



ANDERS HOMB

Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere

Delrapport fra prosjektet «Comfort properties of timber floor constructions»

Prosjektrapport 8

2007



SINTEF Byggforsk

Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere

Delrapport fra prosjektet «Comfort properties of timber floor constructions»

Prosjektrapport 8 – 2007

Prosjektrapport 8

Anders Homb

Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere

Emneord:

Utredning, beregning, måling, stivhet, vibrasjoner, tre og etasjeskillere

ISSN 0801-6461

ISBN 978-82-536-0976-8

Prosjekt 21066 Comfort properties of timber floor constructions

100 eks. trykt av AIT AS e-dit

Innmat: 100 g scandia

Omslag: 240 g trucard

© Copyright SINTEF Byggforsk 2007

Materialet i denne publikasjonen er omfattet av åndsverklovens bestemmelser. Uten særskilt avtale med SINTEF Byggforsk er enhver eksemplarframstilling og tilgjengeliggjøring bare tillatt i den utstrekning det er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor, interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk.

Utnyttelse i strid med lov eller avtale kan medføre erstatningsansvar og inndragning, og kan straffes med bøter eller fengsel.

Adr.: Forskningsveien 3 B
Postboks 124 Blindern
0314 OSLO

Tlf.: 22 96 55 55

Faks: 22 69 94 38 og 22 96 55 08

www.sintef.no/byggforsk

Samarbeidspartnere Comfort Properties

Hovedsamarbeidspartnere

Norges forskningsråd (NFR)

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU)

Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB)

Norske Takstolprodusenters forening

Skogtiltaksfondet

Norske fagmiljøer

Byggskolen

Norsk Treteknisk institutt

Bransjepartnere

Brendeland & Kristoffersen arkitekter

COWI AS

Forord

Denne prosjektrapporten omhandler vurderinger og analyser som er gjennomført for å velge hvilke kriterier som bør benyttes for opplevelse av vibrasjoner i ulike typer gulvkonstruksjoner i tre. Dette kan være vanlige bjelkelag, avstivede bjelkelag eller massivtredekker. Underlaget som er studert er i all hovedsak arbeider gjennomført i Sverige, Finland, Norge, USA og Canada. Tidligere har vi i Norge kun benyttet ett kriterium basert på begrensning av nedbøyning under en punktlast.

Vi ser et økt behov for å utarbeide underlag for å kunne prosjektere bjelkelag med større spennvidde enn det som til nå har vært vanlig, men også i større grad kunne differensiere løsningene avhengig av spennvidde, oppleggsbetingelser og ev. bruk. Prosjektrapporten vil bidra som underlag for utviklingen av slike løsninger og tabeller for spennvidder.

Arbeidet i prosjektrapporten er utført innenfor arbeidspakke *WP-A: Analysis of former measurements and studies*. Dette er en del av et NFR-støttet prosjekt for Kompetanseoppbygging Med Brukermedvirkning (KMB) med tittel: *Comfort Properties of timber floor constructions*.

Prosjektets overordnede mål er å utvikle metoder og kunnskap knyttet til utvikling og prosjektering av gulvkonstruksjoner i tre med økt spennvidde sammenlignet med vanlige, eksisterende løsninger. Faglig utvikling omhandler vibrasjonsegenskaper til etasjeskillere med menneskelig aktivitet og vanlige vibrasjonskilder for relevante bygningskategorier. Det er et delmål å utvikle beregningsmetode og målemetode som er anvendelig for dette formålet og utvikle kunnskap om hvordan man kan øke dempingen i slike konstruksjoner. For treindustrien vil økte spennvidder medføre at trekonstruksjoner blir mer konkurransedyktige sammenlignet med for eksempel betong- og stålkonstruksjoner. For industrien kan dette medføre et konkurransefortrinn, industrialisering og eventuelt nye produkter. Dette vil derfor også gi et bidrag til utvikling av verdikjeden ”fra skog til produkt”.

Prosjektet er et viktig ledd i arbeidet med å utvikle og revidere anvisninger i Byggforskserien og som underlag for å utarbeide produktdokumentasjon i tekniske godkjenninger og sertifiseringer. Prosjektet ledes av SINTEF Byggforsk og gjennomføres i samarbeid med Norges forskningsråd, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB), Norske Takstolprodusenters forening, Skogprogrammet, samt andre fagmiljøer og aktører i BAE-sektoren som arbeider med slike gulvkonstruksjoner. Prosjektet som ble igangsatt i 2006, og vil pågå fram til utgangen av år 2009, består av i alt 5 arbeidspakker.

Sigurd Hveem har vært ansvarlig for kvalitetskontroll av denne rapporten. En takk også til Arnold Sagen, Byggskolen og Trond Ramstad for nyttige innspill.

Trondheim, desember 2007

Anders Homb
Prosjektleder og leder for WP-A
SINTEF Byggforsk

Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere

Innhold

1. Innledning	6
1.1 Bakgrunn.....	6
1.2 Formål og omfang.....	6
2. Gjennomgang av eksisterende kriterier	7
2. 1 Nedbøyning ved punktlast.....	7
2. 2 Laveste egenfrekvens.....	8
2. 3 Akselerasjon eller hastighet.....	9
2.3.1 Kanadisk artikkel.....	9
2.3.2 Finsk artikkel.....	9
2. 4 Kombinasjon av frekvens, demping og hastighet.....	10
2. 5 Kombinasjon av frekvens og nedbøyning.....	10
2. 6 Vibrasjonsdose.....	11
2.7 Andre metoder.....	11
3. Evaluering av kriterier	12
3.1 Metode benyttet i Norge.....	12
3.2 Metode presentert i ISO-standard.....	12
3.3 Metode presentert av Hu.....	12
3.4 Metode fra Ohlsson / Eurocode.....	13
3.5 Metode presentert av Toratti & Talja.....	15
3.6 Oppsummering.....	15
4. Metode med frekvens og nedbøyning	16
4.1 Resultater fra Hu.....	16
4.2 Resultater fra finske arbeider.....	17
4.3 Resultater fra norske arbeider.....	18
4.4 Oppsummering.....	19
5. Metoder som ivaretar demping	20
5.1 Metode fra Ohlsson / Eurocode.....	20
5.2 Metode med integrert akselerasjonsnivå.....	20
5.3 Oppsummering.....	20
6. Valg av kriterier	21
6.1 Vanlige bjelkelag – foreløpig kriterium.....	21
6.2 Tverravstivede bjelkelag eller skiver – foreløpig kriterium.....	21
6.3 Innsamling av underlag.....	21
7. Oppsummering og konklusjoner	23
8. Referanser	24

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

I dag blir vibrasjonsegenskapene til trebjelkelag i beboelsesrom håndtert på forskjellige måter rundt omkring i verden. En vanlig metode benyttet som substitutt er nedbøyning av bjelkelaget under en punktlast. Andre benyttede vurderingskriterier er laveste egenfrekvens til bjelkelaget eller maksimal impulshastighet. Kombinasjon av flere av disse parametrene har også blitt benyttet.

I Norge er bjelkelagstabellene som Norges byggforskningsinstitutt, NBI/Byggforsk (nå SINTEF Byggforsk) har utarbeidet, så langt bare vært basert på begrensning av nedbøyning under punktlast, se f.eks. NBI (1997). Dette har sitt opprinnelige utspring i arbeidet utført av Hansen (1958), hvor det ble gjennomført både målinger av egenskaper til bjelkelagene og subjektive undersøkelser. Arbeidet ble basert på bjelkelag med en maksimal spennvidde på omkring 4 m. Siden nedbøyning kun er en av flere viktige parametre, har man ikke hatt underlag til å anbefale vesentlig lengre spennvidder.

