



VÄSTRA
GÖTALANDSREGIONEN
MILJÖMEDICINSKT CENTRUM

Vibrationer inomhus från trafik

Mikael Ögren

27 maj 2016

Sahlgrenska Universitetssjukhuset
Arbets- och miljömedicin
Västra Götalandsregionens Miljömedicinska Centrum (VMC)
ADRESS Box 414, 405 30 Göteborg BESÖK Medicinaregatan 16
TELEFON 031-786 28 95 E-POST mikael.ogren@amm.gu.se
HEMSIDA www.amm.se

Förord

Denna rapport är ett underlag till arbetet inom nationella samordningsgruppen för omgivningsbuller, där 14 myndigheter arbetar för att skapa en gemensam syn på omgivningsbuller. Arbetet leds av Naturvårdsverket, och denna rapport har finansierats av Trafikverket och Västra Götalandsregionens Miljömedicinska Centrum.

Göteborg 27 maj 2016
Arbets- och miljömedicin
Mikael Ögren

Innehåll

1	Alstring och spridning	5
1.1	Alstring	5
1.2	Utbredning och påverkan på hus	5
2	Mät- och beräkningsmetoder	7
2.1	Förskjutning, hastighet och acceleration	7
2.2	Dos och maxvärde	9
2.3	Mätmetod i Sverige och Norge	10
2.4	Omvandling mellan acceleration och hastighet	10
2.5	Mätmetoder och riktvärden internationellt	11
2.6	Beräkningsmetoder	12
3	Störning, sömn och hälsa	14
3.1	Vibrationer och sinnen	14
3.2	Tröskelvärde för vibrationsförmåelse	14
3.3	Störning	14
3.4	Störning från vibrationer jämfört med buller	15
3.5	Sömnstörning	17
3.6	Vibrationer och hälsa	18
4	Åtgärder	19
4.1	Åtgärder vid källan	19
4.2	Åtgärder i utbredningsvägen	19
4.3	Åtgärder i byggnaden	19
5	Uppskattning av antalet utsatta för vibrationer från tågtrafik	21

Sammanfattning

När tunga fordon färdas på spår eller väg kan det i vissa fall generas vibrationer i marken. När marktypen är relativt mjuk, som till exempel lera eller silt, så kan vibrationerna fortplantas i marken och leda till vibrationer i närliggande byggnader. För hårdare marktyper, som till exempel berg eller fast morän, så kan det bildas markburet ljud i byggnaden, men i denna rapport är fokus på vibrationer som i första hand är störande i sig. Typiskt är frekvensområdet 5 – 20 Hz, men vibrationer i hela området 1 – 80 Hz omfattas av den svenska standarden SS 460 48 61.

Vibrationerna kan beskrivas antingen som en förskjutning, en hastighet eller en acceleration, och mäts vanligen med en givare placerad på golvet i den aktuella byggnaden i tre riktningar. Både geofoner och accelerometrar används, men det är viktigt att göra omvandlingar mellan de olika storheterna så att inte elektroniskt brus förstärks och påverkar signalerna, speciellt vid omvandling från acceleration till hastighet.

Olika mät- och utvärderingsmetoder används i olika länder. Gemensamt för samtliga länder utom Japan är att man mäter på golvet, ofta mitt på golvet i det rum där spännvidden är störst, och att man utvärderar hastigheten eller ett enhetslöst mått som är proportionellt mot hastigheten. Det finns också en internationell standard (ISO 2631-2), men tyvärr används den relativt sällan i sin helhet, varför det kan vara mycket svårt att jämföra mätningar från olika länder.

Människan påverkas av vibrationer på flera olika sätt. En viktig mekanism är via känselceller i huden som direkt kan känna av vibration eller deformation, men även andra nervceller är viktiga för förnimmelsen av vibrationer, till exempel via kroppens känslighet för förflyttning av kroppsdelar vid leder. Beroende på vår kroppsställning är vi olika känsliga för vibrationer i olika riktningar och vid olika frekvenser. För att avgöra om en vibration är förnimbar eller störande används därför olika filter som motsvarar dessa olika känsligheter. I termer av hastighet så är kroppen mest känslig i området 0,5 – 10 Hz beroende på kroppsställning och vibrationsriktning.

Om vi utsätts för vibrationer i vår hemmiljö nattetid finns det risk för negativ påverkan på vår sömn. Uttryckt i svenska mått så ser man i laboratorieförsök påverkan på fysiologiska parametrar som hjärn- och hjärtaktivitet vid ungefär 0,3 – 0,4 mm/s komfortvägd maximal vibrationshastighet. Vibrationer på alla tider på dygnet kan ge störning. I enkätundersökningar för svenska förhållanden så är ungefär 20% av de boende störda vid 0,3 mm/s, men siffrorna bygger oftast på vibrationsvärden skattade från ett fåtal stickprovsmätningar och är relativt osäkra.

Vibrationer från vägtrafik beror ofta på skador eller ojämnheter på vägytan, om dessa åtgärdas kan man få ner vibrationerna avsevärt. I vissa fall är dock marken såpass vibrationskänslig att även en normal slät vägyta kan ge kännbara vibrationer i närliggande hus. För järnväg är det ofta kostsamt att åtgärda vibrationer vid banan. Antingen måste spåret stabiliseras eller vibrationerna hindras från att nå byggnaden med stora ingrepp i marken mellan järnvägen och byggnaden. Lyckade fältförsök och teoretiska modeller visar att det är möjligt att minska vibrationshastigheten genom att gräva ner skärmar av tungt och styvt material, eventuellt belagda med elastiska material, men kostnaderna är mycket höga och bara de byggnader omedelbart bakom åtgärden får någon förbättring.

Trafikverket har under 2016 genomfört en sammanställning av samtliga tillgängliga mätdata för vibrationer från tågtrafik på järnvägsnätet som administreras av Trafikverket. Genom att analysera dessa data tillsammans med geologiska data från SGU kunde man uppskatta att ungefär 16 000 personer exponeras för vibrationer från 0,4 mm/s komfortvägd maximal vibrationshastighet och uppåt i Sverige. Av dessa är ungefär hälften exponerade över 0,7 mm/s.

Summary in English

When heavy vehicles travel on the track or road vibrations are sometimes generated in the ground. When the ground type is relatively soft, such as clay or silt, then the vibrations propagate in the soil and can lead to vibrations in nearby buildings. For stiffer ground types such as rock or solid moraine the vibrations can lead to ground-borne noise in the building, but this report is focused on vibrations that are directly affecting the residents. Typically, the frequency range is 5 – 20 Hz, but vibrations throughout the range 1 – 80 Hz are covered by the Swedish standard SS 460 48 61.

The vibrations in three directions can be described in three different ways, either as displacement, velocity or acceleration, and are typically measured with a sensor placed on the floor of the building. Both geophones and accelerometers are used for this purpose, but it is important to make conversions between the different units so that no electronic noise is amplified in a way that could affect the measured signals, especially when converting from acceleration to velocity.

Different measurement and evaluation methods are used in different countries. Typically the measurement is performed on the floor, often in the middle of the floor in the room where floor span is longest, and for evaluation the velocity, or a unitless measurement that is proportional to the velocity, is used. There is also an international standard (ISO 2631-2), but unfortunately it is used in full relatively rarely. Therefore it can be very difficult to compare measurements from different countries.

Humans are affected by vibration in several different ways, partly through sensory cells in the skin that can directly detect vibration or deformation, and partly through the body's sensitivity to the movement of body parts at the joints. Depending on our posture the sensitivity to vibrations in different directions and at different frequencies changes. To determine if a vibration is perceptible or annoying different filters corresponding to these different sensitivities are used. In terms of the velocity the body is most sensitive in the range 0.5 – 10 Hz depending on body position and vibration direction.

If we are subjected to vibrations in our home at night there is a risk of negative impact on our sleep. Expressed in Swedish standards, influence on physiological parameters and brain heart activity can be detected in laboratory experiments at about 0.3 to 0.4 mm/s comfort weighted maximum vibration velocity. Vibrations at all times of the day can cause annoyance. In surveys in Sweden about 20 % of the residents report that they are annoyed at 0.3 mm/s, but these figures are based on vibration velocities estimated from a few random measurements and are relatively uncertain.

Vibrations from road traffic is often due to a damaged or uneven road surface, removing the unevenness can bring down the vibration velocity at nearby buildings considerably. In some cases the ground is so sensitive to vibrations that even a normal smooth road can cause vibrations in nearby buildings. For railway traffic it is costly to reduce the vibrations at the source. Either the rail must be stabilised or vibrations prevented from reaching the building by major interventions in the ground between the railway and the building. Successful field tests and theoretical models indicate that it is possible to dig down stiff and heavy barriers coated with elastic material, but the costs are very high and only the buildings immediately behind the barrier will have any improvement.

The Swedish Transport Administration has completed a compilation of all available measurements of vibration velocity from railway traffic on the rail network. By analysing this data together with geological data from SGU it could be estimated that about 16 000 people are exposed to vibration velocities from 0.4 mm/s and above in Sweden. Of these, about half are exposed over 0.7 mm/s.

1 Alstring och spridning

1.1 Alstring

Kännbara vibrationer i byggnader i närheten av väg eller järnväg uppstår när vibrationerna i spåret eller vägytan fortplantas i lösa jordlager fram till byggnaden. Hur starka vibrationerna blir avgörs i princip av tre faktorer:

1. hur mycket vibrationer som genereras i interaktionen mellan fordon och underlag,
2. hur väl vibrationerna fortplantas genom marken,
3. och hur byggnaden dämpar eller förstärker markvibrationerna när de fortplantas från grunden och upp i byggnaden.

För järnvägen så är källan till vibrationerna de rörelser som uppstår när ett fordon rör sig längs spåret. Fordonet representerar en rörlig last, där varje kontaktpunkt mellan hjul och räl för över en viss kraft, och där kontaktpunkterna förflyttar sig utmed spåret med fordonets hastighet. Rälen är inte en perfekt plan yta, utan räls-huvudets höjd varierar utmed spåret. Dels varierar underlaget på grund av slumpvisa variationer och sättningar, och dels varierar rälen på grund av slitage, skillnad i infästning och så vidare. Styvheten varierar också utmed spåret. Stödet under varje sliper varierar, vissa står mycket styvt "inspända" i ballasten, andra är mer eftergivliga. Avståndet mellan sliparna ger också en periodisk skillnad i styvhet utmed rälen. Rälen kan också vara olika mycket förspänd, i vissa fall kan ett antal sliprar hänga och böja ned rälen, eller tvärt om trycka den uppåt. Markens styvhet/packningsgrad under ballasten kan dessutom variera utmed spåret. Spänningar i rälen uppstår också till följd av temperaturutvidgning.

