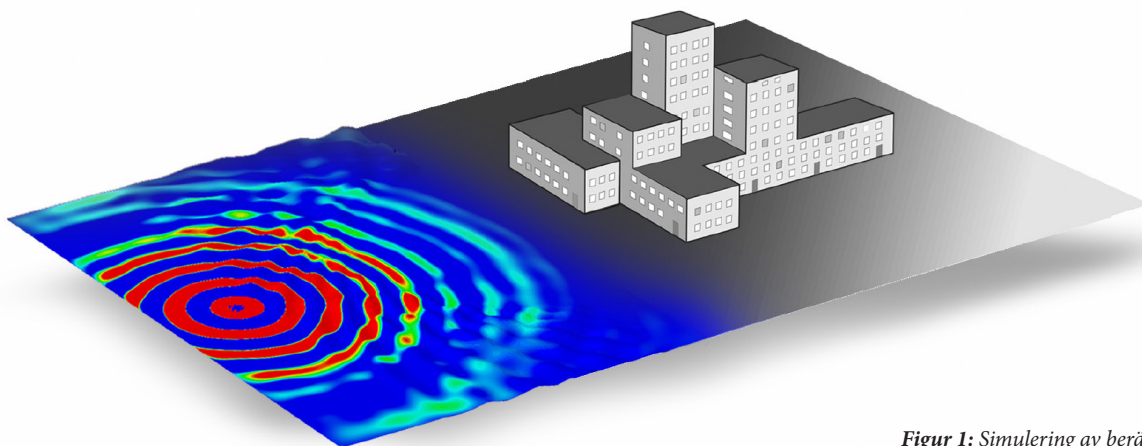


Prediktion av vibrationer för hållbara förtätade städer



Figur 1: Simulering av beräknade markvågor.

Vibrationer och stömljud i byggnader orsakade av trafik, bygg- och anläggningsarbeten riskerar att bli ett växande problem i de allt mer förtätade städerna. Att i tidiga skeden i byggprocessen kunna beräkna och förutsäga buller och vibrationer kan förhindra att problem och klagomål uppstår i de färdiga byggnaderna. En ökande befolkning, och dessutom en ökad andel som bor i städer, kräver förtätning av våra städer där tidigare onyttjad mark bebyggs och vertikal påbyggnad sker på befintliga hus. Kollektivtrafiken nyttjas allt mer vilket i vissa städer ger upphov till nya sträckningar för lokaltåg och spårväg. Man har också börjat att lägga trafikerade vägar i tunnlar för att minska trafikbuller och att marken ovan kan exploateras. Med förtätade städer kan transporttekniken utvecklas med fokus på kollektivtrafik då fler bostäder och kontor byggs nära nav i kollektivtrafiknätet. Samtidigt går utvecklingen, av kostnads- och miljömässiga skäl, mot att bygga hus av lättare stomme med längre spännvidder. Sammantaget ger dessa faktorer att risken för höga vibrations- och stömljudsnivåer i byggnader ökar i förtätade städer. Byggbranschen och samhället kommer att möta större utmaningar för att hantera vibrationer och stömljud. För att kunna utveckla hållbara städer krävs att hälsa och trivsel är i fokus. Nya metoder och strategier behöver utvecklas för att tidigt i projekteringen kunna bedöma risker och nivåer så att störande vibrationer och stömljud kan minimeras i framförallt bostäder.



Peter Persson
bitr. Universitetslektor, Byggnadsmekanik,
LTH / Vibrationsspecialist, Sweco AB



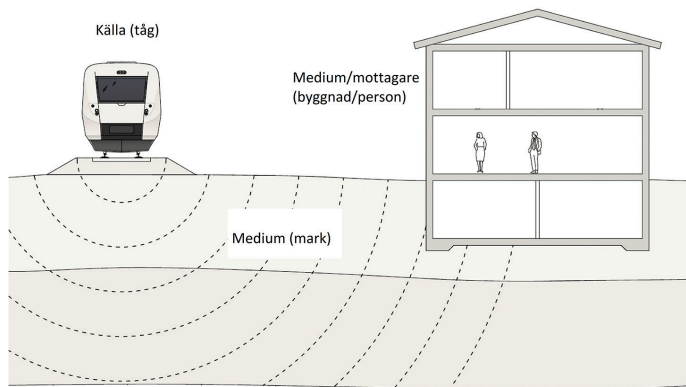
Kent Persson
Professor, Byggnadsmekanik, LTH

Syftet med denna artikel är att beskriva problemet och visa på möjligheterna för prediktion av vibrationer och stömljud i byggnader i förtätade städer. I artikeln diskuterar vi främst ett exempel med husbyggnader vid närliggande spårtrafik men det kan generaliseras till att gälla för vägtrafik men även vibrationer från närliggande byggarbetsplatser som även det blir ett större problem vid förtätning.