Betydelige arbeider på området har blitt gjennomført av Ohlsson i Sverige, Dolan & al. i USA og Hu & Chui i Canada. Førstnevnte arbeider har også medført at det er beskrevet en beregningsprosedyre i Eurocode 5 (2003). De seinere årene har det også blitt arbeidet med dette i Finland, Norge og Sverige, noe som framkommer mer i detalj seinere i rapporten. Bare enkelte av disse forskningsarbeidene har inkludert studier av hvordan golvvibrasjonene oppleves av beboere eller et testpanel. En betydelig aktivitet innenfor dette delprosjektet har derfor bestått i å finne relevante metoder som er/blir brukt og se nærmere på den dokumentasjonen som finnes. Arbeidet av Homb (2006) har også vært et viktig grunnlag i denne sammenhengen, både med hensyn til eksisterende verktøy, målemetoder og eksperimentelle resultater.

1.2 Formål og omfang

Arbeidet med kriterier for opplevde vibrasjoner i bjelkelag inngår i delprosjektet: *Analysis of former measurements and studies*. Formålet er å kunne angi en metode eller forslag til hvilke kriterier man bør sette for at vibrasjoner i bjelkelag skal oppfattes som akseptable ved vanlig menneskelig aktivitet. Slike kriterier er altså ikke nødvendige i konstruksjoner hvor personer til daglig ikke oppholder seg.

Dersom man skulle gjennomføre studier av fysiske egenskaper til bjelkelag i kombinasjon med subjektive undersøkelser ville det være nødvendig med et betydelig antall konstruksjoner for å kunne ha en statistisk sikkerhet for resultatet. Det ville også vært nødvendig å ha tilgang til objekter med stor spredning i spennvidde og ev. andre viktige variabler. Fra Homb (2006) er det kjent at flere slike større undersøkelser har blitt gjennomført andre steder i verden og at det derfor ville være mest rasjonelt å kunne nyttiggjøre seg resultater fra disse. I dette prosjektet er det derfor ikke lagt opp til noen større subjektive undersøkelser, men at vi eventuelt vil vurdere å benytte en spørreundersøkelse i konkrete tilfeller (fra laboratorie- eller feltobjekter) som måtte dukke opp i løpet av tiden prosjektet pågår.

Ved gjennomgang av tilgjengelig underlag ser vi at sammenhengene ikke er enkle. Underlaget angir også forskjellige begrensninger som det er ønskelig å unngå eller se nærmere på. Denne rapporten gir derfor et forslag til hvilke kriterier som vi mener bør benyttes framover. I tilknytning til andre aktiviteter i prosjektet kan dette utprøves nærmere. Det kan derfor på et seinere tidspunkt være aktuelt å evaluere resultatene samlet og eventuelt revidere anbefalingene når det gjelder kriterier.

2. Gjennomgang av eksisterende kriterier

2.1 Nedbøyning ved punktlast

Historisk har det helt fra 1800-tallet vært utarbeidet bjelkelagstabeller hvor man delvis har beregnet nedbøyning ved jevnt fordelt last eller punktlast på etasjeskilleren. Jevnt fordelt last har blitt mye benyttet opp gjennom tidene. Sannsynlig forklaring på dette er at man ville ta hensyn til overgolvetets lastfordelende virkning, noe som er mer komplisert med punktlast. Hansen (1958) gjeninnførte bruken av nedbøyning under punktlast som kriterium. I dette forskningsarbeidet undersøkte man hvordan ulike bjelkelag subjektivt ble bedømt av forsøkspersoner. Resultatene fra disse arbeidene viste også god overensstemmelse med tilsvarende amerikanske forsøk. Som punktlast hadde man valgt å bruke 100 kg med måling av maksimal nedbøyning på bjelke midt på spennvidden. Disse resultatene dannet grunnlaget for NBI sine bjelkelagstabeller i nærmere 40 år. Krav til stivheten av et bjelkelag begrunnes ut fra både estetiske krav, praktiske krav, unngå sprekkdannelse og lignende, og ikke minst tolererbare rystelser.

Krav til maksimal nedbøyning ble introdusert i norske byggeforskrifter i 1967, men når forskriftene ble revidert i 1985 ble dette kravet utelatt, og isteden erstattet med et generelt funksjonskrav knyttet til vibrasjoner. Prinsippet har imidlertid blitt videreført av NBI og bjelkelagstabeller som er gitt i Byggforskserien, NBI (1997), baserer seg fortsatt på nedbøyning under punktlast som kriterium.

Krav til statisk stivhet av golvkonstruksjoner er også gitt i andre nasjonale standarder og anvisninger, for eksempel Sverige og Canada. Tabell 2.1 viser en oversikt over noen anbefalte grenseverdier fra ulike institusjoner. Nedbøyning under 1 kN punktlast benyttes også som kriterium i kombinasjon med andre parametre. Dette gjelder spesielt nyere arbeider, se spesielt punkt 2.4 og 2.5.

Tabell 2.1
Anbefalte grenseverdier for nedbøyning til trebjelkelag

Nasjon / metode	Maksimal nedbøyning Δ ¹⁾ (mm)
Norge – Byggeforskrift til 1985 og NBI (1997) anbefaling: Teoretisk beregnet / målt i ferdig bygg – NBI (1997) anbefaling “høy stivhet” fra 1997: Teoretisk beregnet / målt i ferdig bygg	1.3 / 0.9 0.9 / 0.67
Kanada, CWC (1997): Teoretisk beregnet – Spennvidde, $L < 3$ m – Spennvidde, $L = 3$ m til 5.5 m – Spennvidde, $L = 5.5$ m til 9.9 m – Spennvidde, $L > 9.9$ m	2.0 $\frac{8}{L^{1.3}}$ $\frac{2.55}{L^{0.63}}$ 0.6
Finland, Toratti & Talja (2006): Teoretisk beregnet – Vibrasjonsklasse C, global nedbøyning når $f_0 > 10$ Hz – Vibrasjonsklasse C, lokal nedbøyning ²⁾	0.5 0.5
Eurocode 5 (2003): Teoretisk beregnet – Nedbøyningskriterium ³⁾	1.5

¹⁾ I mykest punkt med en punktlast på 1 kN.

²⁾ Deformasjon knyttet til overgolv, flytende eller oppbygd golv. Spesifisert målepunkt.

³⁾ Det stilles i tillegg krav til maksimal impulshastighet, se pkt. 2.4.

2. 2 Laveste egenfrekvens

På grunnlag av et større forskningsarbeid definerte Dolan & al. i USA (1999) et enkelt kriterium basert på laveste egenfrekvens, f_0 til bjelkelaget. Egenfrekvens er en naturlig svingefrekvens for et element, i dette tilfellet et sammensatt bjelkelag. Stivheten til bjelkelaget er tilstrekkelig for å oppnå akseptable egenskaper mht. vibrasjoner når laveste egenfrekvens til bjelkelaget er:

- > 15 Hz for ikke innflyttede golv
- > 14 Hz for innflyttede (beboede) golv

Sistnevnte kriterium skal beregnes med 45 MPa last for lette golv og 90 MPa last for tunge golv. Dette kriteriet vil være konservativt, dvs. i større grad underkjenne golv med tverravstivende tiltak og/eller tyngre materialer i/på bjelkelaget. Tverravstiving påvirker ikke laveste egenfrekvens i nevneverdig grad og økt vekt vil senke laveste egenfrekvens når andre faktorer holdes konstant. Dette innebærer at laveste egenfrekvens ikke vil være egnet som eneste kriterium dersom slike konstruksjonsvarianter også skal ivaretas.