Tillsammans gör dessa effekter att samma kraft böjer ned rälen olika mycket när den rör sig utmed spåret, vilket alstrar vibrationer. Ännu mer komplex blir situationen när man tar hänsyn till dynamiken. Fordonets fjädring påverkas av vibrationerna, vilket i sin tur påverkar kraften som lastar rälen. Vid spårskarvar och växlar kan också vibrationer genereras på grund av kraftimpulsen som uppstår när hjulet passerar en skarv eller skada. Förändringar av underlaget kan också ge kraftimpulser som leder till lokal vibrationsgenerering, till exempel vid broar, underfarter och rörkonstruktioner under banan.

Mekanismerna är liknande för vibrationer från vägtrafik. Ojämnheter och skiftande styvhet på vägytan interagerar med fordonens hjul som tillsammans med fjädringen ger krafter ner i vägkroppen. Gemensamt för väg- och tågtrafik är också att fordonens tyngd är viktig. De tyngsta fordonen ger de största vibrationerna. Hastigheten är också en viktig parameter, generellt så ger högre hastighet mer vibrationer. I vissa fall kan dock krafterna pricka en viss frekvens som utbreder sig särskilt bra i marken, eller där en närliggande byggnad har en kraftig resonans, och då kan en viss "olycklig" hastighet ge starkare vibrationer än både högre och lägre hastigheter.

Vägbulor är ett specifikt problem för vägtrafiken som kan generera vibrationer. Olika form på vägbulan kan ge olika mycket vibrationer, och hastigheten på fordonet som kör över bulan är en viktig parameter [1]. Andra typer av hastighetsnedsättande åtgärder, som till exempel trafiksäkerhetskameror eller avsmalningar, ger inte lika mycket vibrationer i närliggande byggnader.

Trots att vägytan och vägkroppen kan se väldigt olika ut och olika fordon har ganska olika egenskaper i hjulupphängningen, så är ändå den underliggande markens egenskaper de viktigaste för hur mycket vibrationer som genereras [2] (bortsett från närvaro av vägskador och bulor).

1.2 Utbredning och påverkan på hus

Krafterna som uppstår när fordonet passerar fördelas genom vägkroppen eller spårkonstruktionen ner emot det bärande underlaget. Beroende på markens egenskaper genereras då olika typer av vågor som utbreder sig i marken. Vågorna som fortplantar sig kan delas in i två kategorier, ytvågor och rymdvågor. Ytvågornas energi utbreder sig i marken närmast markytan, medan rymdvågornas energi fördelas relativt jämt i alla riktningar i normalfallet, varför ytvågorna är de viktigaste i detta sammanhang. En bra sammanfattning av grunderna för markvibrationer och utbredning är publicerad av Svenska Geotekniska Föreningen[3].

Den viktigaste vågtypen av ytvågorna är Rayleighvågor. Den enklaste teoretiska modellen av markvibrationer är ett elastiskt halvrum, dvs en oändlig markyta där marken har oändligt djup och är elastisk. För en punktkälla på ytan så gäller att den vertikala hastigheten till följd av Rayleighvågor långt från källan är proportionell mot roten ur avståndet. Fördubblas avståndet så sjunker vibrationshastigheten på ytan med en faktor ett genom roten ur två (ca 0.707).

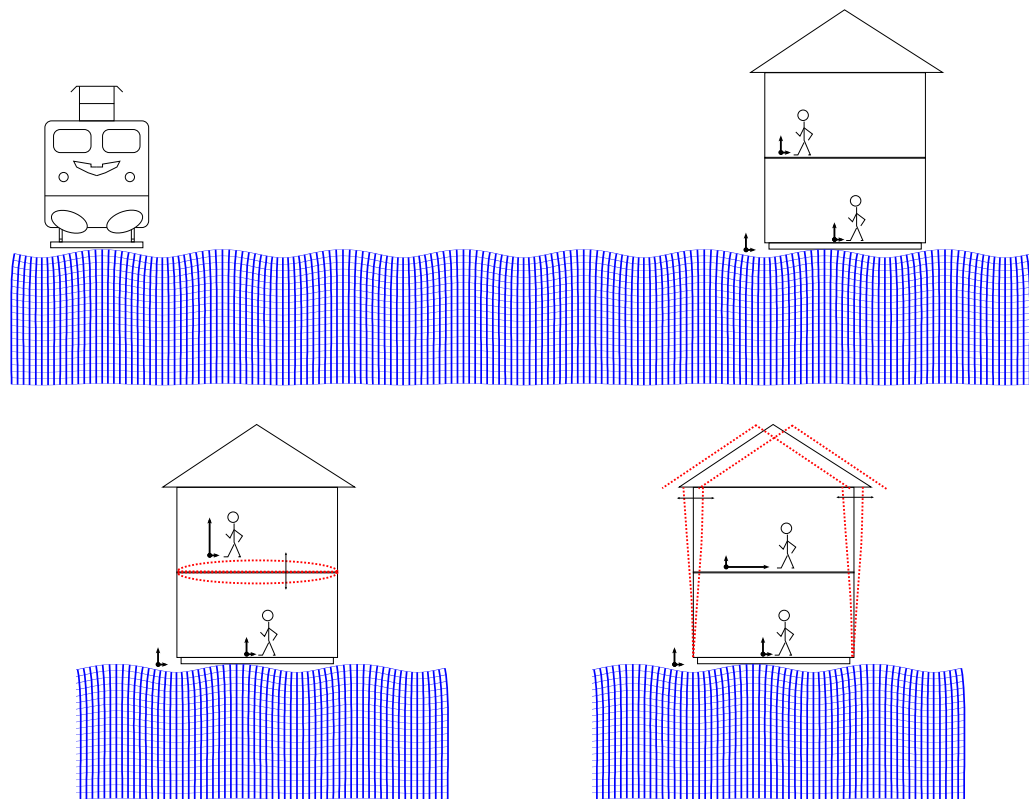
I verkligheten finns dock alltid dämpning i någon form, och andra vågtyper samverkar med Rayleighvågorna. Marken är dessutom sällan helt homogen, utan lager med olika egenskaper förekommer på olika djup. Slutligen

är källan inte heller alltid en punktkälla, utan kan vara utbredd utmed järnvägen eller vägen. Inom forskningsprojektet TVANE [4] jämförde man mätningar med detaljerade beräkningar [5] och fick fram följande samband

$$v = \frac{m}{r^k}, \quad (1)$$

där v är vibrationshastigheten i mark, r avståndet mellan järnvägen och mottagarpunkten och m och k två konstanter som beskriver utbredningen och källstyrkan. För det teoretiska fallet med Rayleighvågor i ett elastiskt halvrum med en punktkälla vid ytan så är $k=0,5$. I TVANE blev resultatet av mätningar och beräkningar att k varierar mellan 0,7 och 0,9.

När vågorna i marken har nått fram till en byggnad så interagerar dessa med byggnaden, och fortplantas igenom konstruktionen. Hur starka vibrationerna blir bestäms då i hög grad av byggnadsresonanserna och ifall dessa sammanfaller med frekvensinnehållet i den infallande vågen. Inom TVANE fann man en förstärkningsfaktor mellan mark och hus mellan 0,5 (minskade vibrationer inomhus) och 5 (fem gånger starkare vibrationer inomhus). I litteraturen finner man förstärkningar upp emot tio gånger [6, 7]. Med andra ord är byggnadens konstruktion mycket viktig för hur stor vibrationshastigheten inomhus blir. En bra byggnad 10 meter från källan kan ha lika starka vibrationer inomhus som en dålig byggnad på ett avstånd av 250 meter.

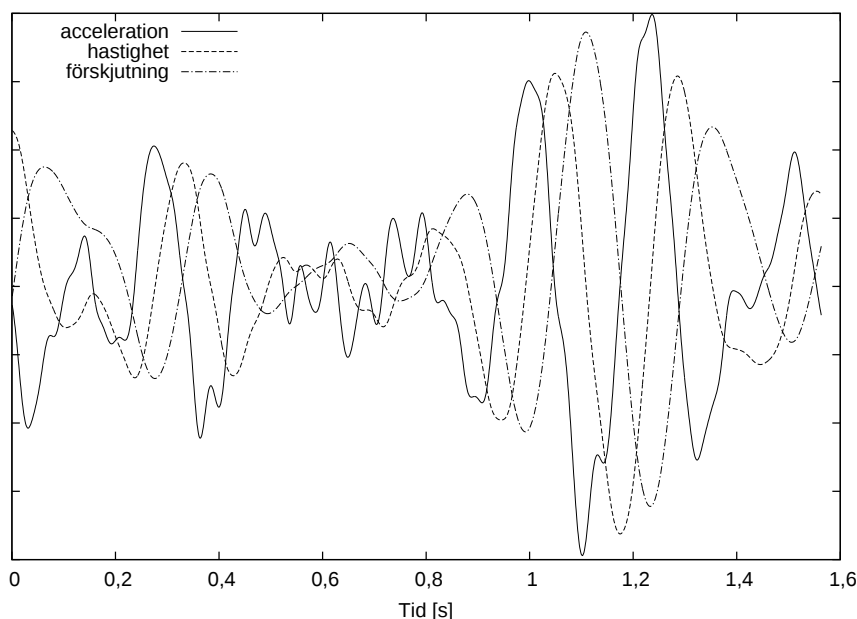


Figur 1: Skiss av utbredningsfall och byggnadsresonanser. Pilarna illustrerar vibrationshastighet vertikalt och horisontellt i respektive punkt.

2 Mät- och beräkningsmetoder

2.1 Förskjutning, hastighet och acceleration

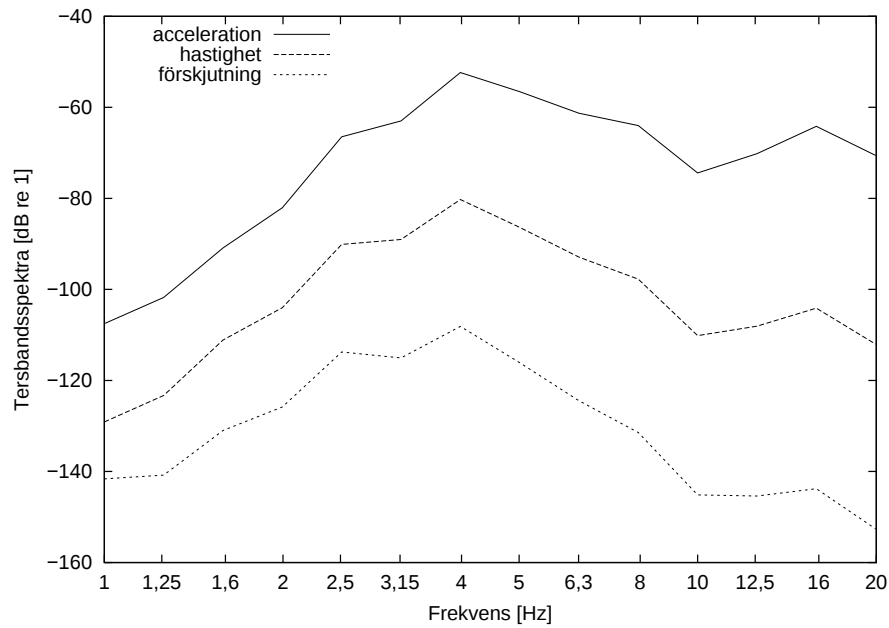
Vibrationer i mark eller golv kan beskrivas på olika sätt. Vanligast är att man för en viss punkt anger vibrationshastigheten, dvs den hastighet som markytan eller överkanten på golvet förflyttar sig med. Men man kan lika gärna ange förskjutningen eller accelerationen. En och samma vibrationsrörelse kan alltså beskrivas i termer av förskjutning, hastighet eller acceleration. I figur 2 visas ett utdrag ur en mätning inomhus från TVANE [4] omräknat till förskjutning, hastighet och acceleration. Skalan är ändrad så att signalerna får ungefär samma amplitud för att illustrera att accelerationen kommer först, vilket ger en hastighet på markytan som sedan tillslut ger en förskjutning.