Vibrationer i förtätade städer

För att beskriva vibrationer som skapas från spår- eller vägtrafik kan man dela upp processen i tre delar: källa, transmissionsmedium och mottagare. *Figur 2* visar en illustrativ bild av transmissionsprocessen. Vid källan skapas vibrationerna som fortplantar sig genom transmissionsmediet och slutligen når mottagaren. Vibrationskraven sätts ofta vid mottagaren som kan vara människor, känslig utrustning eller byggnadsdelar. För att prediktera vibrationerna vid mottagaren krävs att man kan beskriva alla delar i kedjan med modeller. Nya problem med vibrationer från spårtrafik sker antingen genom nybyggnation av spår vid befintlig bebyggelse eller genom nybyggnation av hus nära befintliga spår. Med hänvisning till *figur 2* handlar det alltså om en ny källa eller en ny mottagare. Vid ny husbyggnad (mottagare) har man möjlighet att mäta vibrationsnivåerna vid den plats där byggnaden ska stå. Svårigheten ligger då i att prediktera hur nivåerna kommer att förändras, det vill säga minskas eller förstärkas, när de transmitterar genom byggnaden. I fallet med ny spårväg (källa) ligger svårigheten främst i att uppskatta vilken dynamisk last den nya källan ger upphov till.

Vid källan produceras olika typer av vibrationsvågor i marken. De markvågor som vanligtvis ger störst bidrag till vibrationsnivåerna i en byggnad är de



Figur 2: Transmissionsprocessen från källa (tåg) genom mediet (mark) till mottagaren (byggnad och boende).

symptom. Hur stor inverkan vibrationer har på människor beror på vibrationsnivån, frekvensinnehållet och varaktigheten. Andra faktorer är ålder och förväntan på vibrationsnivån. Vibrationer kan även generera hörbart ljud, så kallade stomljud. Då man både hör och känner vibrationer upplevs det som extra obehagligt. Banverket (nuvarande Trafikverket) har tillsammans med Naturvårdsverket tagit fram riktvärden för vibrationer i byggnader orsakade av spårbunden trafik [1]. Riktvärdena används ofta som krav, även vid andra trafikällor. (3) Det är inte bara bostäder som behöver kontrolleras mot vibrationsnivåer utan även byggnader med vibrationskänslig utrustning såsom byggnader med medicinsk utrustning eller forskningsanläggningar. I dessa fall specificeras ofta kravnivåer med så kallade VC-kurvor (Vibration Criteria) för att ange tillåten vibrationsnivå [2].

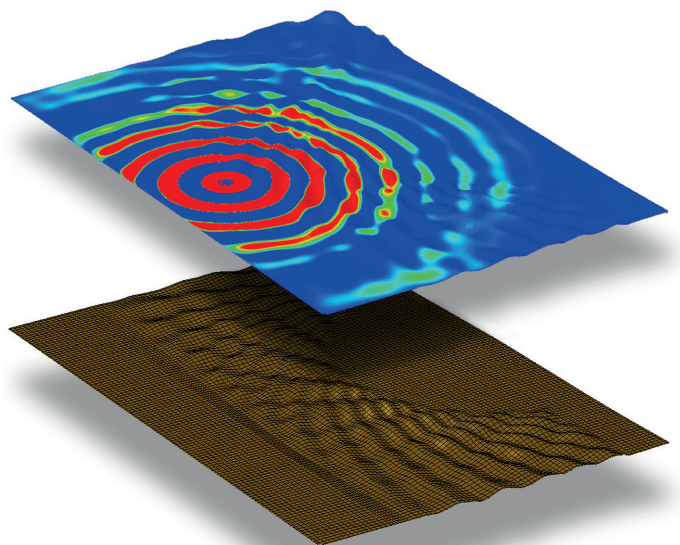
Vibrationsreducering

Sedan 1960-talet har ett flertal olika sätt att reducera trafikinducerade vibrationer utvecklats. Det finns olika reduktionsåtgärder som kan tillämpas på källa, medium eller mottagare. Vid källan kan man exempelvis förstärka jorden under spåret eller placera dämpande mattor under spåret. I mediet kan man använda sig av olika vågbarriärer, exempelvis diken [3] eller att forma markytan i mönster av kullar och dalar [4]. Se figur 3 för ett exempel på simulering av markvibrationer av det vågformade landskapet runt MAX IV. Vid byggnaden kan man exempelvis stabilisera jorden under en platta-på-mark [5] eller utforma stommen och välja material med syfte att minska vibrationsnivåer [6].