2.3 Akselerasjon eller hastighet

2.3.1 Kanadisk artikkel

Forskningsarbeider rapportert av Smith & Chui (1988) foreslår et kriterium basert på akselerasjonsnivå. Dette forutsetter integrasjon over en tid på 1 sek med en impuls fra et såkalt helstøt, konkretisert ved:

$$a_{RMS} < 0.45 \text{ m/s}^2 - \text{forutsatt at laveste egenfrekvens til bjelkelaget, } f_0 > 8 \text{ Hz}$$

Rapporten angir en forenklet metode å beregne denne verdien på. Dette kriteriet tar da både hensyn til amplitude, grad av demping og delvis frekvens. Dersom selve helstøtet er klart definert, kan man også måle denne parameteren gitt ved:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a^2(t) dt} \quad \text{der } T = 1 \text{ sek} \quad [2.1]$$

2.3.2 Finsk artikkel

I en artikkel av Toratti & Talja (2006) oppsummeres resultater fra forsøk i Finland med vibrasjonsmålinger av golv. I rapporten foreslås også kriterier og grenseverdier basert på målinger i både felt og laboratorium. De foreslåtte grenseverdiene gjelder nedbøyning under punktlast som vist i tabell 2.1 og verdier knyttet til hastighet (v_{\max} eller v_{RMS}) eller utsving (u_{\max}) for golv med laveste egenfrekvens høyere enn 10 Hz. For golv med laveste egenfrekvens lavere enn 10 Hz foreslås grenseverdi knyttet til $a_{w,RMS}$. Alle målinger og foreslåtte grenseverdier er basert på at en forsøksperson går på golvene, med tilnærmet samme vekt (80 kg) og gangfrekvens (ca. 2 Hz) ved hvert forsøk. Tabell 2.3 viser en oversikt over de foreslåtte grenseverdiene for vibrasjonsklasse B og C. Artikkelanbefaler at vibrasjonsklasse C eller bedre tilfredsstilles for golv i boliger.

Tabell 2.3
Foreslåtte grenseverdier for vibrasjonsklasse B og C, ref. Toratti & Talja (2006)

Vibrasjons- klasse	Golv med $f_0 < 10 \text{ Hz}$ $a_{w,RMS} \text{ (m/s}^2\text{)}$	Golv med $f_0 > 10 \text{ Hz}$		
		$v_{\max}^{1)}$ (mm/s)	v_{RMS} (mm/s)	u_{\max} (mm)
B	≤ 0.05	≤ 6	≤ 0.6	≤ 0.1
C	≤ 0.075	≤ 8	≤ 1.0	≤ 0.2

¹⁾ Vurdert som beste parameter av forfatterne

Utkastet til klassifisering innebærer også en begrensning av nedbøyning under 1 kN punktlast. For vibrasjonsklasse B anbefales maksimalt 0,25 mm nedbøyning både globalt (for selve bjelkelaget) og maksimalt 0,25 mm lokal nedbøyning (deformasjon i overgolv, flytende golv, oppføring osv.). I vibrasjonsklasse C er tilsvarende maksimale deformasjon satt til 0,5 mm globalt og lokalt.

2. 4 Kombinasjon av frekvens, demping og hastighet

Med bakgrunn i sin avhandling, videreførte Ohlsson (1982) arbeidet med dimensjoneringsmetoder for svikt, svingninger og stivhet i bjelkelag. Et viktig resultat av dette ble prosjekteringsanvisningen Ohlsson (1988). Her foreslås en dimensjoneringsmetode og et kriterium basert på en kombinasjon av bjelkelagets egenfrekvenser, demping og amplitude i form av maksimal impulshastighet. Disse tre parametrene er prinsipielt de viktigste for å ivareta dynamiske egenskaper til en konstruksjon. Metoden er seinere blitt benyttet som basis for anbefalt metode i Eurocode 5 (2003). Rapporten angir et preliminært forslag til vurdering av golvkonstruksjonen, men med en relativt bred sone mellom akseptable og ikke akseptable golv. Nærmere opplysninger om grunnlaget for dette forslaget er ikke gitt. I Eurocode 5 (2003) inngår også nedbøyning ved en konsentrert punktlast, men metoden angir heller ikke noen klar grenseverdi mellom akseptable og ikke akseptable golv. Følgende beregningsformler er gitt:

$$\frac{w}{F} \leq a \quad [\text{mm/kN}] \quad [2.2]$$

$$v \leq b^{(f_0 \cdot \zeta^{-1})} \quad [\text{m/Ns}^2] \quad \text{Obs: "a" og "b" relatert til figur i Eurocode 5} \quad [2.3]$$

w = maksimal nedbøyning [mm] med en statisk punktlast F [kN]

v = maksimal impulshastighet [m/Ns²], lik h'_{\max} fra Ohlsson (1988)

f_0 = laveste egenfrekvens [Hz]

ζ = relativ demping [%]

Formel [2.3] innebærer at maksimal impulshastighet, v , må være mindre enn en beregnet verdi ihht. formelen. Man må velge akseptnivå "b". Siden laveste egenfrekvens og relativ demping multipliseres sammen i formelen, medfører en tenkt dobling av dempingen at man kan tillate en halvering av laveste egenfrekvens og allikevel oppnå samme krav til maksimal impulshastighet. Dette er nærmere kommentert i pkt. 3.4.

2. 5 Kombinasjon av frekvens og nedbøyning

I Kanada har det pågått forskningsarbeid gjennom en rekke år på dette området. På grunnlag av nyere studier utarbeidet Hu (2000) en omfattende rapport om prosjekteringskriterier for golvkonstruksjoner. Arbeidet gikk i grove trekk ut på å prøve ulike kombinasjoner av parametre mot subjektiv bedømming. De subjektive vurderingene er i hovedsak basert på erfaringer brukere i ferdig bygg har gitt ved hjelp av en fastlagt prosedyre og spørreskjema. For de enkelte golvene har man beregnet de aktuelle parametrene, f.eks. laveste egenfrekvens og nedbøyning. Målinger i felt eller laboratorium har blitt benyttet til å verifisere beregningsmetodene. Grunnlaget for sammenligningene var en database med 112 golv fra feltobjekter og en del laboratoriegolv. Kriterier som har vært benyttet tidligere ble evaluert. Dette er i grove trekk kriterier presentert i pkt. 2.1 til 2.4. Deretter ble i alt 5 tentative modeller prøvd ut med hensyn til regresjon mellom fysiske parametre og subjektiv bedømming. Alle modellene baserte seg på laveste egenfrekvens i kombinasjon med enten punktlast, flatevekt, spennvidde, impulshastighet eller akselerasjon.

Rapporten konkluderer med at kombinasjonen av laveste egenfrekvens og nedbøyning under en punktlast ga god overensstemmelse mellom subjektiv og objektiv bedømming, samtidig som disse parametrene kunne bestemmes med akseptabel nøyaktighet. Artikkene Hu (2002b) og Hu & Chui (2004) samt rapportene Hu (2002a) og Hu (2007) viderefører dette arbeidet og foreslår at man benytter følgende kriterium:

$$\frac{f_o}{\Lambda^{0.44}} > 18.7 \quad \text{eller} \quad \Lambda < \left(\frac{f_o}{18.7} \right)^{2.27} \quad [2.4]$$

f_o = laveste, beregnede egenfrekvens til bjelkelaget [Hz]

Λ = beregnet nedbøyning med 1 kN punktlast midt i spennet [mm]

2. 6 Vibrasjonsdose

Ved BRE, England har det blitt gjennomført studier vedrørende kriterier for golvvibrasjoner fra gående personer, se artikkel av Ellis (2001). Metoden tar utgangspunkt i at man vurderer vibrasjonsdose, dvs. en veiing av vibrasjonsbelastningen over en viss tid. Utgangspunktet er da frekvensveide akselerasjonsnivåer. Det knytter seg imidlertid store usikkerheter til hvordan vibrasjonsdose skal beregnes og vurderes. Vi har derfor valgt å ikke se nærmere på dette prinsippet.

2.7 Andre metoder

Publikasjoner presentert av Ljunggren (2006) omhandler dynamiske egenskaper og opplevde vibrasjoner til golvkonstruksjoner. Arbeidene konkluderer med at man må ivareta samlet energi og frekvens. Grenseverdi vil være avhengig av antall frekvenskomponenter og individuell separering mellom disse (under ca. 20 Hz) og det er foreslått en beregningsmetode og kriterium. Metoden ligner prinsipielt Ohlsson (1988), men resultatene er ikke knyttet til opplevelse av virkelige golv som er nødvendig for bruk i dette arbeidet. Det samme gjelder metode presentert i NS-ISO 2631-2 (2003).