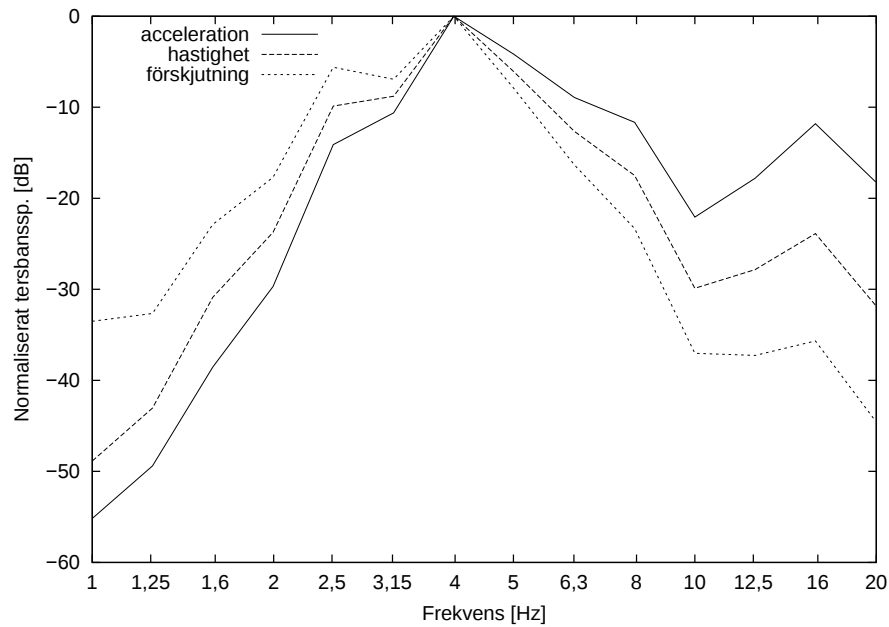
Figur 2: Exempel på vibrationssignal som förflyttning, hastighet och acceleration. Y-axelns skala är olika för de tre kurvorna för att få ungefär samma amplitud.

Ett alternativt sätt att visa skillnaden mellan förskjutning, hastighet och acceleration är att se på frekvensinnehållet i respektive signal, det vill säga ett spektrum. Spektrumet har olika lutning för förskjutning, hastighet och acceleration. I figur 3 visas hur det ser ut för vibrationssignalen i exemplet ovan. För att förtydliga skillnaden i lutning redovisas spektra normaliserade till 0 dB i figur 4.

Det finns två olika slags givare som kan användas för att mäta vibrationer nämligen geofoner och accelerometrar. Geofoner ger utslag proportionellt mot förskjutningen eller hastigheten, och accelerometrar ger utslag proportionellt mot accelerationen. I princip så har geofoner bättre egenskaper i form av känslighet och signal till brusförhållande för de allra lägsta frekvenserna, men moderna högkänsliga accelerometrar och mätinstrument med stort dynamiskt område ger oftast tillräcklig noggrannhet.

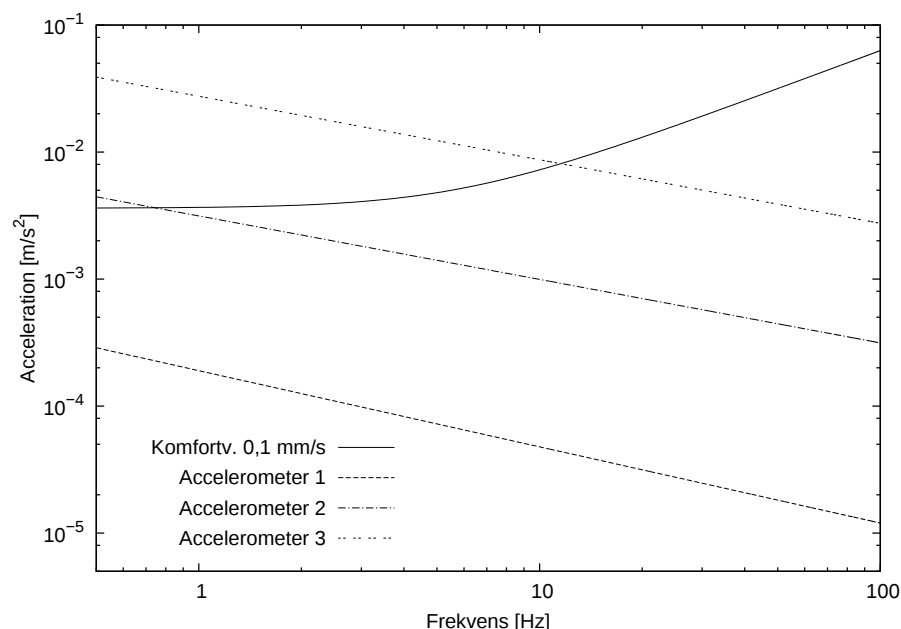


Figur 3: Torsbandsspektrum för förskjutning, hastighet och acceleration. Notera att enheten är dB relativt 1 m för förskjutning, 1 m/s för hastighet och 1 m/s² för acceleration.



Figur 4: Torsbandsspektrum för förskjutning, hastighet och acceleration. Spektrat är normaliserat till 0 dB vid tersbandet 4 Hz.

I figur 5 visas vilken acceleration som motsvaras av egenbruset i tre olika accelerometrar från olika tillverkare. Som jämförelse visas kurvan som motsvarar en komfortvägd nivå på 0,1 mm/s. För de allra lägsta frekvenserna så är egenbruset för den sämsta av accelerometrarna i denna storleksordning. Notera att bruset ökar för de lägsta frekvenserna, varför det kan bli mycket starka nivåer i termer av komfortvägd nivå om mätsystemet inte filtrerar bort frekvenser under 1 Hz (mätstandarden [8] är begränsad till frekvensområdet 1-80 Hz).



Figur 5: Typiskt brusgolv för tre accelerometrar jämfört med kurvan som motsvarar komfortvägt hastighet 0,1 mm/s.

2.2 Dos och maxvärde

När man mäter vibrationer så kan man ange mätvärdet på olika sätt. De två vanligaste angreppssätten är att karaktärisera någon form av medelvärde/energiinnehåll eller toppar/maximala värden. Samma tankesätt används vid mätning av buller och många andra storheter.

Energin i en vibrationsvåg är proportionell mot hastigheten i kvadrat, jämför med rörelseenergi hos en massa som är hastigheten i kvadrat gånger massan delat med två. När hastigheten inte är stationär, dvs den varierar med tiden, så brukar man använda rms-värdet (root-mean-square) som ett mått på medelenergin under en viss tid i en signal. Väljer man en kort tidsperiod (1 sekund) och registrerar värdet i många korta intervall så motsvarar signalen snarare effekten i vibrationsvågen, dvs energin per tidsenhet. Väljer man en lång tidsperiod (1 dygn) så motsvarar rms-värdet medelvärdet av energin i vibrationerna under perioden.

Ibland har man också mått som brukar kallas dos- eller energimått. Dessa är precis samma sak som rms-värdet men man tar summan av energin, inte medelvärdet. Betrakta ett antal fordonspassager på en plats som ger ett visst rms-värde under ett dygn. Om vi lägger till ett extra fordon kommer både dosen och rms-värdet att öka eftersom vi ersätter en period utan vibrationer med en period där vi har vibrationer. Om vi istället gör mättiden längre, till exempel 25 timmar istället för 24, utan att ändra antalet fordon, så kommer dosen att förbli oförändrad, medan rms-värdet sjunker något eftersom medelvärdet blir lägre.

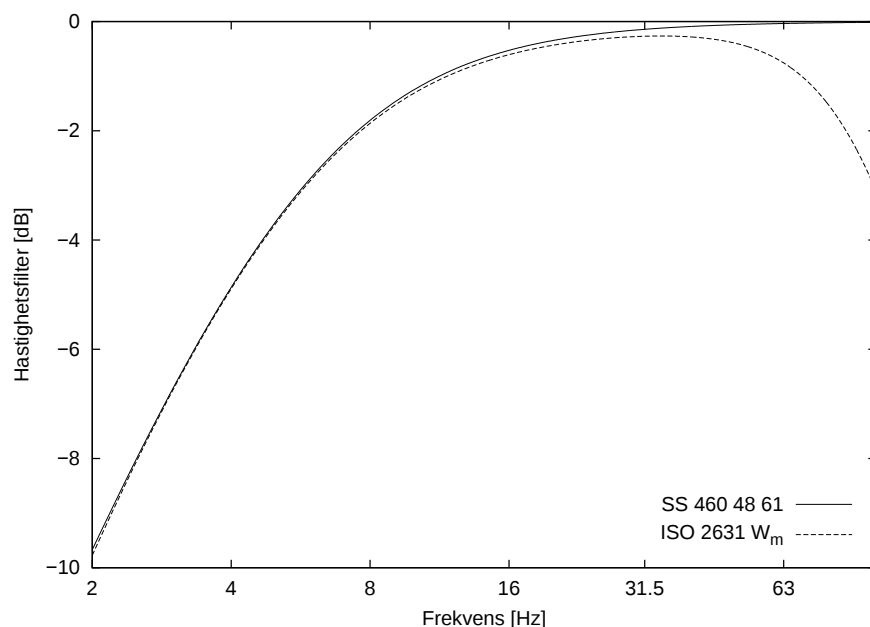
När man skall mäta maximala nivåer blir det mycket viktigt vilken tidsskala man använder. Vanligast är att man använder rms-värdet under en kort tid (ofta benämnt linjär tidsvägning), eller en exponentiell tidsvägning med en viss tidskonstant. För den exponentiella tidsvägningen så reagerar mätvärdet hastigare på ökande amplitud än på minskande.

Vissa internationella metoder använder en princip som liknar rms-värde men som inte är baserat på att ta kvadraten på signalen, utan man använder en högre exponent. I Storbritannien används Vibration Dose Value (VDV), där man istället tar signalen upphöjt till 4. Mätvärdet blir då inte proportionellt mot energin eller effekten, vad som händer är att signaler med höga toppar i förhållande till medelvärdet viktas upp och får högre mätvärde än vad man skulle få med rms-metoden.