vilken reduceringsmetod som är mest lämplig ur ekonomisk och teknisk synvinkel beror exempelvis på om det är nybyggnad av spår eller nyproduktion av bostäder. Metodernas effektivitet är beroende på lastens frekvensinnehåll, markens egenskaper och byggnadens utformning. För att välja en lämplig reduktionsåtgärd behöver man i ett tidigt skede i projekteringen kunna prediktera vibrationsnivåerna och förstå de vibrationsfenomen som uppträder för att, om åtgärder behövs, kunna välja den mest ekonomiska lösningen för att klara uppsatta vibrationskrav.

Strategi för prediktering

För att kunna bygga hållbara förtätade städer är det vår uppfattning att en bättre



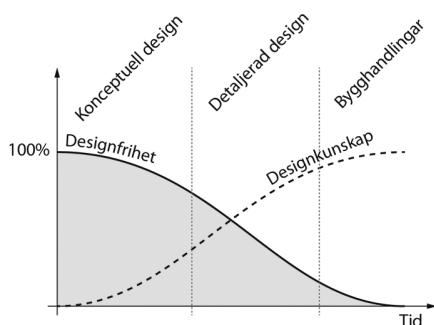
Figur 3: Undre figur: Finita elementindelning av markyta med mönster av kullar och dalar (ca ± 4 m) som bildar ett vågformat landskap. Övre figur: Visualisering av markytans rörelser.

som fortplantas vid markytan och benämns ytvågor eller Rayleigh-vågor som, förenklat, utbreder sig likt vågor på vatten. Se figur 1 som visar ett exempel på simulering av markvågor. En dynamisk last har en storlek som varierar med dess frekvens. Både marken och byggnaden kommer att svara olika vid olika lastfrekvenser. Vid vissa frekvenser, kallat resonansfrekvenser, kan väldigt höga vibrationsnivåer uppstå. Resonansfrekvenserna är alltså en egenskap hos objektet (mark/byggnad) och beror av dess massa och styvhet. Ofta innehåller källan samma frekvenser som objektets resonansfrekvenser vilket resulterar i extra höga vibrationsnivåer vid de frekvenserna. Det är därför viktigt att kunna bestämma både troligt frekvensinnehåll i lasten samt resonansfrekvenser hos mark och byggnad vid vibrationsanalyser. Detta kan göras genom mätningar och beräkningsmodeller.

Ibland föreslås att en förstoringfaktor för en statisk last ska användas för att ta hänsyn till dynamiska effekter såsom

resonansfenomen. Då en dynamisk respons är beroende av både massa och styvhet, och en statisk beräkning endast beaktar styvhet kan detta förfarande leda till felaktiga bedömningar som leder till för höga vibrationsnivåer eller onödig överdimensionering.

Generellt kan vibrationer orsaka tre typer av problem. Vibrationer kan orsaka (1) byggnadsskador, vara (2) störande för boende eller (3) påverka vibrationskänslig utrustning. (1) Byggnadsskador orsakade av trafiklast är dock mycket ovanligt och har i endast i få fall dokumenterats och då vid extremt starka vibrationskällor. Även kosmetiska skador är svåra att påvisa men kan uppstå i form av hårfina sprickor i fasad och puts, vid till exempel känsliga historiska tegelbyggnader grundlagda på dålig jord. Andra samverkande faktorer är fukt- och temperaturrörelser och tidsberoende sättningar. Det är därmed mycket svårt att avgöra vilken faktor som har orsakat de kosmetiska skadorna. (2) För människor kan vibrationer leda till exempelvis koncentrationssvårigheter, sömnsvårigheter och utmattnings-



Figur 4: Möjlighet till att påverka utformningen av byggnaden (designfrihet) i relation till olika skeden i byggprocessen.

strategi behövs för effektiv hantering av störande vibrationer. En sådan strategi behöver involvera flera teknikområden där ett samarbete mellan olika tekniska discipliner utvecklas för att skapa gemensamt synsätt och nya verktyg för att hantera denna disciplinöverskridande utmaning. Dessa kan med fördel utvecklas i samarbete mellan högskola och aktörer inom byggsektorn.

Normalt utförs geofysiska och geotekniska undersökningar av geotekniker, vibrationsmätningar utförs av akustiker och beräkning av vibrationsnivåer av byggnadskonstruktörer. Vid en ny spårsträckning är dessutom järnvägsprojektörer involverade och även brokonstruktörer kan bli involverade för nya broar. Hur och vilka olika teknikområden som ska samarbeta vid frågeställningar om vibrationer i förtätade städer behöver utvecklas. En branschgemensam syn på problematiken och en gemensam syn på analysförfarande är nödvändigt om man ska kunna säkerställa god prediktion.

Beroende på vilket skede ett byggprojekt är i ställs olika krav på precisionen av de beräknade vibrationsnivåerna vilket ställer olika krav på de modeller och verktyg som behövs. I de tidigaste skedena kan man ofta tillåta en grov bedömning för att exempelvis svara på frågan om det är möjligt att bygga på den tänkta platsen, eller om vibrationsreducerande åtgärder kan komma att behövas. I en detaljerad design av exempelvis ett bjälklag kan mer precisa bedömningar vara nödvändiga och då kommer det att behövas högre precision i indata och modeller. Bedömning av risk för störande vibrationer bör göras så tidigt som möjligt i ett projekt. Det är i de tidiga skedena som det är möjligt att nämnvärt påverka utformningen av byggnaden alternativt spårbyggnaden. *Figur 4* visar en skiss av olika skeden i byggprocessen och hur designfriheten minskar medan

kunskapen om byggnadens utformning ökar.

Det är nödvändigt att göra en riskbedömning där konsekvenserna om vibrationskraven överskrider värderas. Om konsekvenserna är stora, exempelvis där dyr vibrationskänslig utrustning påverkas, krävs analyser, och indata, med hög precision så att man får god noggrannhet i prediktionen. Om konsekvenserna är små kan man tillåta sig att använda grova prediktionsmodeller. Dessa avvägande måste också bedömas utifrån ekonomiska faktorer. Precisa beräkningar kräver ofta detaljerade modeller som använder indata som kan vara omfattande och därmed dyra att producera. Dessutom måste hela den slutliga konstruktionen med alla detaljer vara färdigritad. Det bör också upprättas en så kallad fall-back-plan som består av en handlingsplan som beskriver tänkbara åtgärder om vibrationsnivåerna blir för höga, exempelvis att de stör boende eller känslig utrustning. Om en sådan plan upprättas i samband med projekteringen så kan byggnaden utformas så att en del vibrationsreducerande åtgärder blir möjliga att utföra i efterhand.

I en strategi för prediktion av vibrationer i byggnader är inverkan av markens egenskaper, trafikens inverkan och byggnadens egenskaper de viktigaste parametrarna. Hur detaljerad information som krävs bestäms av den önskade noggrannheten i beräkningarna av vibrationsnivåerna. Om det vid en första utredning bedöms att nivåerna kommer att bli låga så krävs ingen vidare utredning. I en första bedömning behövs endast enkla modeller och indata av enkel karaktär. Om den första bedömningen visar att det föreligger stor risk så kommer det att behövas större undersökningar för att kunna göra en noggrannare bedömning och åtgärdsplan. Bestämning av alla parametrar som behövs för en fullständig modell resulterar ofta i stora insatser, exempelvis geofysiska och geotekniska mätningar, vibrationsmätningar och beräkningsmodeller för husbyggnaden. Därför kan det vara nödvändigt att inkludera statistisk varierande indata i modellen. Strategin kommer då att involvera både mätningar och beräkningar. Studier av vibrationer och stömljud i byggnader från spårtrafik kräver analys av samverkanskonstruktioner där mark, grundläggning och byggnad ingår. Detta är nödvändigt för att studera de vibrationsfenomen som uppstår och för att kunna föreslå lämpliga åtgärder för vibrationsreducering. Följande aktiviteter utgör en grund för hur en strategi kan utvecklas:

- Fältmätningar av vibrationer och stömljud från spårtrafik. Med synkrona mätningar på olika avstånd från spåret kan man med hjälp av ett fåtal geotekniska parametrar uppskatta markens dynamiska egenskaper och viktig information om den dynamiska lasten.
- Numeriska beräkningar för att avgöra hur mycket fältmätningar som krävs för att få fram nödvändig information, samt för kalibrering mellan beräkningsmodell och mätningar.
- Utveckling av beräkningsmodeller som tillåter stokastiska indata och med många beräkningar kan man med varierande indata få statistiskt varierande utdata.
- Kunskapsöverföring mellan specialister inom de olika teknikområdena och högskolan.