I en artikkel presentert av Jorissen (2006) refereres arbeider gjennomført ved SHR Timber Research i Nederland. Her er det foreslått et kriterium som er en funksjon av bjelkelagets laveste egenfrekvens og modal masse til golvet. I Nederland har man ihht. artikkelen utarbeidet et diagram for klassifisering hvor man for trekonstruksjoner benytter en demping på 7 %. Begrepet OS-RMS, dvs. "OneStep – RootMeanSquare" benyttes om denne klassifiseringen. Dette ligner begrepsmessig a_{RMS} omtalt i pkt. 2.3.1. Vi har ikke hatt tilgang til nærmere underlag for denne metoden, og har derfor ikke benyttet dette videre i vurdering av kriterier.

3. Evaluering av kriterier

3.1 Metode benyttet i Norge

Bjelkelagstabeller som er utarbeidet av Norges byggforskningsinstitutt, se NBI (1997), har vært basert på nedbøyningskriterium som grunnlag for dimensjonering mht. uønskede rystelser og vibrasjoner. Dette har i utgangspunktet blitt basert på forskningsarbeid fra Hansen (1958), men oppdatert med strengere nedbøyningskriterium i 1997 som vist i tabell 2.1. I opprinnelig forskningsarbeid er subjektive erfaringer begrenset til bjelkelag med en spennvidde på maksimalt 4 til 4.5 m. Utarbeidede bjelkelagstabeller går derfor ikke nevneverdig ut over disse spennviddene. Nedbøyning er prinsipielt et kriterium som kun ivaretar "amplitude", dvs. at verken frekvens eller flatevekt (som ikke bidrar til stivhet) er ivaretatt. Studier hos Byggforsk og internasjonalt viser at nedbøyning som eneste kriterium ikke er tilstrekkelig for å ivareta opplevde egenskaper ved rystelser og vibrasjoner.

3.2 Metode presentert i ISO-standard

NS-ISO 2631 (2003) angir en metode for å bedømme hvordan helkroppsvibrasjoner virker inn på mennesker. Del 2 omhandler spesifikt vibrasjoner i bygninger for frekvensområdet 1 til 80 Hz. Prinsipielt bedømmes vibrasjonene ut fra frekvensveiet verdi for akselerasjonsnivå, a_w . Opplevelsene kan gjelde alle akseretningene, vertikalt både stående og sittende. Måleverdier må baseres enten på stasjonære vibrasjoner eller en spesifikk, transient vibrasjon. I standardens del 1 angis noen anslagsvise indikasjoner med hensyn til komfort, eksempelvis at verdier i området 0,315 til 0,63 m/s^2 kan oppleves som "litt ukomfortabelt". Standarden angir ikke noen grenseverdi for hva som er akseptabelt. Erfaringer i mange land har vist at beboere i boliger ofte er misfornøyde når vibrasjonsnivåene kun er ubetydelig høyere enn terskelnivå for oppfattelse. Terskelnivået ligger i størrelsesorden 0,01 til 0,02 m/s^2 for de fleste. Denne metoden for å vurdere vibrasjonsnivåer på er ikke blitt utprøvd i noen større sammenheng i tilknytning til brukssituasjoner vi arbeider med i dette prosjektet. I denne omgang har vi derfor valgt å ikke basere videre arbeid med kriterier på denne metoden.

3.3 Metode presentert av Hu

Foreslått metode av Hu (2007) er basert på tidligere underlag fra samme forfatter, se kort beskrivelse i pkt. 2.5. Rapporten konkluderer med at kombinasjonen av laveste egenfrekvens og nedbøyning under en punktlast ga god overensstemmelse mellom subjektiv og objektiv bedømming. Kombinasjon av parametrene spennvidde, laveste egenfrekvens og initiell hastighet normalisert til 1 Ns impuls viste omtrent samme nøyaktighet i bedømmingen. Initiell hastighet normalisert til 1 Ns impuls er enheten innført av Ohlsson (1988) som en beregningsmessig parameter, se også pkt. 3.4. Det er derfor grunn til å vurdere om disse parametrene også skal være med når vi gjennomfører målinger og evaluering av etasjeskillere i dette prosjektet. Grunnlaget i rapport fra Hu (2000) er siden supplert med en del resultater fra laboratoriemålinger med tilsvarende overensstemmelse mellom opplevde egenskaper og objektiv bedømming. Det er med andre ord en meget omfattende dokumentasjon vedr. subjektiv bedømming som ligger i disse arbeidene, og det er svært relevant å benytte dette som foreløpig kriterium og utprøving i dette prosjektet. Alle resultater og vurderinger er imidlertid basert på tradisjonelle bjelkelagsløsninger. Nærmere gjennomgang av underliggende data i forhold til dette kriteriet er presentert i pkt. 4.

Dimensjoneringskriteriet baserer seg, som nevnt i pkt. 2.5, på beregnede verdier for laveste egenfrekvens og nedbøyning. Da tar man ikke hensyn til møbler, innredning eller ikkebærende vegger osv. Dette prinsippet presiseres av forfatter fordi man på et prosjekteringsstadium ikke kan forutsette brukeravhengige valg mht. møblering, endring av skillevegger osv. i egen eller tilstøtende leilighet.

3.4 Metode fra Ohlsson / Eurocode

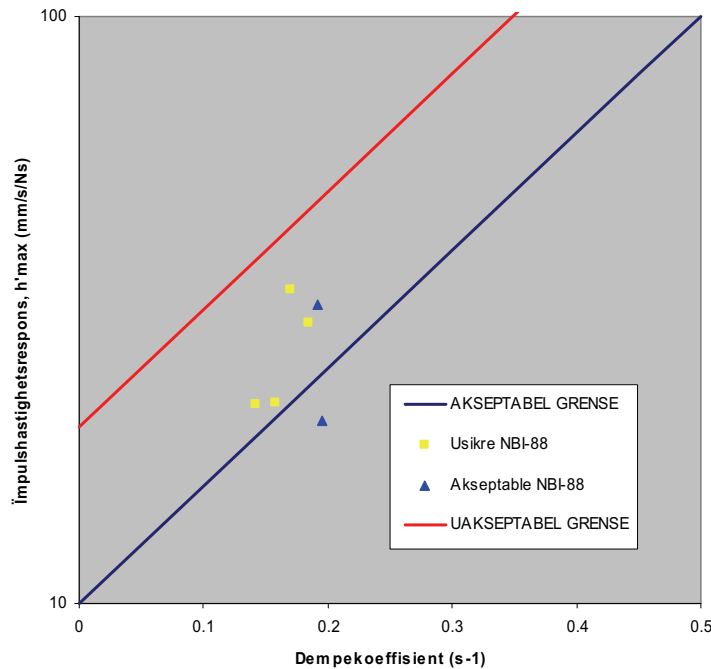
Metoden baserer seg på at tre basisegenskaper til bjelkelaget er kjent, dvs. amplitude (i form av maksimal impulshastighet, h'_{\max}), egenfrekvenser til bjelkelaget og demping. Demping er et uttrykk for hvor fort en rystelse eller vibrasjon dør ut når påtrykket opphører. På et golv vil total demping skyldes både demping i materialer, bjelker, koblingstap mellom materialer og koblingstap i tilslutningen mellom konstruksjonsdeler (eksempelvis vegger).

Ved utarbeidelse av metoden er det ikke gjennomført noen studier som etablerer sammenheng mellom de objektive parametrene og subjektiv bedømming. Foreslått kurve som skal skille mellom akseptable og ikke akseptable golv er et preliminært forslag. For å belyse dette har vi gjennomført beregninger ihht. denne metoden for 6 golvkonstruksjoner fra prosjektet kalt NBI-88, se referanse Homb, Hveem & Gulbrandsen (1988). Dette er 6 "enkle" golvkonstruksjoner hvor vi antar at beregning ihht. Ohlsson (1988) er pålitelig. I tabell 3.4 presenteres de viktigste data og resultater fra disse beregningene.