2.3 Mätmetod i Sverige och Norge

I Sverige används mätmetoden SS 460 48 61 [8], där man utgår från en triaxiell mätning på golvet antingen i en specifik punkt eller där operatören bedömer att höga vibrationsnivåer uppstår. Mätningen vägs sedan med ett vägningsfilter och analyseras genom att ta det maximala värdet med en exponentiell tidsvägning om en sekund. Vägningskurvan är samma för alla riktningar, och nästan identisk med vägningskurvan W_m från ISO 2631-2 [9]. Skillnaden består endast i att W_m innehåller ett lågpasfilter som tar bort höga frekvenser, medan den svenska standarden endast anges att frekvenser över 80 Hz inte skall tas med, se figur 6. Syftet med vägningskurvan är att anpassa mätvärdet till människans varierande känslighet för olika vibrationsfrekvenser, se kapitel 3.2. För att indikera att man talar om vägda vibrationshastigheter använder man i Sverige ofta ordet "komfort", till exempel på följande vis: "Mätningen visade att den komfortvägda vibrationshastigheten var 0,3 mm/s".

Den Norska mätmetoden NS 8176 [10] är i stort sett identisk med den svenska, skillnaden ligger i hur man analyserar mätningar från ett antal händelser och kombinerar ihop dem till ett värde. Den norska metoden bildar en statistisk percentil som anger att 95% av händelserna har lägre maximal nivå, den svenska väljer det högsta värdet (som inte är påverkat av andra störningar). Skillnaden mellan de båda utvärderingsmetoderna kan vara stora om en enskild händelse ger mycket högre vibrationshastighet än övriga, men skillnaden är relativt liten när man har många mätningar med ungefär samma toppvärde. För mätningarna i TVANE [4] gav den svenska utvärderingsmetoden i medeltal 9% högre värden.



Figur 6: Jämförelse mellan vägningsfiltret för hastighet för SS 460 48 61 [8] och W_m ISO 2631-2 [9].

I Sverige har Trafikverket antagit nya riktlinjer sedan 1 januari 2016 [11]. För nya banor och vid väsentlig ombyggnad av banor skall den maximala komfortvägda vibrationshastigheten (SS 460 48 61) inte överskrida 0,4 mm/s mer än fem gånger per trafikmedelårsnatt (22-06), och ingen passage får överskrida 0,7 mm/s. Åtgärder övervägs även längs befintlig järnväg om vibrationshastigheten 0,7 mm/s överskrids fler än fem gånger per årsmedelnatt och om minst en av dessa störningshändelser överskrider 1,4 mm/s.

2.4 Omvandling mellan acceleration och hastighet

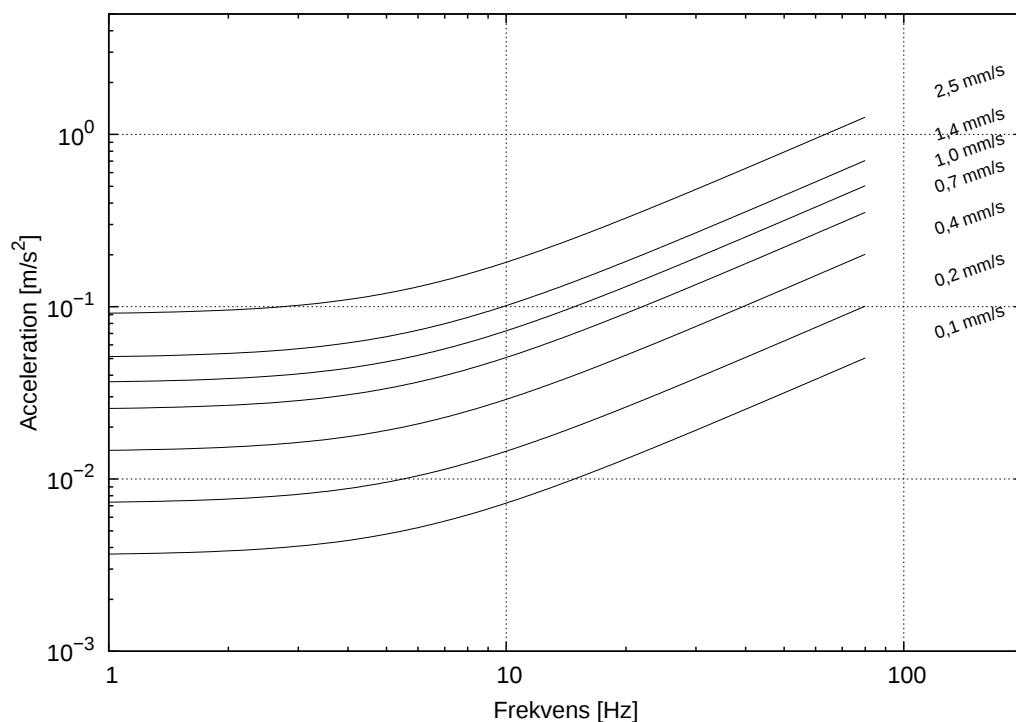
Om man gör mätningar med en accelerometer så får man en mätsignal som motsvarar accelerationen. Det kan då bli nödvändigt att omvandla signalen till hastighet för att jämföra med riktvärden eller andra mätningar. Accelerationen är derivatan med avseende på tid av hastigheten vilket kan uttryckas som

$$a = \frac{dv}{dt}, \quad (2)$$

där a är accelerationen (m/s^2) och v hastigheten (m/s) och t tiden (s). För en ren ton (sinusformad svängning) gäller då att

$$v = \frac{a}{2\pi f}, \quad (3)$$

där f är frekvensen i Hz. För en ren ton kan man därför räkna ut hastigheten från accelerationen och sedan använda viktfunktionen från SS 460 48 61 för att beräkna det komfortvägda värdet. En manuell metod för mer generella signaler finns publicerad av Naturvårdsverket [12]. I figur 7 och 8 illustreras hur man omvandlar mellan ovägd hastighet eller acceleration till komfortvägd hastighet (enligt SS 460 48 61) för rena toner, dvs signaler som domineras av en enda frekvens. Kurvorna anger godtyckligt valda maximala vibrationshastigheter som ofta används eller har använts som riktvärden i olika sammanhang.



Figur 7: Figur för omvandling av ovägd acceleration (y-axeln, m/s^2) vid viss frekvens (x-axeln, Hz) till komfortvägd hastighet enligt Naturvårdsverkets lathund [12].

Majoriteten av mätsystem som används idag kan göra omvandling mellan acceleration och hastighet direkt på tidssignalen. Det är dock viktigt att förstå att det alla professionella system har en nedre brytfrekvens och att denna måste väljas korrekt. För låg brytfrekvens ger brus i signalen, och för hög riskerar att skära bort information som skall vara med. För att uppfylla kraven i SS 460 48 61 skall man ta med frekvenser ner till 1 Hz, mer precis information kring hur man skall välja brytfrekvens och bandbegränsande filter finns i ISO 2631-2 [9].

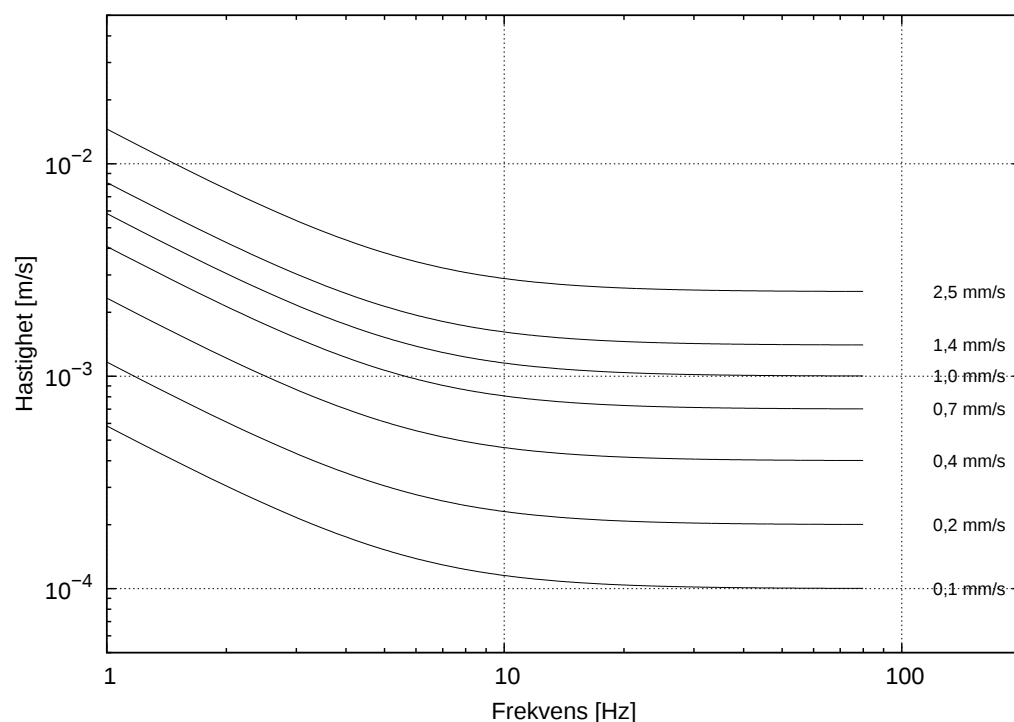
De accelerometrar som används idag ger mest problem med egenbrus vid de lägsta frekvenserna, se figur 5. Det kan vara så att en viss accelerometer ger ett bra förhållande mellan brus och signal vid till exempel 10 Hz, men inte alls fungerar vid 1 Hz. Därför bör man alltid kontrollera tillverkarens datablad för att säkerställa att systemet fungerar vid de frekvenser som man använder.

2.5 Mätmetoder och riktvärden internationellt

Metoder för mätning och utvärdering av vibrationer inomhus finns i många länder. Vissa gemensamma drag är tydliga, vibrationen mäts oftast på golvet i bostaden med en triaxiell givare, och någon typ av filter som skall motsvara människans känslighet används. I vissa fall är filterfunktionen olika för olika vibrationsriktningar, i andra samma för samtliga. I tabell 1 redovisas några mät- och utvärderingsmetoder och exempel på riktvärden som hör samman med dessa.

Den internationella standardserien ISO 2631-2 [9] är egentligen en internationellt accepterad metod, men den används inte i relation till officiella riktvärden eller rekommendationer. Delar av standarden används dock, till exempel i den svenska metoden SS 460 48 61 [8].

Att beskriva exakt hur metoderna och riktvärdena tillämpas är mycket komplext och invecklat, det skiljer en hel del mellan olika länder. Omfångsrika sammanfattningar av de flesta metoder som används, åtminstone inom EU, finns från EU-projekten CargoVibes [13] och RIVAS [14].



Figur 8: Figur för omvandling av ovägd hastighet (y-axeln, m/s) vid viss frekvens (x-axeln, Hz) till komfortvägd hastighet enligt Naturvårdsverkets lathund [12].

Tabell 1: Vibrationsmått och mätmetoder för vibrationer inomhus från trafik. Från EU-projekten CargoVibes och Rivas.