Aktiviteterna bör utföras parallellt då ett iterativt arbete kommer att behövas. Samarbete mellan olika teknikområden är nödvändigt där de olika områdenas spetskompetenser nyttjas. Genom samarbete kring en gemensam frågeställning kan gemensamma mål definieras. Vid workshops och seminarium kan såväl forskare som industrirepresentanter samlas från respektive teknikområde. Genom att tydliggöra förväntade synergieffekter ges förutsättningar för ett långsiktigt samarbete mellan akademi och industri. Som en del av strategin kan ett analyschema upprättas med fördefinierade analysnivåer och aktiviteter, se *tabell 1* för ett exempel. Ett analyschema kan fungera väl som diskussionsunderlag i projekt som ställs inför vibrationsutmaningar.

Möjligheter

En välfungerande strategi ger olika möjligheter såsom minskade avstånd mellan byggnad och spårtrafik, vilket är relevant för nybyggnad av både spårtrafik och byggnader eftersom det frigör mer byggbar yta. En strategi ger också högre precision i konstruktionsberäkningar och kan ge en mer effektivt utnyttjad konstruktion med minskad materialåtgång och minskad miljöpåverkan. Det ger även en direkt kostnadsbesparing i byggskedet. Med branschgemensamma analysmetoder för vibrationer och stömljud ges en tidsbesparing och därmed en kostnadsbesparing redan i projekteringskedet.

Pågående forskning

Författarna deltar i flera forskningsprojekt som omfattar vibrationer och stömljud

Tabell 1: Exempel på struktur av ett analyschema för hantering av vibrationer och stömljud i förtätade städer.

| Aktivitet | Nivå 1 (bef. kunskap tillräcklig för bedömning) | Nivå 2 (mindre mät- och beräkningsarbete) | Nivå 3 (större mät- och beräkningsarbete) |
|-----------------------|--|--|--|
| Geoteknik | Geologiska kartblad, GeoAtlas, etc. | Massdensitet och lagerföljd | Detaljerad lagerföljd |
| Vibrationsmätningar | Erfarenhet | Vibrationsnivåer vid mottagare | Dynamiska materialparametrar och dämpning |
| Vibrationsberäkningar | Erfarenhet | Enklare modell av mark | Modell av byggnad och avancerad modell av mark |

i byggd miljö. Det interregionala EU-forskningsprojektet Urban Tranquility genomförs av Lunds universitet i samarbete med RISE (tidigare SP) och universiteten i Aalborg och Aarhus samt COWI A/S. I projektet utvecklas bland annat modeller för att prediktera vibrationer och buller i byggd miljö med fokus på hållbara förtätade städer. I närliggande projekt som finansieras av Richerts stiftelse och Byggrådet fokuserar författarna på att utveckla en strategi som är praktiskt användbar för byggindustrin vid effektiv hantering av störande stömljud och vibrationer för utveckling av hållbara förtätade städer. ■

Läs mer:

För vidare läsning och kontaktinformation hänvisar vi läsarna till vår avdelnings hemsida där vi bland annat anger viktiga referenser (www.byggmek.lth.se/forskning/vibrationer-i-byggd-miljoe).

Vi vill även rekommendera läsarna att följa vår avdelnings LinkedIn-sida (Byggnadsmekanik, Lunds Tekniska Högskola www.linkedin.com/company/10273437) där vi publicerar nyheter relaterade till vår forskning.

Referenser

[1] Banverket/Naturvårdsverket. *Buller och vibrationer från spårbunden linjetrafik – riktlinjer och tillämpning*. Dnr. S02-4235/SSA60, 2006-02-01.

[2] Amick CH, Gendreau M, Busch T, Gordon CG. *Evolving criteria for research facilities: I – Vibration*, SPIE Conference 5933: Buildings for Nanoscale Research and Beyond. San Diego, California, 2005.

[3] P. Persson, K. Persson, G. Sandberg, *Numerical study of reduction in ground vibrations by using barriers*, Engineering Structures 115 (2016) 18–27.

[4] P. Persson, K. Persson, G. Sandberg, *Reduction in ground vibrations by using shaped landscapes*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 60 (2014) 31–43.

[5] P. Persson, K. Persson, G. Sandberg, *Numerical study on reducing building vibrations by foundation improvement*, Engineering Structures 124 (2016) 361–375.

[6] P. Persson, L.V. Andersen, K. Persson, P. Bucinskas, *Effect of structural design on traffic-induced building vibrations*, Procedia Engineering 199 (2017) 2711–2716.