Tabell 3.4
Golvkonstruksjoner fra NBI-88 beregnet ihht. Ohlsson (1988), forenklet beregning.

Bjelkelags-variant	Spennvidde (m)	Flatemasse (kg/m ²)	Beregnet f_0 (Hz)	Beregnet h'_{\max} (mm/s/Ns)
THH-3	4.2	20.7	14.2	21.8
THH-4	3.55	20.7	19.5	20.5
TL-1	3.55	21.7	18.5	30.0
TL-2	3.55	30.1	15.8	22.0
IL-4	4.5	20.8	17.0	34.3
IL-12	5.3	22.5	19.2	32.2

Prosjektet NBI-1988 omfattet også subjektiv evaluering av de samme bjelkelagskonstruksjonene i en laboratoriesituasjon, se også pkt. 4.3. Konstruksjon THH-4 og IL-12 bedømmes her som akseptable av testpanelet, mens de øvrige konstruksjonene bedømmes som noe usikre. I figur 3.4 er disse resultatene tegnet inn i klassifiseringsdiagrammet angitt i Ohlsson (1988).



Figur 3.4. Bjelkelag i prosjekt NBI-1988, beregnet og klassifisert ihht. Ohlsson (1988).

Figur 3.4 viser at bjelkelagene som subjektivt oppleves som akseptable fordeler seg både i akseptabel og usikker sone i diagrammet, samtidig som to av bjelkelagene som subjektivt oppleves som noe usikre er nær en bedømming som akseptable i diagrammet. Alle bjelkelagene som subjektivt oppleves som usikre har tilnærmet samme avstand til kriteriekurven som er foreslått av Hu (2000), se figur 4.3. Grenseverdi mellom akseptable og uakseptable golv i figur 3.4 har derfor en annen helning enn kriteriekurven foreslått av Hu. Studier av bl.a. Homb (2006) tyder også på at kriterier foreslått i Ohlsson (1988) er usikre med hensyn til nivå og/eller helning til de foreslåtte grensekurver. Det viser seg også at forenklet beregning av h'_{max} i mange tilfeller gir betydelig avvik i forhold til en fullstendig beregning gjennomført med programmet BLAG, som er utarbeidet av Aby-konsult kb (versjon 1995). Dette er et elementprogram som er tilpasset den teoretiske beregningsmetoden. Ved avvik gir beregningsprogrammet konsekvent høyere h'_{max} enn forenklet beregning i henhold til formel side 23 i Ohlsson (1988).

Det er også knyttet stor usikkerhet til demping som parameter. Metoden foreslår kun å bruke en sjablonverdi på 1 %. Erfaring fra målinger av demping viser stor spredning på grunn av både målesituasjon, metode og randvilkår for konstruksjonen. Målinger av Homb (2006) viser opptil 4 ganger så høy demping for noen bjelkelag i laboratorium i forhold til sjablonverdien. Hvis vi benyttet målt demping i stedet for sjablonverdi, vil beregningseksemplene i figur 3.4 forflytte seg horisontalt mot gunstigere vurdering pga. at laveste egenfrekvens og impulshastighet er uendret for samme konstruksjon. Bjelkelaget vil da teoretisk sett bli vurdert som (mer) akseptabelt, mens bedømmingen subjektivt er uendret. Benytter vi formel [2.3] fra Eurocode 5 vil en økning av den relative dempingen til 2 og 4 % medføre at man kan tillate henholdsvis 1,8 og 5,6 ganger så høy impulshastighet dersom laveste egenfrekvens holdes konstant. Dempingen gir altså store utslag i denne metoden.

Vurderingene så langt tilsier derfor at man foreløpig ikke benytter kriteriet i metoden, men gjennomfører beregninger av maksimal impulshastighet for å samle erfaringer og data for ev. analyse.

Det finnes for øvrig mye data i Homb (2006) til å gjennomføre en evaluering i forhold til andre metoder, eksempelvis Hu (2000).

3.5 Metode presentert av Toratti & Talja

For golv med laveste egenfrekvens minimum 10 Hz foreslår de kriterium basert på nedbøyning ved 1 kN punktlast i kombinasjon med maksimal hastighet, v_{\max} . For golv med laveste egenfrekvens under 10 Hz foreslår de kriterium basert på nedbøyning og tidsmidlet akselerasjonsnivå, $a_{w,rms}$. Kriteriet er basert på en rekke forsøk gjennom mange år, men alle vibrasjonsmålinger er gjennomført med en gående person som dynamisk last. De konkrete grenseverdiene er inndelt i vibrasjonsklasser, men hvor man også sier at det kan være behov for endringer ettersom man oppnår mer erfaring. Arbeidet inkluderer altså studier hvor det er etablert sammenheng mellom objektive og subjektive parametre. Det vil sannsynligvis være usikkert å konvertere grenseverdier/måleverdier basert på dynamisk last fra gange om til verdier med impulslaster som kilde, enten det er enhetsimpuls ref. Ohlsson (1988), helstøt ref. Smith & Chui (1988) eller gummiball ref. Homb (2006). Vi forventer derfor å benytte de konkrete grenseverdiene for v_{\max} og $a_{w,rms}$. Rapporten gir imidlertid detaljerte underlagsdata med hensyn til blant annet nedbøyning og egenfrekvens slik at kriteriene kan sammenlignes med andre tilsvarende resultater. Dette er nærmere presentert i pkt. 4.2.

3.6 Oppsummering

Metode utarbeidet av Ohlsson og presentert i Eurocode er en beregningsmessig metode og det er ikke gjennomført noen subjektive undersøkelser som grunnlag for å bedømme konstruksjonene med hensyn til opplevd ubehag, dvs. akseptable / ikke akseptable golv. Ihht. Homb (2006) er det betydelig usikkerhet i bruk av forenklet beregningsformel for h'_{\max} fra Ohlsson (1988) ved sammenligning mot beregning ihht. beregningsprogrammet BLAG og gjennomførte målinger. Prinsippene i metoden er imidlertid faglig godt begrunnet. Med dagens kunnskapsnivå anbefaler vi at det gjennomføres nærmere analyser av tilgjengelige data med denne metoden før den tas i bruk til konkret dimensjonering. Men det vil ubetinget være en fordel å gjennomføre beregninger med denne metoden parallelt med andre metoder og kriterier, inntil man har anledning til å gjennomføre en ny evaluering. Uavhengig av hvilke metoder som prioriteres vil det være behov for å studere dempingsegenskapene nærmere.

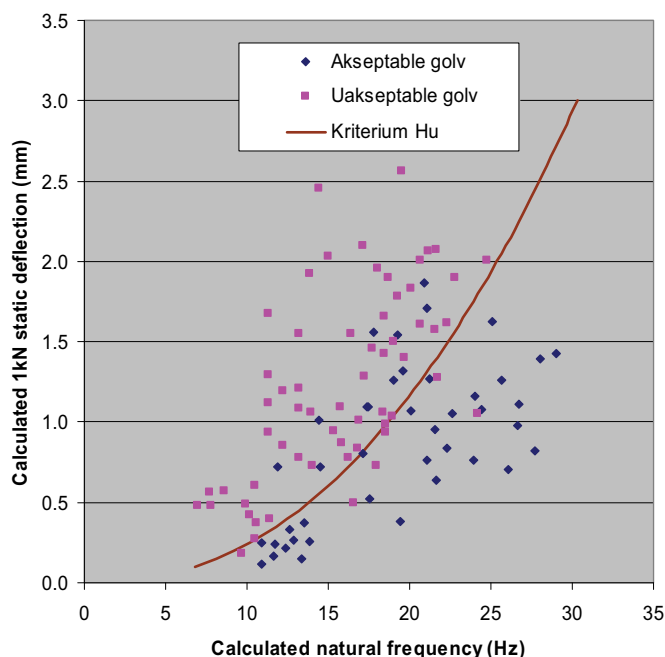
Metode presentert av Toratti & Talja (2006) baserer seg på målinger med gående person som dynamisk last. Måleresultatene vil derfor ikke kunne være tilstrekkelig reproducerbare med andre forsøkspersoner og det er svært usikkert i hvilken grad resultatene kan konverteres til andre last-situasjoner. Vi foreslår derfor å avvente bruk av denne metoden, men som det framgår av pkt. 4.2 finnes det et stort antall resultater som er svært nyttige.