Land	Vibrationsindikator	Enhet	Tidsvägning	Frekvensvägning	Riktvärde
Sverige	Max. hastighet	mm/s	1 s	W_m	0,4 – 1,4
Norge	Max. hastighet 95 %	mm/s	1 s	W_m	0,1 – 0,6
Tyskland	KBFTr/KBFmax	enhetslös	0,125 s	KB	0,1 – 0,6
USA, Canada	Max. hast. under passage	dB	1 s	-	72 – 80
Storbritannien	VDV (24 h)	m/s ^{1,75}	(24 h)	W_b och W_d	0,1 – 1,6
Nederländerna	Max. hastighet	enhetslös	0,125 s	KB/SBR	0,1 – 0,6
Japan	Max. hastighet	dB	0,63 s	JIS C1510	-

2.6 Beräkningsmetoder

Avancerade beräkningar av hur vibrationer genereras och sprids i marken används inom universitetsvärlden, men också av kommersiella aktörer när man letar efter olja och naturgas under marken eller havsbotten. Ofta utgår man ifrån en teoretisk modell som introducerades av Biot [15, 16], som beskriver ett system av ekvationer för en porös och elastisk struktur (marken) som är helt eller delvis vattenfylld. Olika sätt att numeriskt lösa dessa ekvationer används, men inom markvibrationer från trafik är det vanligt att utgå ifrån en mark som beskrivs av olika skikt i djupled med olika egenskaper. I Sverige har det under 2000-talets gjorts doktorsavhandlingar på ämnet vid Chalmers [17, 18] och KTH [19].

Beräkningsmetoder som bygger på numeriska lösningar av Biots ekvationer är ofta resurskrävande och har lång beräkningstid. Det är också mycket svårt att förse metoden med alla indataparametrar som krävs. För varje skikt i modellen krävs upp emot 14 parametrar som beskriver olika egenskaper, och många av dessa kan inte mätas eller uppskattas på ett enkelt sätt. Hugh Hunt vid Cambridge hävdar att man troligtvis aldrig kan uppnå en bättre noggrannhet än 10 dB (en faktor 10) vid jämförelse mellan teoretiska beräkningar och mätningar där man måste beskriva markens egenskaper med några få uppskattade parametrar [20, 21].

För mer ingenjörsmässig beräkning av vibrationer så finns det flera förenklade metoder, men dock ingen officiell och allmänt accepterad som för till exempel beräkning av buller från trafik. För tågtrafik finns en metod framtagen av NGI i Oslo [22], som är modifierad i viss mån till Svenska förhållanden av SP [23]. För vägtrafik finns en liknande metod [24], baserad på mätningar ifrån London.

Metoderna ovan tar dock inte hänsyn till byggnaden, utan förutsäger endast vibrationshastigheten i mark. För svenska förhållanden så har konsultbyråer tagit fram egna beräkningsmetoder baserat på mätdata, inklusive effekten av byggnadens grundläggning osv. Dessa metoder är dock inte offentliga i sin helhet, utan kan användas endast i samarbete med respektive företag som äger metoden.

I Danmark finns en officiell beräkningsmetod för vibrationer från tågtrafik framtagen av Banedanmark i samarbete med konsultbolaget COWI [25]. Beräkningsmetoden är publicerad i sin helhet och är fritt tillgänglig. I övrigt är metoden relativt lik de ovan nämnda, och är baserad på mätdata från olika platser i Danmark. Det finns också ett webbaserat verktyg som gör beräkningar enligt metoden on-line [26]. Metoden är dock begränsad till Danska tågtyper och geologiska förhållanden.

3 Störning, sömn och hälsa

3.1 Vibrationer och sinnen

Människan uppfattar vibrationer i sin omgivning på många olika sätt. Inget enskilt organ har uppgiften att känna av vibrationer utan flera olika nervsystem är inblandade. Detta står i motsats till hur vi uppfattar ljus (syn) eller ljud (hörsel), där endast i extrema fall andra organ än de avsedda för respektive sinne används.

Vibrationer uppfattas via många av kroppens system; genom lokala deformationer av huden på olika platser i kroppen, via förflyttning av kroppsdelar relativt varandra, via hörseln (benledning) och via det vestibulära systemet (balanssystemet i örat). I vissa fall kan synen också bidra genom att vi uppmärksammas på rörelser hos kroppsdelar eller objekt i närheten, eller genom synbara effekter av resonanser i ögat. Alla dessa förnimmelser (och i vissa fall ytterligare några) samverkar och bidrar till vår uppfattning av vibrationer [27].

I huden så finns det flera typer av känselreceptorer som bland annat känner av vibrationer, se tabell 2. Vid lokal deformation i huden så genererar dessa receptorer nervsignaler som kan leda till att man förnimmel vibrationer. Men också djupare liggande receptorer som finns vid muskler och senor kan reagera och bidra till förnimmelsen.

Tabell 2: Känselreceptorer i huden som kan uppfatta vibrationer vid olika vibrationsfrekvenser.

Känselreceptor	Frekvensområde
Merkelceller	5 – 15 Hz
Meissnerkroppar	20 – 50 Hz
Pacinikroppar	60 – 400 Hz
Ruffinikroppar	100 – 500 Hz

Upplevelsen av vibration är en komplex process där alla dessa sinnesintryck tolkas och tillsammans ger förnimmelsen av vibration i hela eller delar av kroppen. Kroppens biomekanik har då stor betydelse; vår kroppsställning och kontakt med ytor i bostaden är helt avgörande för om en specifik vibration är kännbar eller störande. Exempelvis kan vi uppfatta mycket lägre vibrationsamplituder om våra fingertoppar berör en yta som vibrerar än om vibrationerna endast når kroppen via fotsulorna. Men även mer subtila skillnader än kroppsställning har stor betydelse; till exempel är en arms resonansfrekvens olika om musklerna är spända eller är avslappnade.

3.2 Tröskelvärde för vibrationsförnimmelse

Vid vilken lägsta vibrationshastighet som vi uppfattar vibrationen, tröskelvärdet, har undersökts i många studier [28, 29, 30, 31, 32, 33]. Tröskelvärdet beror starkt av vibrationernas frekvensinnehåll, och brukar redovisas som en kurva beroende av frekvensen. De flesta undersökningar är gjorda med försökspersonerna i någon form av sittande kroppsställning. Resultatet sprider rejält mellan de olika studierna, detta kan förklaras bland annat av skillnader i de presenterade signalerna, skillnader i metod, detaljer kring kroppsställning och individuella skillnader mellan försökspersonerna.

Inte bara tröskelvärdet är av intresse, utan även hur känsligheten varierar med frekvens, dvs en konturkurva som beskriver lika stark upplevelse som en funktion av frekvens (jämför hörseln Fletcher-Munson-kurvor [34]). På samma sätt som för akustiska signaler så ger detta dock endast information om upplevelsen vid signaler som endast innehåller en frekvens, dvs en ren ton. I [33] så görs försöken både med en frekvens men också med en signal sammansatt av två frekvenser. Resultatet av studien visar återigen att det är komplext att förutsäga hur vibrationer upplevs, tröskeln var i vissa fall lägre för en kombinerad signal än för en ren ton.

För olika kroppsställningar har ett antal nationella och internationella standarder tagits fram för att värdera vibrationshastigheten utifrån studierna av tröskelvärde och vibrationsupplevelse [35, 9, 36, 37]. För ISO 2631 [35, 9] så används olika vägningsfilter för att motsvara förändringen av kroppens känslighet som funktion av frekvensen. Tanken är då att en vägd signal som analyseras bättre skall överensstämma med hur människor upplever vibrationsexponeringen än om den ovägd signalen skulle ha använts. Samma metod används i den svenska standarden [8] och den norska [10]. En fördel med denna metod är att användaren av ett mätvärde endast måste minnas ett värde som anger någon gräns, till exempel 0,7 mm/s, istället för att behöva gå in i en tabell eller figur och jämföra värdet med en kurva.

3.3 Störning

Störning är det mått på vibrationseffekter som oftast används vid enkätundersökningar. Störningen definieras då som andelen av de svarande som anger att de är störda av vibrationer i hemmet över en viss nivå på en skala, vanligast är antingen en femgradig skala med beskrivningar som "ej störd" till "extremt mycket störd", eller en

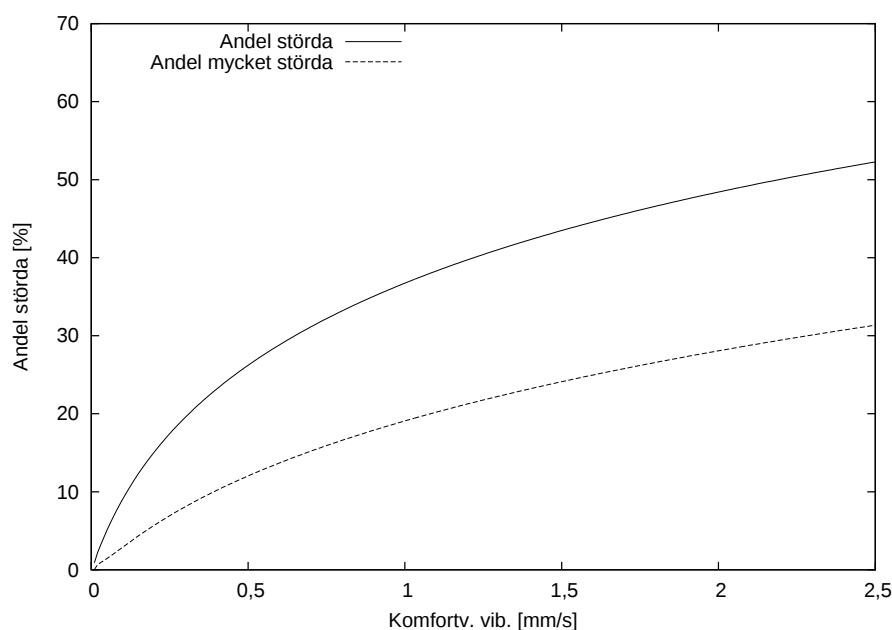
numerisk skala från 0–10 där 0 beskrivs som “märker ej” och 10 som “extremt mycket störd”. Frågorna har varit formulerade och konstruerade på lite olika sätt genom tiderna, men inspirerade av den väl specificerade störningsfrågan för trafikbuller [38], så använder nu de flesta forskare en fråga som formuleras på samma sätt.

Ett förslag till guide som mer i detalj specificerar hur man bör genomföra en enkätundersökning kring störning av markvibrationer publicerades nyligen [39]. Guiden specificerar bland annat att man bör fråga om en viss tidsperiod (de senaste 12 månaderna) och att man bör ha en fråga innan störningsfrågan som är formulerad något i stil med “Uppstår det någonsin kännbara vibrationer från tåg-/vägtrafik i bostaden?”.

