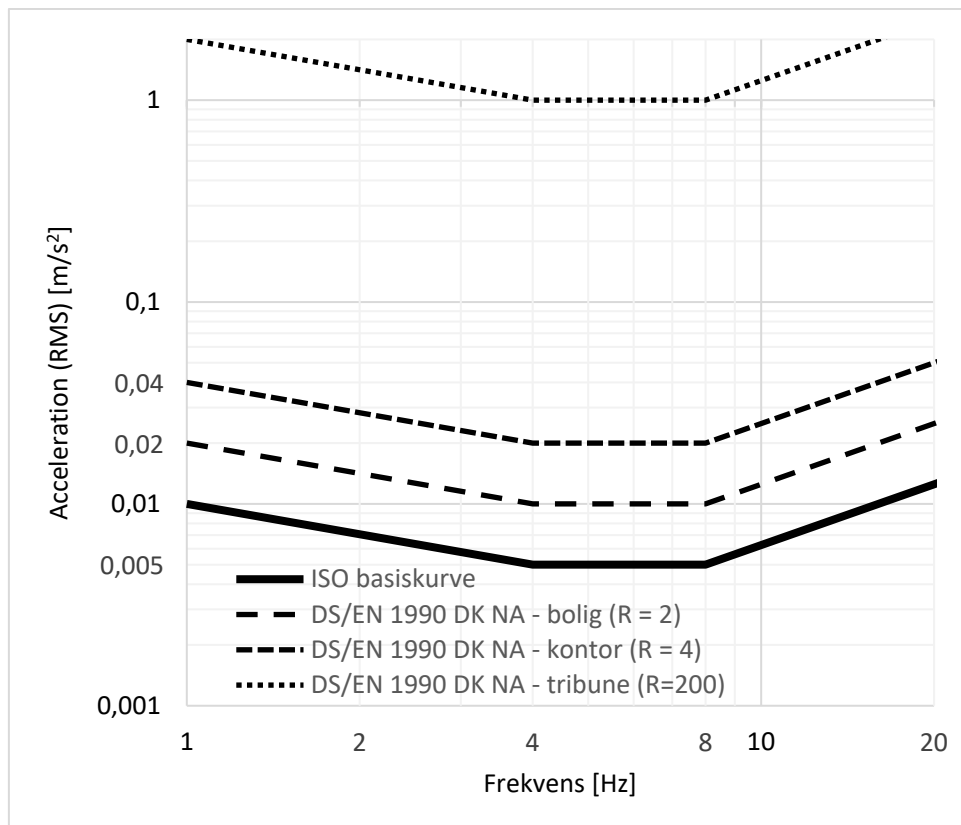
Tabel 1: Sammenligning mellem komfortkrav i DK NA til EN 1990 [8] og SCI P354 [13]

I det danske nationale annekst til Eurocode EN 1990 [8] er der angivet erfaringstal for acceptabel grænseacceleration (angivet som RMS-acceleration) i blandt andet kontorlokaler og boliger. For kontorlokaler er grænseværdien sat til 0,2 % af tyngdeaccelerationen, dvs. $0,02 \text{ m/s}^2$, hvilket svarer til en responsfaktor $R = 4$ i frekvensintervallet 4-8 Hz. I England er der tradition for at tillade større responsfaktorer. Her argumentere forfatterne bag den britiske guideline fra SCI [13] for at $R = 8$ bør

accepteres for kontorer – dette på baggrund af 30 års erfaring i UK. Her angives yderligere grænseværdier for andre typer af konstruktioner der kan anvendes.

Det noteres i denne sammenhæng at basiskurven (og dertilhørende komfortkrav) er defineret og udledt for kontinuert eksponering til vibrationer (16 timer per dag). Menneskeinducerede vibrationer giver ikke anledning til sådanne kontinuerte vibrationer i en gulvkonstruktion, og derfor findes der metoder til at omsætte transiente vibrationer til en kumulativ vibrations-dosis (VDV), som giver samme diskomfort som en kontinuert vibration med en mindre amplitude. Denne metode er overfladisk beskrevet i SCI P354 [13], og kan eventuelt anvendes til at retfærdiggøre lempeligere krav til mindre hyppige hændelser.

Sammenligningen mellem de forskellige komfortkrav er ligeledes vist nedenfor. Som illustreret, er det vigtigt at skelne mellem de forskellige konstruktionstyper og notere at DK NA til EN 1990 [8] ikke eksplicit tager hensyn til komfortkriteriets frekvensafhængighed – dog anbefaler Krabbenhøft & Ingolfsson, at dette gøres i en situation hvor konstruktionens egenfrekvens ligger udenfor intervallet 4 – 8 Hz.



Figur 2: Sammenligning mellem komfortkrav til forskellige konstruktionstyper

Fra dynamisk last til dynamisk respons og komfort

I litteraturen omkring personinducerede svingninger og komfortkrav skelnes der mellem vibrationernes oprindelse (dvs. den dynamiske belastning), transmissionen af vibrationerne (dvs. konstruktionen) og modtageren af vibrationerne (de påvirkede personer). En komfortanalyse er således tredelt hvor hver del afhænger af den enkelte situation og konstruktion, og bør analyseres og sammensættes i hvert tilfælde. En komfortanalyse bør derfor kortlægge de tre nøgle-parametre:

- Bestemmelse af den dynamiske påvirkning og last-scenarier
- Bestemmelse af konstruktionens dynamiske karakteristika
- Bestemmelse af gældende lastafhængige komfortkrav

For bestemmelse af den dynamiske påvirkning fra de enkelte last-scenarier, kan det danske nationale anneks til Eurocode 1991-1-1 anvendes [9], men det bør nok læses sammen med anden specialiseret litteratur på området for at forstå anvendelsen af metoden, eksempelvis reference [1-4 og 10-13].

For bestemmelse af konstruktionens dynamiske karakteristika vil vi henvise til specialiserede guidelines fra UK [12,13] som kan læses sammen med betonelementforeningens vejledning [14]. Vores erfaring er, at der opnås bedste resultater ved modellering af dækkonstruktioner i Finite Element, hvor stivheden af dækket, bjælkerne, samlinger og facaderne medregnes i overensstemmelse med afprøvede metoder.

Dynamisk designbasis

Bestemmelsen af den dynamiske påvirkning og de tilhørende krav til tilladelige svingninger kan formuleres i en dynamisk designbasis. Som eksempel kan et kontorgulv være sammenbygget med en gangbro. De tilladelige vibrationer på gangbroen vil være anderledes end ved kontorets arbejdsstationer, selvom den dynamiske belastning er den samme. Der kan også være forskellige krav til den tilladelige accelerationer afhængigt af den pågældende aktivitet – eksempelvis hvis én eller flere personer hopper midt på gangbroen kan man tillade større svingninger end ved normal gang.

En designbasis for vibrationskomfort kan for eksempel bestå af en simpel tabel med dynamiske last-scenarier og en beskrivelse af sandsynligheden for at de optræder (hyppigt, sjældent, ulykke) sammen med gældende komfortkrav.

Påvirkning	Antal personer	Hyppighed	Tilladelig acceleration på gangbroen	Tilladelig acceleration på kontorgulvet
Gang	1 pers.	Dagligt	R = 32	R = 4
Løb	1 pers.	Hyppigt	R = 64	R = 8-10
Rytisk hop	3 – 5 pers.	Sjældent	R = 200	R = 200

Tabel 2: Eksempel på designbasis for vibrationskomfort for en kontorbygning med en indendørs gangbro

Referencer

- [1] S. Zivanovic, A. Pavic and P. Reynolds, Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 279, 2005.
- [2] E. Caetano et al., *Footbridge Vibration Design*, CRC Press, 2009.
- [3] Setrá, *Footbridges – Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading – Technical Guide*, 2006.
- [4] C. Georgakis and E. Ingolfsson, Recent advances in our understanding of vertical and lateral footbridge vibrations, *Footbridge 2014*.
- [5] ISO 10137:2007, *Basis for design of structures – Serviceability of buildings against vibration*, International Standard Organisation, 2007
- [6] ISO 2631-1:1997, *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements*, International Standard Organisation, 1997
- [7] ISO 2631-2:2003, *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1Hz to 80Hz)*, International Standard Organisation, 1997
- [8] EN 1990 DK NA:2019, *Nationalt anneks til Eurocode 0: Projekteringsgrundlag for bærende konstruktioner*. Erhvervs og byggestyrelsen, 2019
- [9] EN 1991-1-1 DK NA:2013, *Nationalt anneks til Eurocode 1: Last på bygværker – Del 1-1: Generelle laster – Densiteter, egenlast og nyttelast for bygninger*. Erhvervs og byggestyrelsen, 2013.
- [10] Willford, Young, Field, *The prediction of footfall induced vibrations, part 1. Structures and Buildings, Volume 160 – 2007*, ICE, 2007
- [11] Willford, Young, Field, *The prediction of footfall induced vibrations, part 2. Structures and Buildings, Volume 160 – 2007*, ICE, 2007
- [12] The Concrete Centre, *A design guide for footfall induced vibration of structures. A cement and concrete industry publication CCIP-016*, 2006
- [13] Steel Construction Industry (SCI), *Design of floors for vibrations: a new approach*. SCI publication P354, 2007
- [14] Betonelement-Foreningen: *Vibrationskomfort i dækkonstruktioner*, Rev. Nr. 2. 2010