Prosjekteringskriterium utarbeidet av Hu (2007) er basert på en evaluering av subjektiv bedømming av brukere i forhold til beregnede parametre til et stort antall golvkonstruksjoner. Metoden er forholdsvis enkel så sant man beregner med tilstrekkelig nøyaktighet. Vi foreslår at denne metoden benyttes framover til man har gjennomført en ny evaluering av kriteriene. Metoden er ikke basert på etasjeskillere med skivevirkning eller høy tverrstivhet. Den håndterer heller ikke eksplisitt dempingsegenskaper til konstruksjonen og begrenses nedad til 7 Hz.

4. Metode med frekvens og nedbøyning

4.1 Resultater fra Hu

Som nevnt i pkt. 2.5 og 3.3 har Hu (2007) utarbeidet en prosjekteringsveiledning for bjelkelag med hensyn til opplevde rystelser. Beregninger av laveste egenfrekvens og nedbøyning under en punktlast på 1 kN er sammenstilt med subjektiv bedømming av de samme bjelkelagene. Figur 4.1 gjengir ekstrakt av figur fra Hu (2000) hvor design-kriteriet er vist som en heltrukket linje.



Figur 4.1. Data og foreslått kriterikurve fra Hu (2000) med sammenligning mellom subjektiv vurdering og aktuelle beregningsparametre.

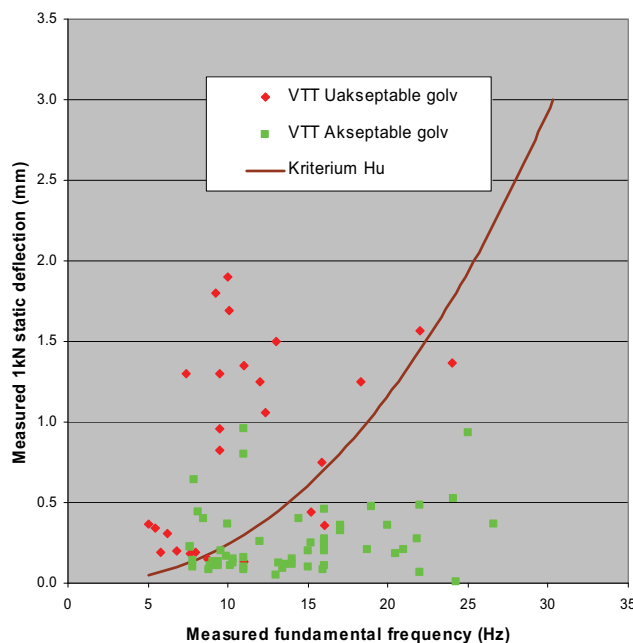
Konstruksjonsløsningene omfatter bjelkelag med ulike typer overgolv, himlingsløsning og noen varianter med tverravstiving. Dette innebærer en viss variasjon i flatevekt og stivhet på tvers av bjelkeretningen. Men underlaget omfatter ikke løsninger med påstøp av betong eller dekker i massivtre. Det er også viktig å merke seg at Hu (2000) angir at det foreslåtte kriteriet gjelder ned til 7 Hz, men alle golv som har blitt vurdert som akseptable har laveste egenfrekvens høyere enn ca. 10 Hz. Figur 4.1 viser 7 bjelkelag som er bedømt som uakseptable men som befinner seg i akseptabel sone, og 10 bjelkelag som er bedømt som akseptable men som befinner seg i uakseptabel sone. I rapporten er det derfor gjennomført en vurdering av hvilke tilfeller som gir god eller dårlig overensstemmelse mellom beregnede og målte verdier, noe som da også har betydning for den subjektive bedømmingen. Best overensstemmelse er oppnådd med 3 grupper golv:

- store golv både mht. spennvidde og bredde
- golv med overgolv eller himling der tilleggsmasse til disse lagene er nøyaktig kjent
- golv med lang spennvidde og ingen kantunderstøttelse

For små golv med korte spennvidder og små senteravstander er overensstemmelsen mindre god. Beregnet frekvens er da klart høyere enn målte verdier. Sannsynlige årsaker er at skjærdeformasjon til korte spenn ikke blir ivare tatt med forenklet metode, eventuelt at oppleggsbetingelsene ikke har vært så stive som metoden forutsetter.

4.2 Resultater fra finske arbeider

Med bakgrunn i finske arbeider nevnt i pkt. 2.3 og pkt. 3.5 har Toratti & Talja (2006) utarbeidet et kriterium for klassifisering av bjelkelag. Dette er basert på omkring 80 bjelkelag der man har resultater fra både subjektiv bedømming og en del målte parametre, se tabell 2.3. I denne sammenheng er det svært aktuelt å gjøre en evaluering av verdier for laveste egenfrekvens i kombinasjon med nedbøyning under en punktlast på 1 kN siden slike resultater også er tilgjengelige. I figur 4.2 vises reproduserte data fra figur 5 hos Toratti & Talja (2006) sammen med Hu (2000) sin kriterie-kurve (lik kurve i figur 4.1).



Figur 4.2. Reproduserte data fra Toratti & Talja (2006) kombinert med kriterium fra Hu (2000).

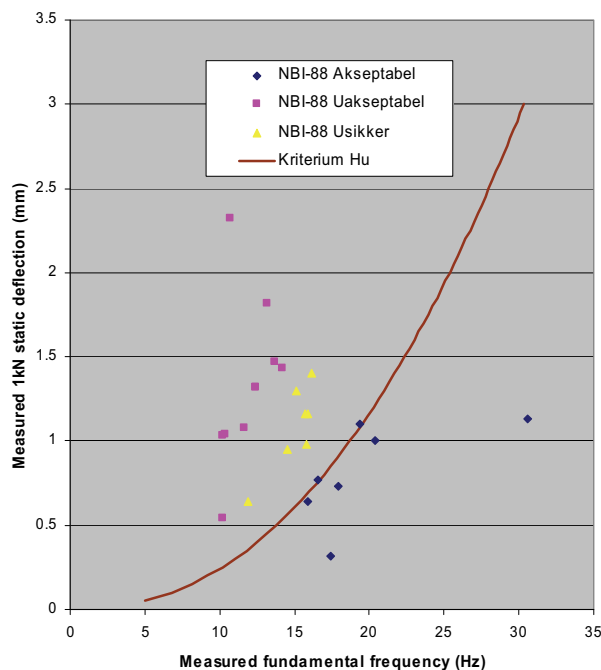
Konstruksjonsløsningene her er sannsynligvis vanlige bjelkelag med ulike typer overgolv og himlingsløsning. Så vidt vi har klart å se omfatter ikke underlaget toveis plater eller løsninger med tverravstiving.

Bjelkelag som er bedømt som uakseptable er jevnt fordelt i området fra ca. 5 til 25 Hz, mens bjelkelag som er bedømt som akseptable er jevnt fordelt i området fra ca. 8 til 25 Hz. Figur 4.2 viser 4 bjelkelag som er bedømt som uakseptable men som befinner seg i akseptabel sone. Disse har moderate avvik i forhold til kriteriekurven. Figur 4.2 viser også 7 bjelkelag som er bedømt som akseptable men som befinner seg i uakseptabel sone. Mange av disse har markerte avvik i forhold til kriteriekurven. Det er også lite data som bekrefter kurvens posisjon nedenfra i frekvensområdet over ca. 16 Hz. I artikkelen fra Toratti & Talja (2006) gis ingen nærmere evaluering av dette, sannsynligvis fordi de har foreslått klassifisering på grunnlag av andre parametre. Fra andre arbeider er det imidlertid kjent at når laveste egenfrekvens er høyere enn 15 – 16 Hz får man sjelden dårlig bedømming av bjelkelaget, se også pkt. 2.2.