Det har publicerats relativt många studier där man tagit fram en dos-responskurva där störningen i procent är en funktion av någon vibrationsindikator, se tabell 3. Inom EU-projektet CargoVibes har man gjort en metaanalys av resultatet från alla dessa studier och räknat fram en ny dos-responskurva utifrån samtliga studier. Eftersom i stort sett alla undersökningar har använt olika mått på exponeringen så har en stor del av arbetet bakom metaanalysen varit att räkna om mellan olika mått. Den resulterande funktionen presenteras i figur 9 för det svenska vibrationsmåttet, dvs maximal vägd vibrationshastighet med en exponentiell tidsvägning om en sekund.

Tabell 3: Studier som tagit fram dos-responssamband för vibration och störning.

Studie	Slutdatum enkät	Antal svar	Kommentar
[40]	1990	417	Nederländerna
[41]	1998	1503	Norge, tåg och väg
[7]	2007	1306	USA
[42]	2008	393	Sverige, TVANE-studien
[43]	2010	752	UK
[13]	2012	140	Polen och Nederländerna



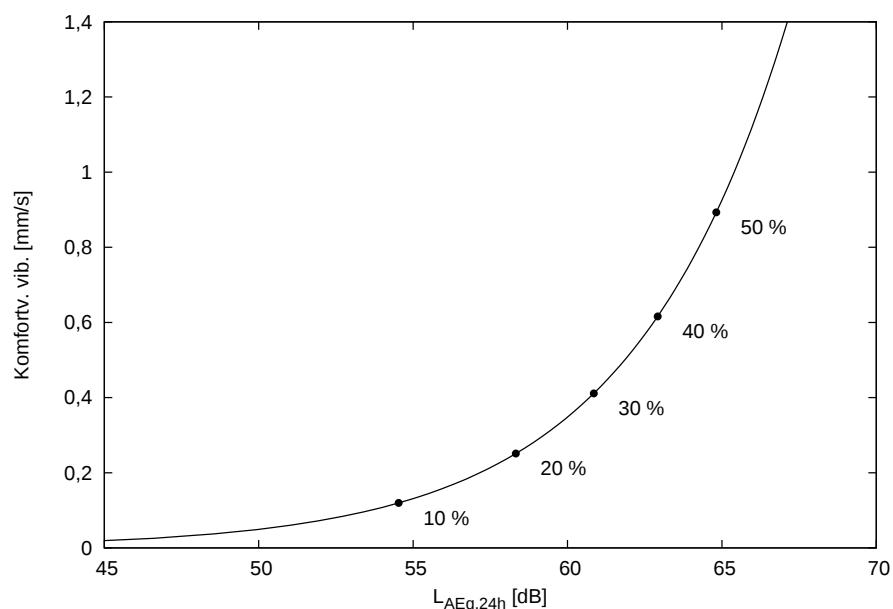
Figur 9: Störning av vibrationer inomhus, metaanalys från CargoVibes [13].

För samtliga enkätundersökningar i fält så är det kostsamt och svårt att på ett bra sätt bestämma exponeringen. I vissa fall används beräkningar, ibland mätningar och ibland en kombination av de båda.

3.4 Störning från vibrationer jämfört med buller

Forskningen på störning av trafikbuller har mycket gemensamt med vibrationssidan, men på bullersidan finns det resultat från fler och större undersökningar med bättre kontroll på exponeringen eftersom det är lättare att beräkna bullerexponering med tillräcklig noggrannhet. Det finns också officiella dos-responssamband för buller och störning inom EU för väg- och tågtrafik samt för flygbuller [44].

För att få en uppfattning om hur störande vibrationer i bostaden är kan man jämföra med den bullernivå som ger motsvarande störningsgrad. Denna metod har använts i en rapport där man jämfört störning för vibrationer och buller från tågtrafik [45]. Resultaten har också publicerats som en konferensartikel [46]. I figur 10 nedan redovisas det centrala resultatet, kurvan där störningen är lika för vibrationsexponering och bullerexponering vid fasad. Det finns dock anledning att tolka dessa resultat med viss försiktighet av två skäl. För det första är vibrationsexponeringen beräknad utifrån totalt 16 mätningar vilket ger osäkra nivåer och för det andra så saknas det data för situationer med endast vibrationsexponering (endast bullerexponering finns med i två kontrollområden).



Figur 10: Kurva för lika störning från vibrationer och buller från tågtrafik. Vibrationerna är uppskattade från stickprovsmätningar och ljudtrycksnivån är beräknad dygnsekvivalent nivå vid fasad. Baserat på enkätstudier i Kungsbacka, Alingsås, Falköping och Töreboda (TVANE). Procentsatsen är estimerad andel störda av respektive exponering.

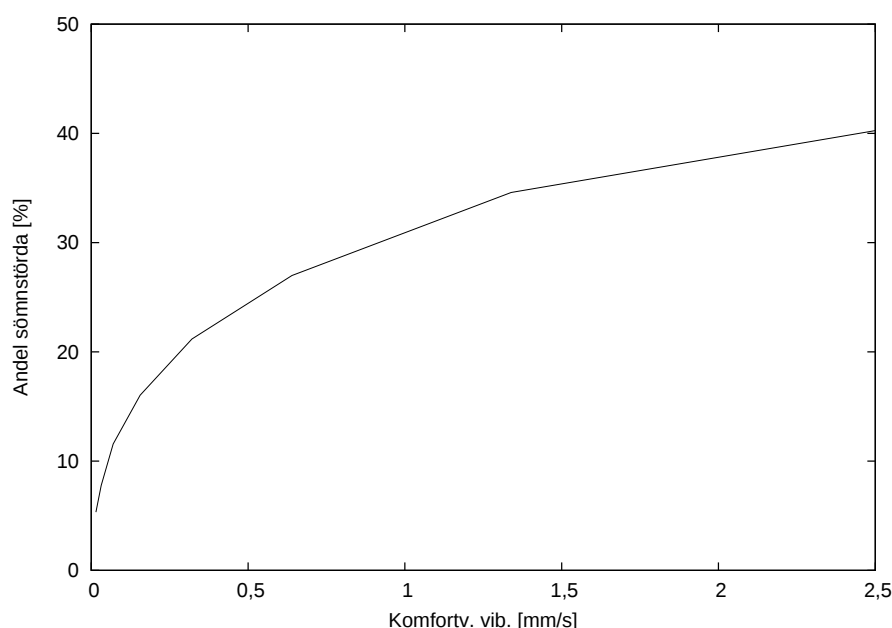
I rapporten [45] redovisas också resultat för olika fysiologiska parametrar i labförsök med buller- och vibrationsexponering. Exponeringsnivåerna är då i det högre intervallet framförallt för vibrationsexponering, men resultaten visar på ungefär samma trend som i figur 10, vilket gör denna beräkning mer trovärdig, i alla fall för de högre vibrationshastigheterna.

3.5 Sömnstörning

Vibrationer kan påverka sömnen negativt. Påverkan på sömnen kan mätas antingen med enkätfrågor på liknande sätt som för allmän störning, eller med olika typer av fysiologiska mätningar. Den enklaste formen av sömnmätning är med så kallade aktimetrar, som mäter hur mycket man rör sig under sömnen. Det bästa sättet är att använda så kallad polysomnografi, då man mäter EEG (hjärnvågor), EKG (hjärtverksamhet), andning och rörelser under sömnen. Alla dessa data tillsammans används sedan för att avgöra vilket sömndjup som försökspersonen befinner sig vid varje tidpunkt under natten. Hur mycket sömnen påverkas av buller eller vibrationer (eller någon annan exponering) avgörs sedan genom att jämföra sömnmönstret för olika nätter med olika exponering, eller genom att jämföra perioder under en och samma natt med olika exponering.

Inom det svenska forskningsprojektet TVANE finns enkätdata på sömnstörning [47]. Där används ett sömnstörningsindex som är sammanställt utifrån frågor kring svårighet att somna, uppvaknanden och sömnkvalité under natten, högre index motsvarar sämre sömn. Frågorna var inte ställda specifikt kring vibrationer, utan gällde både buller och vibrationer. Det är svårt att säga utifrån dessa resultat hur stor effekten av vibrationer är. Visserligen är sömnstörningen högre i de områden som klassats som "starka vibrationer", men det finns också skillnader i orientering av sovrum och huruvida försökspersoner sover med öppet fönster eller inte. Båda dessa faktorer har mycket stor påverkan på sömnstörningen. Korrigeras för dessa båda faktorer så är sömnstörningen grovt räknat dubbelt så hög i området med starka vibrationer om den ekvivalenta ljudnivån under natten vid fasad (L_{natt}) är 55 dB eller högre.

Inom ett projekt i Storbritannien [48] så genomfördes en stor enkätstudie där man frågade om sömnstörningar från vibrationer och endast ja/nej som tillåtna svarsalternativ. Störningskurvan presenteras i figur 11, och togs ursprungligen fram för det brittiska vibrationsmåttet VDV . Eftersom VDV är ett dosmått så är det svårt att jämföra med det svenska måttet som använder den maximala nivån, men med hjälp av omräkningsfaktorer som presenteras i CargoVibes rapport [13] så redovisas här kurvan omräknad till svenska mått.



Figur 11: Skattad sannolikhet för sömnstörning, omräknad till svenskt vibrationsmått.

Inom EU-projektet CargoVibes genomfördes ett antal sömnförsök [49] på Arbets- och miljömedicin vid Göteborgs universitet. Vid försöken användes både buller och vibrationer och effekten på olika sömnparametrar uppmätta med polysomnografi studerades. Försökspersonerna exponerades för antingen 20, 36 eller 52 simulerade tågpassager med en maximal komfortvägd vibrationshastighet om 0,4, 0,7 eller 1,4 mm/s. Resultaten visar högre sannolikhet för uppvaknanden, större påverkan på hjärtverksamhet och mer fragmenterad sömn för högre vibrationshastighet. Även subjektiva parametrar som sömnkvalité visar en tydlig effekt.

En studie med i stort sett samma upplägg men betydligt lägre vibrationshastigheter genomfördes senare på uppdrag av Trafikverket [50]. Syftet var att se vid vilken lägsta vibrationshastighet som man kunde se några fysiologiska effekter under sömnen. Analysen baserades på när man kunde observera en statistiskt signifikant ökning av sannolikheten att en viss effekt skulle inträffa i början på en vibrationshändelse (simulerad tågpassage), resultaten presenteras i tabell 4.

Tabell 4: Tröskelvärde (maximal vibrationshastighet) för fysiologisk respons mätt med polysomnografi under sömn. Vibrationshastigheten är vägd enligt SS 460 48 61.

Effekt	Tröskelvärde [mm/s]
Förändring i hjärtrytm	0,3
Uppvaknande (EEG)	0,4
Förändring i sömnstadie och fragmenterad sömn	0,4

3.6 Vibrationer och hälsa

För buller från vägtrafik så är det nu välkänt att höga nivåer vid bostadens fasad kan ge negativa hälsoeffekter. I stora epidemiologiska studier har höga bullernivåer vid bostaden kunnat kopplas till ökad risk för högt blodtryck och kardiovaskulär sjukdom. För en sammanfattning av publicerade resultat fram till 2014 se Basner [51].

På samma sätt skulle man kunna tänka sig att studera effekterna av vibrationer i bostaden. Några sådana studier finns dock inte publicerade, vilket bland annat beror på att de finns många färre vibrationsexponerade i samhället än det finns bullerexponerade. Det är också mycket svårt att beräkna vibrationsexponeringen inomhus för stora grupper av människor. Det startades dock nyligen ett projekt på Arbets- och miljömedicin i Göteborg där man hoppas kunna se resultat genom att studera personer som bor i områden där Trafikverket har genomfört många vibrationsmätningar. Det är dock tveksamt om man kan nå upp till det stora antal personer som behövs för att studera denna typ av eventuella samband. Studien kommer att kombineras med enkäter kring störning och sömnstörning av vibrationer från tågtrafik, vilket kommer att ge nya och mer välgrundade dos-responssamband.

4 Åtgärder

Att åtgärda vibrationer inomhus är komplicerat och ofta kostsamt. Utifrån illustrationen i figur 1 så är det tydligt att man kan minska vibrationerna på tre sätt, att minska hur mycket vibrationer som genereras, påverka utbredningen i marken eller påverka resonanserna i byggnaden. Det sistnämnda används dock mycket sällan i praktiken, det är svårt att ändra till exempel ett golvbjälklag i en befintlig byggnad. Vid nybyggnation finns dock goda möjligheter att välja konstruktionen så att problemen minimeras, men det förutsätter att problemet identifieras tidigt i processen när man fortfarande kan påverka detaljer i konstruktionen.

Inom EU:s sjunde ramprogram för finansiering av forskning så genomfördes två projekt med fokus på vibrationer från tågtrafik, CargoVibes [52] och RIVAS [53]. Inom båda projekten genomfördes fältmätningar och beräkningar av vibrationer för olika situationer. Projekten var relativt lika varandra, med den skillnaden att RIVAS var något mer fokuserat på fordonen i sig.

4.1 Åtgärder vid källan

Åtgärder vid källan inkluderar åtgärder på fordonet eller vägen/banan. För järnväg är rälen, befästningar, mellanlägg, slipers och ballast de viktigaste parametrarna, och för vägen är det vägytans ojämnheter och eventuella spår eller kanter i form av brunnslöck och annat. Genom att minska krafterna som uppstår när fordonet rullar utmed vägen/banan, eller genom att minska på den vibrationsenergi som överförs från vägen/banan ned till marken, så minskar man vibrationsexponeringen vid den mottagande byggnaden.

För järnvägsfordon så är de viktigaste parametrarna hjulens orundhet och den ofjädrade massan [54]. Genom att påverka dessa faktorer kan man minska krafterna som uppstår, men tyvärr endast vid frekvenser från ungefär 20 Hz och uppåt. Detta är alltså i första hand relevant för stomljud och ger mycket liten effekt för vibrationer vid det typiska frekvensområdet 5 – 15 Hz.

Inom RIVAS undersöktes också effekten av att införa flexibelt material under sliparna, så kallade “under sleeper pads” [55]. Tyvärr gav inte heller detta någon större effekt för frekvenser under 50 Hz. Däremot indikerar mätningar inom CargoVibes att det kan ge en viss förbättring av vibrationer i närheten av växlar om de sliprar som ingår i växeln utrustas [56].

För vägfordon så är hastigheten och den ofjädrade massan de viktigaste egenskaperna, men också en olycklig matchning mellan fordonens resonans i fjädringen och markens egenskaper kan ge starka vibrationer [24].

4.2 Åtgärder i utbredningsvägen

Åtgärder i utbredningsvägen syftar till att minska vibrationerna i den mottagande byggnaden genom att minska överföringen av vibrationer från källan via marken. Inom både RIVAS och CargoVibes testades olika typer av avskärmningar där man försöker hindra utbredningen av vågor i marken på ungefär samma sätt som en bullerskärm hindrar utbredning av ljud i luften. Inom CargoVibes undersöktes till exempel en betongkonstruktion som grävdes ned mellan källan och mottagaren. Vibrationshastigheten vid mottagaren minskade då med 3 – 5 dB vid 10 Hz (30–45% minskning för vibrationshastigheten i mm/s). Minskningen blev ännu större, upp emot 10 dB, om ett mjukt material användes på ytan av betongskärmen. Liknande resultat presenteras i RIVAS [57]. Det är skillnaden mellan markens och det mjuka materialets styvhet som är det viktiga. Material som är lätta men inte mjuka i förhållande till marken, som till exempel polystyren, är inte lika effektiva som mer elastiska material.

Inom RIVAS [57] gjordes teoretiska beräkningar på en åtgärd i form av ett tungt material som placerades uppe på marken mellan källan och mottagaren, till exempel en mur av sten (gabionmur). Beräkningarna visade på lovande resultat, men inga fullskaliga mätningar genomfördes så det är osäkert om man kan få god reduktion i verkliga fall.

Inom RIVAS [57] gjordes också mätningar och beräkningar på effekten av att slå ned en spont (stålbalkar av U-form) mellan källa och mottagare. De teoretiska beräkningarna visade på 2 – 5 dB (20–45%) minskning av vibrationshastigheten, och mätningarna i fält gav en minskning på mellan 3 och 10 dB [58]. Beräkningarna genomfördes också för fallet att göra en skärm av injicerade kalkpelare med ännu bättre resultat, 4 – 6 dB (40–50%), men där saknas verifierande mätningar i fält.

4.3 Åtgärder i byggnaden

Den viktigaste faktorn för att minska vibrationer i en byggnad är grundläggningen. Kan man påla eller på annat sätt förstyya grundläggningen så minskar problemen radikalt. Det är dock inte alltid möjligt att göra i efterhand när byggnaden redan finns på plats.

Man kan också påverka resonanserna i en byggnad. Ett sätt är att tillföra dämpning på något sätt så att resonanserna inte blir lika uttalade. Så kallade dämpkassetter används ofta i fartyg eller på offshore-plattformar på detta sätt, men metoden har även använts för betongbjälklag [24]. Teoretiskt kan man även flytta resonanser via förstärkningar eller genom att tillföra eller ta bort massa, men det används sällan i praktiken eftersom det handlar om omfattande ändringar i byggnadens konstruktion som naturligtvis påverkar hållfasthet och andra grundläggande egenskaper.

5 Uppskattning av antalet utsatta för vibrationer från tågtrafik

Att uppskatta antalet människor i Sverige som utsätts för vibrationer från tågtrafik är mycket svårt. Dels så är det svårt att förutsäga exakt vid vilka geologiska förutsättningar som vibrationerna blir olika starka, men framförallt är det mycket svårt att förutsäga om en viss byggnad kommer att förstärka eller dämpa markvibrationerna. Som diskuterats i avsnitt 1.1 så kan förstärkningen bli fem gånger eller ännu högre om byggnadens resonanser sammanfaller med en gynnsam utbredning och stark källa vid just den frekvensen.

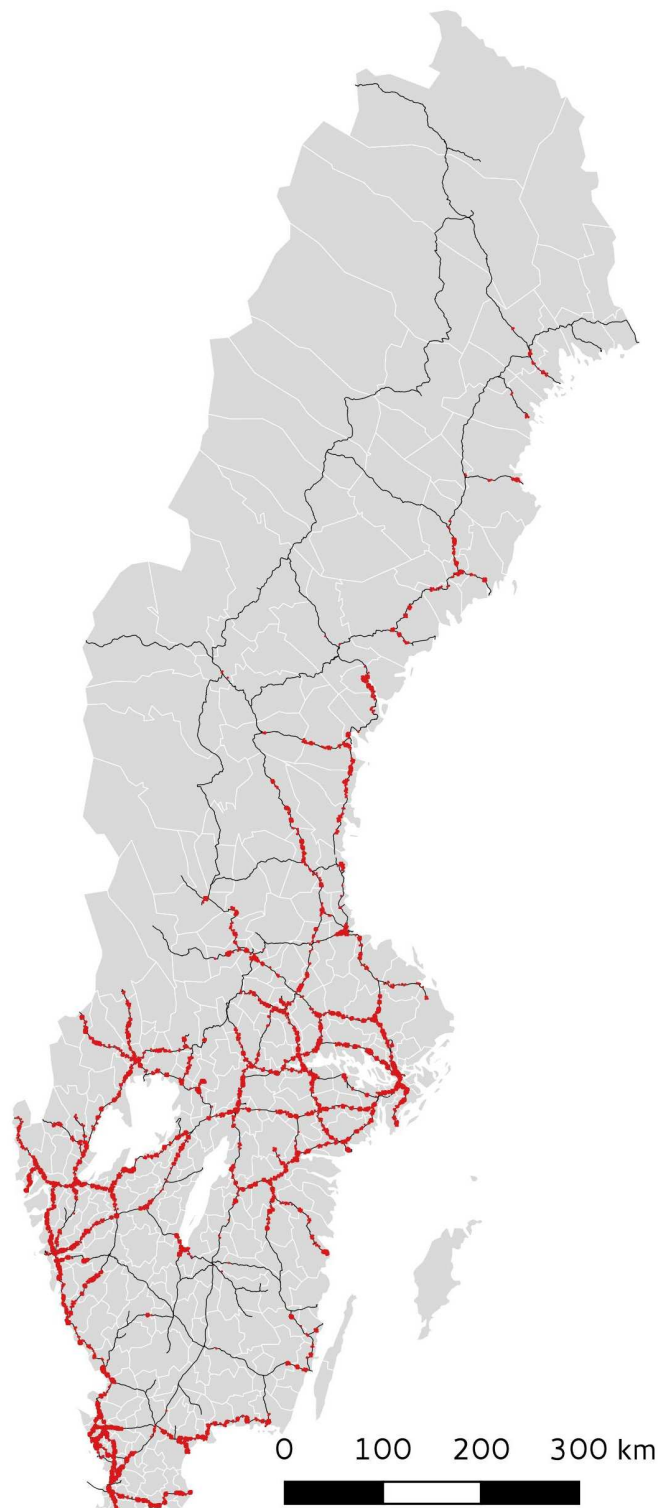
Trafikverket inledde under 2015 ett arbete med att sammanställa samtliga mätningar som gjorts på deras uppdrag. Genom att analysera dessa mätningar tillsammans med geologiska data från SGU, fastighetsdata från Lantmäteriet har man kunnat uppskatta antalet exponerade i Sverige [59]. Beräkningarna utgår ifrån alla fastigheter inom 200 m från Trafikverkets banor (ej tunnelbana, spårväg, museispår och andra banor som inte förvaltas av Trafikverket). Dessa har försetts med en jordart från SGU. Jordarten under järnvägen vid den punkt som ligger närmast fastigheten har också hämtats från SGU.

Utbredningen av vibrationer från järnvägen skattades med samband som tagits fram för sex olika markklasser. En övre gräns för vibrationshastigheten v i marken under fastigheten kan då beräknas enligt ekvation (1). Avståndsberoendet k varierar mellan 0,83 och 1,07 för de olika markklasserna. För att beräkna antalet boende användes ett schablontal på 2,7 boende per fastighet [60]. Antalet skattade boende för olika vibrationshastighet redovisas i tabell 5. Fördelningen över Sverige illustreras i figur 12.

Tabell 5: Uppskattat antal invånare som exponeras över viss maximal komfortvägd vibrationshastighet.

Vibrationshastighet	Estimerat antal boende
$\geq 0,4$ mm/s	16 300
$\geq 0,7$ mm/s	8 100
$\geq 1,0$ mm/s	5 000
$\geq 1,4$ mm/s	3 100

Osäkerheterna i denna grova skattning är stora. Dels saknas geologisk information på större djup än de ca 0,5 m som SGU normal undersöker, och dels så har vi bara denna förenklade information för två punkter, direkt under fastigheten och direkt under den punkt på järnvägen som ligger närmast fastigheten. Skattningen utgår också från förenklade samband. Arbete med att förbättra dessa skattningar pågår på Trafikverket.



Figur 12: Karta över Sverige som visar områden med risk för vibrationer, röd färg indikerar att nivåer över 0,7 mm/s kan förekomma.

Referenser

- [1] Watts, G. och Krylov, V. Ground-borne vibration generated by vehicles crossing road humps and speed control cushions. *Applied Acoustics*, 59(3):221–236, 2000.
- [2] Lak, M. A., Degrande, G. och Lombaert, G. The effect of road unevenness on the dynamic vehicle response and ground-borne vibrations due to road traffic. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(10):1357–1377, 2011.
- [3] Hall, L. och Wersäll, C. Markvibrationer. Informationsskrift 1:2012, Svenska Geotekniska Föreningen SGF, 2012.
- [4] Ögren, M. och Jerson, T. Mätning och beräkning av buller och vibrationer från tågtrafik inom tvane-projektet. VTI Notat 2-2011, VTI Statens väg- och transportforskningsinstitut, Linköping, 2011.
- [5] Auersch, L. Wave propagation in layered soils: Theoretical solution in wavenumber domain and experimental results of hammer and railway traffic excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 173(2):233–264, 1994.
- [6] Vanhonacker, P. Attenuation of ground-borne vibration affecting residents near railway lines. CargoVibes public deliverable D2.5, 2013.
- [7] Zapfe, J., Saurenman, H. och Fidell, S. Ground-borne noise and vibration in buildings caused by rail transit. TCRP Final Report D-12, Transportation research board of the national academies, 2009.
- [8] SS 460 48 61 vibrationer och stöt - mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader. SIS Förlag AB, 1992.
- [9] International Organization for Standardization. ISO 2631-2:2003 Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole-body vibration - part 2: vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), 2003.
- [10] NS 8176 vibrasjoner og støy - måling i bygninger av vibrasjoner fra landbasert samferdsel og veiledning for bedømmelse av virkning på mennesker. Standard Norge, 2005.
- [11] Trafikverket. Buller och vibrationer från trafik på väg och järnväg. Riktlinje, Trafikverket, 2014.
- [12] Naturvårdsverket. Lathund för omvandling mellan olika vibrationsstorheter. Bilaga 1, Naturvårdsverket, 1993.
- [13] Woodcock, J., Peris, E., Moorhouse, A. T. och Waddington, D. C. Guidance document for the evaluation of railway vibration. CargoVibes public deliverable D1.5, 2013.
- [14] Elias, P. och Villot, M. Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration. RIVAS Rapport D1.4, 2013.
- [15] Biot, M. A. General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of applied physics*, 12(2):155–164, 1941.
- [16] Biot, M. A. *Dynamics of viscoelastic anisotropic media*. Purdue University, 1955.
- [17] Jonsson, J. O. *On Ground and Structural Vibrations Related to Railway Traffic*. Publ. - Chalmers tekniska högskola, Institutionen för konstruktionsteknik, Stål- och träbyggnad. S, no: 00:6Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola. Ny serie, no: 1545. Institutionen för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola,. ISBN 91-7197-920-4, 2000.
- [18] Karlström, A. *On the Modelling of Train Induced Ground Vibrations with Analytical Methods*. Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola. Ny serie, no: 2500. Institutionen för tillämpad mekanik, Dynamik, Chalmers tekniska högskola,. ISBN 91-7291-818-7, 2006. 132.
- [19] Bahrekazemi, M. Train-induced ground vibration and its prediction. 2004.
- [20] Hunt, H. Prediction accuracy can't be better than 10db. Hemsida. <http://www2.eng.cam.ac.uk/hemh/PiP10dBaccuracy.pps>.
- [21] Jones, S. och Hunt, H. Predicting surface vibration from underground railways through inhomogeneous soil. *Journal of Sound and Vibration*, 331(9):2055–2069, 2012.

- [22] Madshus, C. och Kaynia, A. High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3):689–701, 2000.
- [23] al Suhairy, S. Prediction of ground vibration from railways. Examensarbete, Borås, Sweden, 2000. ISBN 91-7848-823-0.
- [24] Holmberg, L. Trafikalstrade vibrationer i bostäder i stockholm. Teknisk rapport TR 10027386, WSP Akustik, 2003.
- [25] Banedanmark. New vibration model. Technical report A026780-006.1, COWI, Lyngby, 2015.
- [26] Banedanmark. Vibrationsmodellen. Webbaserad beräkningsmetod. <https://webgis.gis-hotel.dk/vibmodel>.
- [27] Trollé, A., Marquis-Favre, C. och Parizet, É. Perception and annoyance due to vibrations in dwellings generated from ground transportation: A review. *Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 34(4):413–458, 2015.
- [28] Miwa, T. Evaluation methods for vibration effect. Part 1. Measurements of threshold and equal sensation contours of whole body for vertical and horizontal vibrations. *Industrial Health*, 5:183–205, 1967.
- [29] Griffin, M. J. och Whitham, E. M. Time dependency of whole-body vibration discomfort. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5):1522–1523, 1980.
- [30] Parsons, K. C. och Griffin, M. J. Whole-body vibration perception thresholds. *Journal of Sound and Vibration*, 121:237–258, 1988.
- [31] Bellmann, M. A. *Perception of whole-body vibrations: from basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles*. Doktorsavhandling, University of Oldenburg, 2002.
- [32] Morioka, M. och Griffin, M. J. Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 298(3):755–772, december 2006.
- [33] Ljunggren, F., Wang, J. och Ågren, A. Human vibration perception from single-and dual-frequency components. *Journal of Sound and Vibration*, 300(1):13–24, 2007.
- [34] International Organization for Standardization. ISO 226:2003 Acoustics – Normal equal-loudness-level contours, 2003.
- [35] International Organization for Standardization. ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole-body vibration - part 1: General requirements, 1997.
- [36] British Standards Institution. BS 6841:1987 Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock, 1987.
- [37] DIN. DIN 4150-2 Structural vibration: Human exposure to vibration in buildings. Teknisk rapport, 1999.
- [38] ISO. ISO/TS 15666 acoustics – assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys. Teknisk rapport, ISO, 2003.
- [39] Whittle, N., Peris, E., Condie, J., Woodcock, J., Brown, P., Moorhouse, A. T., Waddington, D. C. och Steele, A. Development of a social survey for the study of vibration annoyance in residential environments: good practice guidance. *Applied Acoustics*, 87:83–93, januari 2015.
- [40] Passchier-Vermeer, W. och Zeichart, K. *Vibrations in the living environment: Relationships between vibration annoyance and vibration metrics*. Nummer 98.030. TNO, 1998.
- [41] Klæboe, R., Turunen-Rise, I. H., Harvik, L. och Madshus, C. Vibration in dwellings from road and rail traffic — part II: exposure-effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models. *Applied Acoustics*, 64:89–109, 2003.
- [42] Gidlöf-Gunnarsson, A., Ögren, M., Jerson, T. och Öhrström, E. Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and building situational factors. *Noise & health*, 14(59):190–201, januari 2012.

- [43] Waddington, D. C., Woodcock, J., Peris, E., Condie, J., Sica, G., Moorhouse, A. T. och Steele, A. Human response to vibration in residential environments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1):182–193, 2014.
- [44] European Communities. Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance. Teknisk rapport, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2002. ISBN 92-894-3894-0.
- [45] Smith, M., Ögren, M. och Persson Waye, K. Jämförelse av fysiologisk respons vid exponering för buller eller vibrationer. Rapport 2:2014, Arbets- och miljömedicin, Göteborg, 2014.
- [46] Ögren, M., Smith, M. och Persson Waye, K. Comparison of annoyance from railway noise and railway vibration. I: *proceedings of EuroNoise*, Maastricht, juni 2015.
- [47] Öhrström, E., Gidlöf-Gunnarsson, A., Ögren, M. och Jerson, T. Slutrapport forskningsprogrammet tvane: Effekter av buller och vibrationer från tåg- och vägtrafik - tågbonus, skillnader och samverkan mellan tåg- och vägtrafik. AMM Rapport 1:2011, Arbets- och miljömedicin, Göteborg, 2011.
- [48] Waddington, D., Moorhouse, A., Steele, A., Woodcock, J., Condie, J., Peris, E., Sica, G. och Koziel, Z. NANR209: Human response to vibration in residential environments, 2011.
- [49] Persson Waye, K., Smith, M., Croy, I., Hammar, O. och Ögren, M. Report of the results of the sleep disturbance study, version 2. CargoVibes report D1.4, 2013.
- [50] Smith, M., Ögren, M. och Persson Waye, K. Physiological reaction thresholds to vibration during sleep. Rapport 2:2015, Arbets- och miljömedicin, Göteborg, 2015.
- [51] Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S. och Stansfeld, S. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet*, 383:1325–1332, april 2014.
- [52] Cargovibes - Attenuation of ground-borne vibration affecting residents near freight railway lines. hemsida. <http://www.cargovibes.eu/>.
- [53] Rivas - Railway induced vibration abatement solutions. hemsida. <http://www.rivas-project.eu/>.
- [54] Nielsen, J., Mirza, A., Cervello, S., Frid, A., Müller, R., Nelain, B. och Ruest, P. Train induced ground vibration – optimised rolling stock mitigation measures and their parameters. RIVAS Rapport D5.4, 2013.
- [55] Faure, B. och Bongini, E. Results of the parameter studies and prioritization for prototype construction for ballasted track. RIVAS Rapport D3.2, 2012.
- [56] CargoVibes. Cargovibes final report - attenuation of ground-borne vibration affecting residents near railway lines. Cargovibes public deliverable, 2014.
- [57] Villot, M. och Bailhache, S. Evaluating the mitigation measures developed in wp2-5 in terms of decrease of exposure and annoyance. RIVAS Rapport D1.9, 2013.
- [58] Dijckmans, A., Ekblad, A., Smekal, A., Degrande, G. och Lombaert, G. Efficacy of a sheet pile wall as a wave barrier for railway induced ground vibration. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84:55–69, 2016.
- [59] Arnesson, M. Residential vibration exposure from railway traffic in sweden. Examensarbete, Chalmers, 2016.
- [60] SCB. Hushållens boende. Statistiska centralbyrån - Statistikdatabasen, 2015. <http://www.scb.se/he0111>.