4.3 Resultater fra norske arbeider

I perioden 1986 til 1988 ble det gjennomført et forskningsprosjekt ved Norges byggforskningsinstitutt som omhandlet svingninger i lette bjelkelag, se Homb, Hveem & Gulbrandsen (1988). I dette prosjektet ble det gjennomført diverse målinger av bjelkelag bygd opp i laboratoriet og i tilknytning til dette en liten studie av opplevde rystelser med opptil 46 forsøkspersoner. Egenskaper til både montert bjelkelag og medvirkende komponenter er godt dokumentert i rapporten. Det har i ettertid vært mulig å finne fram tilhørende data for målt nedbøyning under 1 kN punktlast, laveste egenfrekvens og opplevd sjenanse fra forsøkspanelet. Svaralternativene mht. opplevde rystelser har imidlertid vært litt annerledes enn undersøkelsene nevnt over. Dette innebærer at resultatene deles i 3 hovedkategorier, henholdsvis uakseptable bjelkelag, akseptable bjelkelag og usikre bjelkelag (dvs. sonen mellom de to førstnevnte kategoriene).

Resultater fra 25 ulike varianter lette bjelkelag er vist i figur 4.3 sammen med Hu (2000) sitt kriterium (lik kurve i figur 4.1). I materialet er det kun erfaringsdata fra bjelkelag som har laveste egenfrekvens over ca. 10 Hz.



Figur 4.3. Sammenligning mellom subjektiv vurdering og målte parametre fra Homb & al. (1988) kombinert med kriterium fra Hu (2000).

I prosjektet ble det benyttet både bjelker i heltre, I-bjelker og bjelker av tynnplateprofiler av stål, men alle med enkle overgolv av sponplate eller trebord. Oppleggsbetingelser og spennvidder har variert, og noen bjelkelag har blitt målt med tverravstivende bjelke midt i spennet. Alle bjelkelag som har blitt bedømt som akseptable holder seg innunder kriteriekurven fra Hu. De usikre bjelkelagene er også jevnt fordelt og nærmere kriteriekurven enn de uakseptable løsningene. Disse resultatene bekrefter at foreslått kriterium kan være godt egnet for norske bjelkelag, men at man må se nærmere på målte/beregnete verdier i forhold til at dette gjelder en ren laboratorieoppstilling. I et ferdig bygg vil opplevelsene trolig være mer gunstige og målt nedbøyning under punktlast lavere.

4.4 Oppsummering

Rapportene fra Hu (2000 og 2007) viser omfattende dokumentasjon som underlaget for etablering av kriteriekurven. Finske arbeider presentert på samme måte bekrefter at metoden kan være relevant også for deres golvkonstruksjoner, men at det både er avvik og databegrensninger som gir mindre god sammenheng. Resultater fra norske arbeider på slutten av 80-tallet bekrefter at kriteriet er pålitelig innenfor et frekvensområde fra ca. 10 til 20 Hz.

5. Metoder som ivaretar demping

5.1 Metode fra Ohlsson / Eurocode

Mange forskningsresultater viser at mennesker tolererer større impulshastigheter dersom svingningen dempes raskt. Det er derfor klart at demping er en viktig parameter i konstruksjoner hvor det er dynamiske laster og mennesker tilstede. Dette gjelder spesielt når de dynamiske lastene er periodiske (gjentar seg) og når laveste egenfrekvens er under 10 – 12 Hz. Metoden utarbeidet av Ohlsson (1988) og videreført i en enklere versjon med Eurocode 5 (2003), inkluderer demping som en av 3 viktige vurderingskriterier. Rent prinsipielt kan man ikke kvantitativt beregne demping for en konstruksjon eller et materiale. Demping må bestemmes empirisk ut fra tidligere erfaringer eller måleresultater, eventuelt bestemmes for en gitt konstruksjon ved målinger. I Ohlsson (1988) sin prosjekteringsmetode er ikke dette behandlet i detalj, men angir at man som et utgangspunkt bør bruke en relativ demping, ζ på 1 % for vanlige lette bjelkelag og 0,8 % for bjelkelag med stor spennvidde eller tyngde ($> 150 \text{ kg/m}^2$). Benytter man en sjablonverdi på 1 % innebærer dette i realiteten at x-aksen i klassifiseringsdiagrammet til Ohlsson (1988) er konstant proporsjonalt med laveste egenfrekvens, siden dempekoeffisient $\sigma_o = f_1 * \zeta$.

Disse metodene gir altså ikke noen konkrete verktøy for å kunne bruke demping aktivt for gitte konstruksjoner. I Homb (2006) finnes studier og en del måleresultater for demping. Dette kan evalueres nærmere, men en viktig oppsummering var at demping som parameter er komplisert både med hensyn til grunnleggende prinsipper og rent måleteknisk. Uavhengig av metodene fra Ohlsson/Eurocode vil det derfor være viktig å gå nærmere inn på måling og bruk av demping som parameter i prosjektet.

5.2 Metode med integrert akselerasjonsnivå

Prinsippet med å integrere målt akselerasjonsnivå over en viss tid når man setter golvet i bevegelse med en impulslast, innebærer at man får et resultat som også gir informasjon om dempingen i målepunktet. Dette er måleteknisk enklere og mer nøyaktig enn andre vanlige metoder for å bestemme demping. Man må imidlertid bestemme hvilken impulslast man skal ha og denne må holdes konstant. I prinsippet må man også velge hvilken integrasjonstid som skal benyttes. Siden et foreslått kriterium har basert seg på 1 sek, se pkt. 2.3.1, er det liten grunn til å velge noe annet.

Ulempen med å velge et slikt kriterium gjelder hvordan akselerasjonsnivået fra en impuls, a_{RMS} skal beregnes. En forenklet beregningsmodell finnes, men det er usikkert om denne er verifisert mot målinger. Det vil derfor være nødvendig å undersøke dette nærmere og/eller utvikle en beregningsmetode dersom kriteriet skal benyttes alene. Ved sammenligning med andre parametre som er målt eller beregnet kan man trolig ha stor nytteverdi av måleresultater for a_{RMS} .

5.3 Oppsummering

Vurderingene som er gjennomført her kombinert med erfaringer tilsier at vi anbefaler at nye målinger gjennomføres slik at man kan beregne a_{RMS} og demping separat ved hjelp av kjente metoder. Dette kan være demping fra logaritmisk dekrement, båndbredde til resonansfrekvenser i et frekvensspekter eller fra modal analyse. Teori, praktisk tilnærming med måleteknikk og resultater fra forsøk vil vi arbeide med i tilknytning til delprosjekt WP-B: *Experimental work*.

6. Valg av kriterier

6.1 Vanlige bjelkelag – foreløpig kriterium

For vanlige bjelkelag anbefaler vi at man framover benytter kriteriet utarbeidet av Hu (2007) ned til $f_0 = 10$ Hz:

$$\frac{f_o}{\Lambda^{0.44}} > 18.7 \quad \text{eller} \quad \Lambda < \left(\frac{f_o}{18.7} \right)^{2.27} \quad [6.1]$$

I tillegg mener vi at deformasjonen bør begrenses, og at vi da tar utgangspunkt i tidligere definert grenseverdi med maksimalt 1,3 mm ved en punktlast på 1 kN. Kriteriet innebærer at man bestemmer verdier for frekvens og deformasjon ved hjelp av beregninger. I kombinasjon med andre aktuelle kriterier utprøves dette ned til $f_0 = 8$ Hz, se tabell 6.3. Lette bjelkelag med laveste egenfrekvens under 8 Hz frarådes.

6.2 Tverravstivede bjelkelag eller skiver – foreløpig kriterium

For bjelkelag med høy tverrstivhet, påstøp, massivtredekker eller andre typer 2-veis plater finnes ingen tilsvarende erfaring mht. subjektiv evaluering og formel [6.1] gjelder prinsipielt ikke. Vi regner det imidlertid som relativt sikkert å benytte kriteriet i nevnte formel ned til ca. 12,5 Hz. I området 8 – 12,5 Hz angir vi ingen konkrete forslag til kriterium og vi fraråder slike golvkonstruksjoner hvor laveste, beregnede egenfrekvens er under 8 Hz.

Det er imidlertid viktig å arbeide med dette for å kunne etablere klare kriterier på et seinere tidspunkt. Som underlag for dette foreslår vi at *Comfort Properties* prosjektet legger opp til beregninger og målinger ihht. tabell 6.3. Antall frekvenskomponenter og individuell separering mellom disse bør også inngå når dette studeres nærmere, ref. Ljunggren (2006).

6.3 Innsamling av underlag

I tabell 6.3 gis en oversikt over anbefalte parametre med hensyn til beregninger og målinger som utprøves i prosjektet *Comfort Properties of timber floor constructions*. Dette vil danne grunnlaget for å evaluere kriterier for opplevde vibrasjoner på et seinere tidspunkt.

Tabell 6.3
Parametre for utvikling av kriterier i prosjektet; *Comfort Properties of timber floor constructions*

Metode	Beregninger	Målinger	Kommentarer
Impuls fra gummiball			
A) Generelt	f_0, f_1, f_2 osv.	f_0, f_1, f_2 osv. + demping	Beregninger: Diverse metoder Målinger: FFT-analyse av tidsserie
B) Ohlsson /EC 5	h'_{\max}	Simulert h'_{\max}	Beregninger: Både forenklet og BLAG Fra målinger: Analyse ref. Homb (2006)
C) Smith & Chui	uavklart	a_{RMS}	Beregning: Vurderes Målinger: Normaliseres til simulert helimpuls
Nedbøyning under 1 kN punktlast			
D) Generelt	Λ	Λ	Maksimal nedbøyning i mykeste punkt

Metode merket A) og D) er nødvendig minimum for å kunne benytte kriterium fra Hu (2007). Metode B) og C) er alternative metoder som utvider underlaget og som måleteknisk inkluderer demping.

7. Oppsummering og konklusjoner

Studiene som er gjennomført i delprosjektet viser at det eksisterer kriterier for opplevde vibrasjoner som overensstemmer bra med tilsvarende underlag vi har fra nordiske undersøkelser. Dette innebærer at vi foreslår å benytte kriteriet fra Hu (2007) for vanlige bjelkelagsløsninger ned til laveste egenfrekvens på 10 Hz. Denne begrensningen er satt på grunnlag av erfaringsdata som har vært tilgjengelig for bjelkelag som oppleves som akseptable. For bjelkelag med høy tverrstivhet, påstøp, massivtredekker eller skivevirkning på annen måte eksisterer det foreløpig ikke tilsvarende sammenheng mellom opplevde egenskaper og aktuelle, fysiske parametre. Foreløpig foreslår vi derfor å benytte samme kriterium som nevnt over men begrenset ned til 12,5 Hz.

Framover blir det derfor viktig å arbeide med underlag som kan utvide kunnskap og måledata i frekvensområdet ned til 8 Hz. Vi mener da at demping kan være en viktig egenskap og at dette bør inkluderes ved valg av relevante parametre. Resultatene fra dette arbeidet bør evalueres innenfor *Comfort Properties* prosjektet på et seinere tidspunkt.

På grunnlag av tilgjengelig underlag fraråder vi golvkonstruksjoner i tre hvor laveste, beregnede egenfrekvens er under 8 Hz. Dette skyldes manglende sammenheng med hvordan golvkonstruksjonen oppleves. I tillegg er det sannsynlig at 2., 3. eller 4. harmoniske impulsen av gangfrekvensen (som er på ca. 2 Hz) kan sammenfalle med bjelkelagets egenfrekvens. Dette kan gi betydelig økte utsving og egenskaper som oppleves som svært ugunstige.

8. Referanser

- Al-Foqaha'a, A.A., Cofer, W.F. & Fridely, K.J. (1999). Vibration Design Criterion for Wood Floors Exposed to Human Normal Activity. *Journal of Structural Engineering* v. 125, No. 12, 1999, p. 117-129.
- CWC (1997). Development of design procedures for vibration controlled spans using engineered wood members. *Concluding report Canadian Wood Council, DMO Associated, Quaille Engineering Ltd. and Forintek Canada Corp.* September 04, 1997.
- Dolan, J.D., Murray, T.M., Johnson, J.R., Runte, D. & Shue, B.C. (1999). Preventing Annoying Wood Floor Vibrations. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 1, 1999, pp. 19-24.
- Ellis, B.R. (2001). Serviceability evaluation of floor vibration induced by walking loads. *The Structural Engineer*, v. 79, No. 21, 2001, p. 30-36.
- Eurocode 5 (2003), prEN 1995-1-1. Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Brussel, December 2003.
- Hansen, H. (1958). Nedbøyning av trebjelkelag. *Norges Byggeforskningsinstitutt NBI, Rapport No. 26.* Oslo 1958.
- Homb, A. (2006). Low frequency sound and vibrations from impacts on timber floor constructions. *Doctoral theses at NTNU, 2006:132.* IME Faculty, Dep. of Electronics and Telecommunications, Trondheim, Norway.
- Homb, A., Hveem, S. & Gulbrandsen, O. (1988). Svingninger i lette bjelkelag. *Rapport O 1375, Norges byggeforskningsinstitutt for NTNU/ industigruppe (ikke publisert).* Oslo Januar 1988.
- Hu, L.J. (2000). Serviceability design criteria for commercial and multi-family floors. *Report no. 4 to Canadian Forest Service.* Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, 2000, 42 p.
- Hu, L.J. (2002a). Implementation of a new serviceability design criteria for wood-based floors. *Report no. 9 to Canadian Forest Service.* Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, 2002, 79 p.
- Hu, L.J. (2002b). Development of a performance criterion for controlling vibrations in wood-based floors. *Proceedings WCTE 2002; 7th World Conference on Timber Engineering*, August 12-15, 2002, Shah Alam - Malaysia, p. 219-226.
- Hu, L.J. (2007). Design Guide for Wood-Framed Floor Systems. *Report no. 32 to Canadian Forest Service.* Final Report 2006/2007. Forintek Canada Corp., Σ 111 p.
- Hu, L.J. & Chui, Y.H. (2004). Development of a Design method to Control Vibrations Induced by Normal Walking Action in Wood-Based Floors. *Proceedings WCTE 2004; 8th World Conference on Timber Engineering*, p.1001-1006.
- Jorissen, A. (2006). The design of timber floors. WCTE 2006.
- Ljunggren, F. (2006). Floor Vibration – Dynamic Properties and Subjective Perception. Doctoral Thesis, Luleå University 2006:19, 39 p. and 5 papers.
- NBI (1997). Trebjelkelag. Dimensjonering og utførelse. *Norges byggeforskningsinstitutt, Byggedetaljer, 522.351*, 8 s.

Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere

NS-ISO 2631-1 og 2631-2 (2003). Mekaniske vibrasjoner og støt. Bedømmelse av hvordan helkroppsvibrasjoner virker inn på mennesker. Del 1: Generelle retningslinjer. Del 2: Vibrasjoner i bygninger (1 Hz til 80 Hz).

Ohlsson, S. (1982). Floor vibrations and Human Discomfort. PhD. *Thesis, Div. of Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology*. ISBN 91-7032-077-2, Göteborg, Sweden, 1982.

Ohlsson, S. (1988). Springiness and human induced floor vibrations. A design guide. *Report D12:1988, Swedish Council for Building Research*. Stockholm 1988.

Smith, I. & Chui, Y.H. (1988). Design of Lightweight Wooden Floors to avoid Human Discomfort. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, 1988, pp. 254-262.

Toratti, T. & Talja, A.(2006). Classification of Human Induced Floor Vibrations. *Building Acoustics*. Volume 13 No. 3, 2006 pages 229-239.

Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere