



RAPPORT

Handläggare
Erik Olsson
Telefon
+46 10 505 84 10
SMS
+46701847410
E-post
erik.o.olsson@afconsult.com

Datum
2015-08-28 REV.2016-07-11
Projektnr
708590

Kund
Göteborgs kommun Stadsbyggnadskontoret

Utredning Stomljud och Vibrationer från tåg Detaljplan Säterigatan

ÅF Infrastructure AB
Ljud och Vibrationer

Erik Olsson

Kvalitetsansvarig
Mats Hammarqvist



RAPPORT

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	4
1.1	Bakgrund	4
1.2	Uppdraget.....	4
1.3	Avgränsningar	4
2	Stomljud från tåg	5
2.1	Allmänt om stomljud från tåg	5
2.2	Riktvärden stomljud från tåg	5
2.2.1	Allmänt.....	5
2.2.2	Riktvärden detaljplan Säterigatan	6
2.3	Beskrivning av beräkningsmodell för stomljud från tåg	7
2.4	Beräkningsförutsättningar	8
2.5	Beräkningsresultat	9
2.6	Stomljudsdämpande åtgärder	9
3	Vibrationer från tåg	11
3.1	Allmänt om komfortstörande vibrationer från tåg	11
3.2	Riktvärden vibrationer från tåg	12
3.2.1	Riktvärden enligt Svensk Standard SS 460 48 61	12
3.2.2	Trafikverkets riktlinjer för komfortstörande vibrationer från järnvägstrafik	12
3.3	Beskrivning av beräkningsmodell för vibrationer från tåg	13
3.4	Beräkningsförutsättningar	13
3.5	Beräkningsresultat	14
4	Referenser.....	14

Bilagor

Bilaga 1.....	Tabell beräkningsresultat
Bilaga 2.....	Karta beräkningspunkter
Bilaga 3.....	Modellering Findwave®



RAPPORT

Sammanfattning

Stadsbyggnadskontoret arbetar med att ta fram en ny detaljplan för järnvägstunnel och bostäder vid Säterigatan i Göteborg. Planområdet omfattar ca 10 hektar och är beläget vid Norra Älvstranden cirka 3 km väster om Göteborgs centrum. Planens syfte är att möjliggöra att Hamnbanan förläggs i tunnel och att en sammanhängande bebyggelse kan skapas från Säterigatan i norr till Östra Eriksbergsgatan i söder.

ÅF Ljud och Vibrationer har av Stadsbyggnadskontoret fått i uppdrag att beräkna stomljud och vibrationer för planerade bostäder vid Säterigatan. I uppdraget ingår även att redogöra för riktvärde och förslag på åtgärder för att möjliggöra byggnation av bostäder enligt detaljplan.

Beräkningar har gjorts i ÅF Ljud och Vibrationers egenutvecklade beräkningsprogram för stomljud respektive komfortstörande vibrationer från tåg. Som komplement till ÅF's beräkningsprogram har det numeriska beräkningsprogrammet Findwave® använts, se bilaga 3.

Vår bedömning är att lämpliga riktvärden vid stomljud från spårburen trafik är 30 dBA maximal ljudnivå (slow) samt frekvensanalys mot lågfrekvenskrav i Folkhälsomyndighetens allmänna råd om buller inomhus. För kontor och liknande utrymmen tillämpas riktvärdet 40 dBA maximal ljudnivå (slow).

Beräkningar visar att åtgärdsbehov för att klara riktvärde för stomljud är

- 4+370 till 4+540 >21 dB insättningsdämpning
- 4+540 till 4+660 >18 dB insättningsdämpning
- 4+660 till 4+780 >18 dB insättningsdämpning

Förslag på åtgärder är att ballastmatta nedläggs vid banöverbyggnad när nya Hamnbanan byggs. Bedömd kostnad för att klara föreslaget riktvärde för planerade bostäder är 2 364 000 SEK. Då insättningsdämpningsbehovet är i överkant av vad en ballastmatta presterar kan ballastfritt spår med avisolerad spårplatta vara en lösning. Det innebär en större investeringskostnad men kan vara lönsam ur ett helhetsperspektiv. Med sådan lösning på sträcka 4+370 till 4+540 bedöms totalkostnaden uppgå till 8-9 MSEK.

För att med säkerhet få rätt optimering på åtgärd vid byggnad rekommenderas mätning av vibrationer i stomljudsspektrat från den nya Hamnbanan på plats för planerade byggnader.

Enligt beräkningar innehålls riktvärde för komfortstörande vibrationer 0,4 mm/s vägrms i sovrum nattetid om byggnader grundläggs på spetsburna pålar och har en styv husstomme typ betong med bjälklag som har spännvidder mindre än ca 8 meter.

Man bör dock mäta komfortstörande vibrationer i mark på detaljplaneområdet efter det att tunneln byggts och börjat trafikeras för att säkerställa att riktvärde innehålls i planerade byggnader.



RAPPORT

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Stadsbyggnadskontoret arbetar med att ta fram en ny detaljplan för Järnvägstunnel och Bostäder vid Säterigatan i Göteborg. Planområdet omfattar ca 10 hektar och är beläget vid Norra Älvstranden cirka 3 km väster om Göteborgs centrum. Planens syfte är att möjliggöra att Hamnbanan förläggs i tunnel och att en sammanhängande bebyggelse kan skapas från Säterigatan i norr till Östra Eriksbergsgatan i söder. Planen möjliggör för cirka 840 bostäder (bostadsrätter och hyresrätter), cirka 1 000 m² verksamhetsyta, en förskola, parkområden och nya gator. Bebyggelsens höjd planeras till 4-8 våningar (Ref. 6).

Trafikverket har beslutat att i delar bygga ut Hamnbanan till dubbelspår och att lägga den del som berör planområdet i tunnel. Parallellt med detaljplanarbetet tar Trafikverket fram en järnvägsplan för järnvägsområdet (Ref. 6).

I Ref. 5 skrivs förslag på åtgärder för planerade hus vid Säterigatan. De planerade bostäderna enligt detaljplan Säterigatan ligger mycket nära Bratteråstunneln och den planerade betongtunneln öster om Bratteråsberget. Förmodligen blir det billigast att bekosta åtgärd med ballastmatta redan vid bygget av järnvägen. Antal hus som behöver åtgärdas kommer minska och omfattningen av de eventuella stomljuddämpande åtgärder som behöver göras på byggnaderna minskar. För flera hus kommer troligen åtgärder krävas både i tunnel och på byggnaderna.

Sedan den ursprungliga versionen av den här utredningen genomfördes 2015-08-28 har vissa förutsättningar förändrats. Beslut har tagits att betongtunnel på sträcka ca 4+540 till 4+660 skall vara pålgrundlagd. Dessutom har Trafikverket inkommit med synpunkter (Ref. 15) som bemöts i den här revideringen. I den här revideringen, 2016-06-15, redogörs därför för:

- Beräkningar med pålad tunnel på sträcka ca 4+540 till 4+660.
- Påverkan vid lägre tågastigheter än dimensionerande 70 km/h.
- Förslag på stomljuddämpande åtgärder med högre insättningsdämpning än ballastmatta.
- Redogörelse för spridning av beräkningsmodeller.

1.2 Uppdraget

ÅF Ljud och Vibrationer har av Stadsbyggnadskontoret fått i uppdrag att beräkna stomljud och vibrationer för planerade bostäder vid Säterigatan. I uppdraget ingår även att redogöra för riktvärde och, om inte riktvärde bedöms kunna innehållas, förslag på åtgärder för att möjliggöra detaljplan.

1.3 Avgränsningar

ÅF's beräkningsprogram för stomljud är inte definierat för alla förhållande där beräkningar krävs (betongtunnel utan pålgrundläggning). Detta har vid tidigare skede gällt sträcka ca 4+540 till 4+660. För dessa fall har det numeriska beräkningsprogrammet Findwave® använts, se Bilaga 3.



RAPPORT

2 Stomljud från tåg

2.1 Allmänt om stomljud från tåg

Stomljud är ljud som först transmitteras i fasta material, berg, byggnadens stomme etc., för att sedan, som luftljud, nå mottagarens öra. Enheten för stomljud är i dagligt tal också decibel.

Stomljud upplevs inomhus vid en tågpassage som ett dovt mullrande ljud under den tid det tar för tåget att passera. Tåget som passerar över små ojämnheter i rälsen sätter igång vibrationer i rälsen och marken under rälsen och denna vibration sprider sig till omgivningen. I byggnaden är vibrationsnivån sällan kännbar, men de svaga vibrationerna i väggar och bjälklag kan ibland skicka ut ett hörbart ljud.

Stomljud förekommer främst vid tunnel i berg med byggnad grundlagd på berggrund. Alternativt kan det vara en byggnad som är sammankopplad med en betong- eller ståltunnel för järnvägstrafik och som ligger i andra jordarter än berg. En byggnad grundlagd på pålar direkt på berggrund får normalt en lägre stomljudsnivå än om byggnaden ligger direkt på berget.

Anledningen till att stomljud från tågtrafik i tunnel anses vara mer störande än luftburet trafikbuller och därför ska särbehandlas, är främst på grund av att ljudet är lågfrekvent och att det uppkommer även i lokaler som i normala fall inte påverkas av yttre störkällor som trafik. Det finns ingen "tyst sida" av huset. Ett lågfrekvent ljud uppfattas som något mer störande än ett mer högfrekvent ljud vid en och samma A-vägda ljudnivå. I några utredningar hävdas också att det faktum att ljudet ökar relativt snabbt, att man inte ser ljudkällan och att det inte är möjligt att avgöra riktningen till störkällan gör att störupplevelsen ökar.

Även då tåget kör på bana utanför tunneln kan stomljudet vara hörbart, speciellt i rum som inte har fönster och fasad direkt mot järnvägen eller då ljudisoleringen i fasaden är mycket bra. Stomljudet kan vara svårt att kontrollera då tåget kör på bana utanför tunnlar, då luftburet ljud dominerar ljudnivån.

Stomljudet är mycket svårt, men inte omöjligt, att uppskatta i förväg. Det finns ingen standardiserad, enkel, beräkningsmodell som för luftljud. Stomljudsnivån beror bl a på tåghastighet, boggi, hjul, räls, bankropp, omgivande berggrund samt husets grundläggning och konstruktion.

2.2 Riktvärden stomljud från tåg

2.2.1 Allmänt

Det finns inga svenska nationella myndighetskrav på stomljud från spårburen trafik i tunnel. I många järnvägsprojekt i Sverige och Skandinavien baserar man val av riktvärde på nationell och internationell praxis. Denna praxis bygger på begränsad kunskap om koppling till hur människor upplever störningen.

I underlagsmaterial till MKB för Järnvägsutredningen till Västlänken har en omfattande genomgång av riktvärden för stomljud från tåg gjorts (Ref. 8). I sammanställningen ingår:

- Projektspecifika riktvärden för 10 skandinaviska och 3 internationella tågtunnelprojekt
- Regionala riktlinjer som behandlar stomljud från Malmö och Stockholm



RAPPORT

- Nationella riktlinjer för buller inomhus (Folkhälsomyndigheten och Boverkets byggregler)
- Internationella riktlinjer, normer och praxis (USA, Storbritannien, Österrike, Danmark och WHO)

Merparten av projekten och normerna har riktvärden för maximal ljudnivå på 28-35 dBA (slow) (Anm. Med slow menas tidsvägningen 1 sekund). Stor majoritet av projekten i Sverige har kravnivå på 30 dBA maximal ljudnivå (slow).

Ställda krav på stomljud från trafik i driftskede för projekt Västlänken (Ref. 9) är 30 dBA maximal ljudnivå (slow) och 40 dBA för kontor och liknande utrymmen. Kraven relateras även till Folkhälsomyndighetens allmänna råd där frekvensanalys utförs mot tabell för lågfrekvent buller i Folkhälsomyndighetens allmänna råd om buller inomhus FoHMFS 2014:13.

Varken Miljöförvaltningen eller Trafikkontoret känner till specifika krav gällande stomljud från spårburen trafik för Göteborgs kommun. De fåtal gånger som klagomål på stomljud från spårvagn uppkommit har det berott på dåliga skarvar och vågbildning på rälsen vilket åtgärdats genom slipning av rälsen (Ref. 14).

Stockholms Läns landsting har i Ref. 10 skrivit om stomljud i bostäder för befintlig miljö. Här står att vid bedömning av störning i bostad avseende stomljud är utgångspunkten att 30dBA slow bör innehållas. Ljudnivån avser buller genererat av trafikfordon.

En miljömedicinsk utredning (pilotstudie) genomfördes i Västlänken-projektet av Göteborgs Universitet institutionen för miljömedicin tillsammans med dåvarande Banverket rörande störningar i bostäder ovanför järnvägstunneln Gårdatunneln. Utredningen var begränsad i omfattning men en slutsats var att de som störs ganska mycket har en maximal ljudnivå i intervallet 39-41dBA från godstrafik.

Idag sätts sällan riktvärden utifrån nivåer när klagomål börjar uppkomma. Detta var en metod som var vanlig för flera år sedan. Idag utförs besvärstudier som grund för att sätta riktvärden. När klagomål börjar uppstå kring en störande verksamhet är det ofta många som anser sig mycket störda (Ref. 8).

2.2.2 Riktvärden detaljplan Säterigatan

Vår utgångspunkt är att de riktvärden som använts för befintliga bostäder och nybyggnad av järnväg även bör tillämpas vid befintlig järnväg och nybyggnad av bostäder. Enligt vår bedömning är lämpliga riktvärden vid stomljud från spårburen trafik i nya bostäder vid Säterigatan enligt Västlänken (Ref. 9) dvs. 30dBA maximal ljudnivå tidsvägning slow samt frekvensanalys mot lågfrekvenskrav i Folkhälsomyndighetens allmänna råd om buller inomhus FoHMFS 2014:13. För kontor och liknande utrymmen tillämpas riktvärdet 40dBA slow.

Tabell 1. Lågfrekvenskrav per tersband enligt FoHMFS 2014:13.



RAPPORT

Tersband [Hz]	Ljudtrycksnivå, L_{eq} [dB]
31,5	56
40	49
50	43
63	42
80	40
100	38
125	36
160	34
200	32

I bedömningen tas hänsyn till att bostäderna och hamnbanan kommer att finnas under mycket lång tid. Hänsyn bör också tas till att passage av godståg kan ta över en minut.

2.3 Beskrivning av beräkningsmodell för stomljud från tåg

ÅFs beräkningsprogram för stomljud från tåg (Ref.2) utgår från en ursprungligen empirisk modell baserad på mätningar från tåg- och tunnelbanetunnlar i Stockholm. Utgångsvärdet är stomljudsnivå från ett persontåg eller godståg med slitna hjul och ballastspår med slitna räler på granit eller liknande berggrund (med nysvarvade hjul och räler kan man räkna med ca 10 dB(A) lägre stomljudsnivå, Ref.2). För utgångsvärdet kör tåget i 80 km/h på en ny bana i tunnel med totalt 1,3m ballast och underballast och stomljudet är omräknat till ett fiktivt avstånd på 30m. Avståndsdämpningen utgår från sfärisk spridning med 6 dB dämpning per avståndsdubbling på avstånd överstigande 30 m. På kortare avstånd görs en avståndsberoende korrektion genom kontinuerlig övergång från 4,5 dB tillägg nära spåret till noll på 30 m avstånd. Utgångsvärdet och hastighetsberoendet baseras på en mängd mätningar under flera år av Ingemansson Technology och ÅF Ljud och vibrationer, senast för höghastighetståg baserat på mätningar i och över Håknästunneln för Höghastighetsprojektet för Trafikverket, samt även på skrifter från Mehdi Bahrekazemi.

Beräknad stomljudsnivå gäller i plan 1 (markplan) av byggnaden. Om källare skulle förekomma under plan 1 korrigeras detta med 1,7 dB(A) per källarvåning. Motsvarande korrektion görs om stomljudsnivån på högre plan än plan 1 är aktuell (t.ex. om verksamheten i lägre våningsplan skulle vara kontor eller handel).

För Citybanan i Stockholm, som till största delen har ballastspår med ballastmatta har ÅFs modell använts. ÅFs modell har vidare använts för Tröingebergstunneln på Västkustbanan, Nygårdstunneln och Kattlebergstunneln på Norge-Vänerbanan.

För Västlänken med huvudalternativ ballastfritt spår har ÅFs modell använts tillsammans med en kontroll mot Rupert Taylors Findwave®-beräkningar som utfördes i järnvägsutredningen samt mätningar utförda över Gårdatunneln.

För Citytunneln i Malmö använde först konsortiet KCM, och från 2002 Ingemansson Technology, en modell i Findwave® utvecklad i samarbete med Rupert Taylor Ltd. Citytunneln har ett ballastfritt spår med vibrationsisolerade slipersblock. Stomljudsnivån har kontrollerats och kravet har befunnits vara uppfyllt utan onödig överdimensionering.

Vibrations- och stomljudsnivån (maxvärde) i "tunnelskalet" från ett stort antal tågpassager kommer att utgöra en normalfördelning. På grundval av tidigare erfarenheter bedöms ett 90 % konfidensintervall till ± 5 dB (Ref.15).



RAPPORT

Noggrannheten hos det beräknade värdet i byggnad ökar och kan uppgå till ± 10 dB för samma konfidensintervall, beroende på hur väl exempelvis kopplingen mellan mark och byggnad och byggnadens resonanser är kända (Ref.15).

Vid jämförande beräkningar i Ref. 15 med två andra beräkningsmodeller ligger spridningen inom används beräkningsmodell på +2 dB till -10 dB.

Mätningar i Stockholm i samband med Citytunneln visar att stomljudsnivån minskar med 10 dB om vibrationsöverföringen i berg passerar en sprickzon. Även mottagarrummets unika akustiska egenskaper påverkar stomljudsnivån i hög grad. Se Tabell 2 för sammanställning av faktorers påverkan på stomljudsnivån.

Tabell 2. Sammanfattning noggrannheter

Faktor påverkande stomljudsnivån	Spridning, stomljudsnivå
Tågfordon	± 5 dB
Ytojämnheter räl	+5 dB – 10 dB
Bergets egenskaper: sprickzon	-10 dB
Koppling mark/byggnad: byggnadsresonanser	± 5 dB
Rummets egenskaper: rumsmoder	± 5 dB

För att öka säkerheten i beräkningarna rekommenderar vi att det utförs kontrollmätning av vibrationer i frekvensområdet för stomljud från färdig tunnel före spårläggningen. Efter dessa mätningar kan man korrigera mängden åtgärder (Ref.15).

2.4 Beräkningsförutsättningar

På hela aktuell sträckning, ca 4+350 till 4+780, består järnvägens överbyggnad av räl och betongsliper på ca 0,6m makadamballast. På sträckan innan 4+400 går spåret ovan mark i betongtråg på berg. Vid sträckan 4+400 går banan in i betongtunnel. På sträckan 4+400 till 4+540 ligger betongtunneln på ca 0,5 m packad fyllning på berg. På sträckan 4+540 till 4+660 går betongtunneln pålad till berg. På sträckan 4+660 till 4+730 ligger betongtunneln på 0,5 m packad fyllning på berg. Tunnelns bottenplatta är 1,1 meter tjockt och tunnelväggarna 0,8 m tjocka. Efter 4+730 går tunneln i berg. Korrektioner för ballasttjocklek 0,6 mm är +2,6 dB högre stomljudsnivå jämfört med grundfallet. Korrektion för 0,5 m fyllning under betongtunneln är -1,5 dB lägre stomljudsnivå jämfört med grundfallet.

För hela området bör större och mer sättningskänsliga byggnader preliminärt grundläggas på pålar/plintar. Lätta och sättningsstålga byggnader, t ex förråd, kan preliminärt grundläggas direkt på platta på mark (Ref. 12).

Vid pålad betongtunnel antas konservativt samma stomljudsnivå vid grundläggningens underkant vid berg som vid bana, dvs ingen dämpning däremellan.

Korrektion för att byggnader står på pålar görs med 3 dB lägre stomljudsnivå jämfört med grundfallet. Samtliga byggnader antas ha entt källarplan.

Tågets hastighet är 70 km/h i beräkning. Korrektion för tåghastighet 70km/h innebär 0,8 dB lägre stomljudsnivå jämfört med grundfallet 80 km/h. Tåghastighet 40 km/h ger 3,2 dB lägre stomljudsnivå jämfört med 70 km/h.



RAPPORT

Markegenskaper under byggnad och järnvägstunnel har hämtats från geoteknisk utredning (Ref. 12) och Trafikverkets ritningar

2.5 Beräkningsresultat

Beräkningar med ÅF's empiriska beräkningsmodell visar att stomljudsnivå i lägsta del av byggnader belägna på 10 meters avstånd från spårmittpunkt är $L_{pAmax}(slow)=44 - 51$ dB.

Modellering och beräkning med numeriskt program Findwave® för tvärsnitt ca 4+600 visar att stomljudsnivå i lägsta del av byggnad belägna på 10 meters avstånd från spårmittpunkt är $L_{pAmax}(slow)=34$ dB med nyslipat spår. Se Bilaga 3. Motsvarande beräkning med semiempirisk modell, som utgår från oslipade hjul och räler, är $L_{pAmax}(slow)=44$ dB. Beräkning i Findwave visar att lägre tåghastigheter än 70 km/h ger lägre stomljuds- och vibrationsnivåer. Dock ger tåghastigheten 40 km/h högre nivåer än 30km/h, 50 km/h och 60 km/h. Se Bilaga 3.

Åtgärdsbehov för att klara riktvärde $L_{pAmax}(slow)=30$ dB är

- Sträcka 4+370 till 4+540 >21 dB insättningsdämpning
- Sträcka 4+540 till 4+660 >18 dB insättningsdämpning
- Sträcka 4+660 till 4+780 >18 dB insättningsdämpning

Beräkningsresultat för samtliga beräkningspunkter redovisas i Bilaga 2.

2.6 Stomljuddämpande åtgärder

Det finns flera sätt att minska vibrationsöverföringen mellan järnväg och byggnad. Det som styr val av åtgärd är, förutom kostnader, inom vilket frekvensområde som problem föreligger, hur stor insättningsdämpningen behöver vara för att riktvärde skall innehållas, krav vid bana t.ex. krav på beständighet och maximal nedböjning av räls. Faktorer som minskar stomljud är också minskning av tåghastighet och slipning av hjul och/eller räler.

Stomljuddämpning vid spår

De vanligaste åtgärderna vid ett ballasterat spår är att ett elastiskt lager placeras någonstans i banöverbyggnaden. Vanliga material är naturgummi, korkgummi, stenull, Sylomer eller Sylodyn. Det elastiska materialet fungerar tillsammans med tåg och ovanpåliggande bandelar som ett massa-fjädersystem. Ju längre ned i banöverdel det elastiska lagret placeras desto större blir massan och desto lägre blir resonansfrekvensen. Vid resonansfrekvensen kan förstärkning av vibrationer ske. Dämpning sker för frekvenser över resonansfrekvensen.

Under Sleeper Pads är ett elastiskt material som placeras under varje sliper. Typisk tjocklek är 10-25 mm. Möjlig insättningsdämpning för axellaster upp till 30 ton är 5-7 dB(A). Resonansfrekvens beror bland annat på tjocklek av USP'n. Typisk resonansfrekvens är 25 Hz. Kostnad är 350-750 SEK per spårmeter. Priset beror på material och tjocklek. Trafikverket har idag ett ramavtal för USP med Christian Berner som distribuerar Sylomer och Sylodyn. Sylodyn är dyrare men har i gengäld lägre dynamisk styvhet vilket innebär mindre materialåtgång.

Om två åtgärder kombineras blir dämpningen lägre än summan av dämpningarna. I Sverige har man aldrig räknat med några sådana kombinationseffekter. Teoretiskt skulle det gå att få lägre dämpningen men systemet blir mer oförutsägbart och leder troligen till ökade driftkostnader.



RAPPORT

Ballastmatta placeras i eller under ballastlagret. Avståndet till sliper skall minst vara 350 mm. Typiska tjocklekar på ballastmatta är 15-40 mm för mattor av gummimaterial. Mattor av stenull är typiskt 35-120 mm tjocka. Möjlig insättningsdämpning är 10-20 dB(A). Det finns mätningar som visar på något högre insättningsdämpning. Typisk resonansfrekvens är 12 Hz. Kostnad är 1200-3000 SEK per spårmeter (gäller enkelspår ca 4m bred ballastmatta).

Då behovet av insatsdämpning är i den övre gränsen för vad en ballastmatta presterar (ca 20 dB) kan åtgärder med högre insatsdämpning vara aktuella.

Investeringskostnaden ökar då väsentligt, men kan löna sig ur ett helhetsperspektiv. Förslag på sådan lösning skulle innebära byte från ballastspår till ballastfritt spår med en avisolerad spårplatta. Vibrationsisolering av betongspårplatta innebär att denna avskiljs från tunnelns botten och sidor med hjälp av vibrationsisolerande material, som kan bestå av plattor eller mattor av naturgummi och kork, stenull, polyuretan, EPDM etcetera med cellstruktur. Möjlig insättningsdämpning är upp till 25 dB(A) (elastiska befästningar i 300 mm spårplatta upplagd på diskreta elastiska isolatorer, relativt ballasterat spår, Ref.18). I extremfall kan spårplattan läggas på stålfjädrar. Genom dimensionering av materialstruktur och tjocklek hos mattan eller plattan kan resonansfrekvensen hos systemet ned till cirka 5 Hz åstadkommas (Ref.17).

Kostnader för sådana spårssystem varierar mycket, vår bedömning är att 12000 - 20000 SEK per spårmeter kan vara aktuellt.

Stomljudsdämpning i byggnad

Stomljudsdämpande åtgärder i form av elastiska lager kan även läggas in i och under byggnad. Typiska material är korkgummi, Sylomer eller Sylodyn. Generellt finns 3 principer;

- heltäckande lager under t.ex. en bottenplatta,
- remsor längs kant av bjälklag eller platta
- punktvis på syllar eller pålar.

Insättningsdämpningen beror på typ av material och tjocklek, motsvarande ballastmatta. Punktvis placering av isolermaterial innebär mindre men dyrare material. Tumregel för kostnad för stomljudisolering vid byggnad är 50-150 SEK per ton byggnad.

Vid höga krav på vibrationsdämpning kan byggnaden placeras på stålfjädrar (T.ex Liljeholmstorget i Stockholm). Resonansfrekvens kan vara 3-5 Hz vilket ger medger dämpning även vid låga frekvenser. Kostnad ca 250-300 SEK per ton byggnad.

För att med säkerhet få rätt optimering på åtgärd vid byggnad rekommenderas mätning av vibrationer i stomljudsspektrat från den nya Hamnbanan på plats för planerade byggnader.

- Förslag på leverantörer stomljud och vibrationsdämpande lösningar Christian Berner, Sverige, Distributör av produkterna Sylomer och Sylodyn (tillverkade av Getzner, Österrike) i Skandinavien. webadress: <http://www.christianberner.se/>
- Rockdelta, Danmark, produkt Rockdelta stenull, webadress: <http://www.rockdelta.com/>
- Edilon Sedra, Holland, produkt exv. Trackelast, webadress: <http://www.edilonsedra.com/>
- Pandrol CDM Track, webadress: <http://www.pandrolcdmtrack.com/>



RAPPORT

- Vibratec. Sverige. Vibrationslösningar för byggnader. webadress: <http://vibratec.se/>
- Tiflex. England webadress: <http://www.tiflex.co.uk/>
- Gävle Järnvägsteknik. Produkt Clouth. webadress: <http://www.gjt.se/>
- Vitrea, Sverige, webadress: <http://www.vitrea.se/>

OBS. Vi kan inte garantera att samtliga leverantörer ovan har produkter som uppfyller detta projekts specifika krav. Rätt egenskaper för applikationen, så att kraven uppfylls, behöver specificeras i förfrågningsunderlag samt att sedan styras i upphandling och granskning av anbud.

Överslagsräkning kostnader Säterigatan.

För att klara riktvärde 30 dBA vid planerade bostäder vid Säterigatan krävs åtgärdsnivå motsvarande insättningsdämpning enligt beräkningsresultat på sträckan enligt Tabell 4. Totalkostnad 2 364 000 SEK. Priserna är grovt uppskattade.

Tabell 4. Sammanställning av kostnader med åtgärd ballastmatta.

Sträcka	Åtgärd	Kostnad
Ca 4+370 till 4+540	Alt 1. Ballastmatta (>21 dB) 3000 kr/spårmeter x 2 (dubbelspår)	1 020 000 SEK
	Alt 2. Avisolerad spårplatta (>21 dB) 12000 - 20000 kr/spårmeter x 2 (dubbelspår)	4 080 000 - 6 800 000 SEK
Ca 4+540 till 4+660	Ballastmatta (>18 dB) 2800 kr/spårmeter x 2	672 000 SEK
Ca 4+660 till 4+780	Ballastmatta (>18 dB) 2800 kr/spårmeter x 2	672 000 SEK

3 Vibrationer från tåg

3.1 Allmänt om komfortstörande vibrationer från tåg

Tågtrafik är en av de vanligaste vibrationsorsakerna i bebyggelse. De mekanismer som inverkar på vibrationsalstringen är främst (Ref. 3):

- Hastighet. Högre hastighet leder till större vibrationskrafter.
- Fordonets fjädring. En styvare fjädring leder till större vibrationskrafter.
- Den ofjädrade massan för fordonet. En större massa som ligger under fjädringen på fordonet mot rälsen leder till större vibrationskrafter.
- Hjulens ytjämnhet. Jämnare hjul leder till lägre vibrationskrafter.
- Rälernas jämnhet. En jämnare yta leder till lägre vibrationskrafter.
- Banans uppbyggnad. En tyngre och styvare uppbyggnad, för exempelvis en tunnel eller bana på bro leder till lägre vibrationsnivåer

Erfarenheterna visar att spektrum för tunga och långsamma tåg ofta har sitt maximum i frekvensområdet 8-12 Hz för mjuka lerjordar och 15-25 Hz för hårdare jordar. För lättare och snabbare tåg stiger frekvensen.



RAPPORT

Tågtrafik i tunnlar ger ett vibrationsspektrum som avviker något pga. av annorlunda koppling till mark. Spektrum har här ett maximum vid ca 80 - 100 Hz. För bergtunnlar leder detta till att vi i första hand får hörbart ljud, stomljud, snarare än kännbara vibrationer i byggnader ovanpå tunneln (Ref. 3).

3.2 Riktvärden vibrationer från tåg

3.2.1 Riktvärden enligt Svensk Standard SS 460 48 61

Markvibrationer kan ge påverkan både på människor och på byggnader. Känslig utrustning kan också påverkas och i extrema fall finns det en risk att skador på byggnader och andra konstruktioner kan uppstå. Människor kan uppleva vibrationer på olika sätt främst beroende på frekvensområde (relevant frekvensområde är 1-80 Hz) eller som ljud.

Tabell 5. Riktvärden för komfort i byggnader enligt Svensk Standard SS 460 48 61 "Vibration och stöt – Mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader". Riktvärden nedan avser vägd hastighet.

	Vägd hastighet [RMS 1s]	Upplevelse
Måttlig störning	0,4 - 1,0 mm/s	Ger i vissa fall anledning till klagomål
Sannolik störning	> 1 mm/s	Kännbara vibrationer och upplevs av många som störande.

Enligt den bedömning som gjorts i samband med framtagningen av angivna riktvärden i svensk standard, anses mycket få människor uppleva vibrationer under skiktet "Måttlig störning" som störande.

Riktvärdena bör tillämpas vid nyetableringar och vid nybebyggelse. De kan tillämpas mindre strikt för kontor än för bostäder. Riktvärdena bör tillämpas mer strikt för bostäder nattetid. Riktvärdena kan vidare användas som målsättning för långsiktig förbättring av vibrationsförhållanden i befintliga miljöer.

Not. Vibrationer som riskerar att skada byggnader är avsevärt högre än de nivåer som redovisas i denna beräkning.

3.2.2 Trafikverkets riktlinjer för komfortstörande vibrationer från järnvägstrafik

Trafikverket har tillsammans med Naturvårdsverket tagit fram skriften Dnr. S02-4235/SA60 där Trafikverkets långsiktiga mål för vibrationsstörningar är formulerade med riktlinjer för övervägande av åtgärd för olika planeringsfall (planeringsmål). Dessutom har högsta acceptabla nivåer definierats som kan behöva utföras även om de inte är samhällsekonomiskt motiverade. Riktvärdena är vägledande, inte bindande. Åtgärdernas omfattning skall alltid avgöras med utgångspunkt från vad som är tekniskt möjligt, ekonomiskt rimligt och miljömässigt motiverat i varje enskilt fall.

Nivåer för åtgärder är för nybyggnad av bana 0,4 mm/s vägd RMS (sovrum nattetid kl. 22-06). Överskrids denna nivå ska åtgärder övervägas. Inriktningen av åtgärderna bör främst vara sådan att dessa bidrar till att reducera speciellt sömnstörningar.



RAPPORT

Högsta acceptabla värden är för nybyggnad av bana 0,7 mm/s vägd RMS (sovrum nattetid kl. 22-06). Inga boenden skall behöva utsättas för vibrationsnivåer över dessa i sovrum nattetid. Kan detta inte nås med rimliga tekniska åtgärder bör fastighetsägaren erbjudas att Trafikverket förvärvar fastigheten.

3.3 Beskrivning av beräkningsmodell för vibrationer från tåg

Beräkningsmodellen är en vidareutveckling av NGI:s (Norges Geotekniske Institutt) empiriska beräkningsmodell för tåg vibrationer (Ref. 11) samt egen sammanställning av en mängd mätningar av tåg vibrationer genomförda av bland annat ÅF Ljud och Vibrationer (Ref. 4).

Modellen utgår från en tågpassage i 80 km/h på modern bana på 1,6 meters ballast vilket ger en vibrationsnivå i grundmur på en byggnad på spetsburna pålar vid ett visst avstånd. Sedan korrigeras vibrationsnivån genom multiplikatorer för följande parametrar:

- Tågtyp
- tågets hastighet
- tågbanans beskaffenhet
- marktyp
- avstånd
- grundläggning
- bjälklagstyp

Modellen har bland annat använts vid Citybanan i Stockholm och Västlänken i Göteborg för att beräkna vibrationsnivåer i byggnader från tåg i driftskede.

3.4 Beräkningsförutsättningar

Beräknat värde gäller maximal komfortvägd vibrationshastighet i mm/s, tidsvägning slow (1 sekund) (RMS-värde vägt enligt ISO 2631-2) i på bjälklag i byggnad av betong med spännvidder mindre än 8 meter. Riktvärde för vibrationer gäller i bjälklag i sovrum.

Beräkningarna gäller för passage av godståg med hastighet 70km/h.

Tågbanans beskaffenhet har i beräkningarna korrigerats med följande multiplikatorer (baserat på ref. 4):

- 0 för tunnel i berg.
- 0,45 för betongtråg/betongtunnel på fast mark.
- 0,15 för pålgrundlagd betongtunnel

De olika marktyper som förekommer på planområdet är hämtat från (ref.12) har i beräkningarna delats in i följande kategorier (enligt ref.4):

- berg (skjuvvågshastighet 2800 m/s)
- sand/finsand/grus/isälvsmaterial/fyllning/fast grovt grus/fast gruslager (skjuvvågshastighet 180-240 m/s)

Det avstånd som använts i beräkningarna är från spårmittpunkt till närmsta del av byggnad (baserat på ref. 13). Korrektion görs för avstånd mindre än 15 meter. Kortaste använda avstånd är 5 meter vilket har en multiplikator på 9.



RAPPORT

3.5 Beräkningsresultat

Beräkning med ÅF's empiriska beräkningsprogram visar att högsta vibrationsnivå i bjälklag av byggnad är 0,1-0,2 mm/s RMS (1s). Beräkning gäller för byggnad grundlagd på spetsburna pålar med styvt bjälklag typ betong och kortare spännvidder än 8 meter.

Beräkning med Findwave® för byggnad på 10 m avstånd från järnväg vid sträckning ca 4+600 är ca 0,2 mm/s RMS (1s), se Bilaga 3.

Enligt beräkningar finns förutsättningar för att klara riktvärde 0,4 mm/s enligt Svensk Standard SS 460 48 61 och Trafikverkets riktlinjer i skriften Dnr. S02-4235/SA60.

Man bör dock genomföra vibrationsmätning i mark på detaljplaneområdet efter det att tunneln byggts och börjat trafikeras för att säkerställa att de specialfordon t.ex. enhetslastade tunga fordon med plåt till Volvo inte ger upphov till höga vibrationsnivåer pga insvängningsfenomen som inte har fångats upp i genomförda beräkningar i den här utredningen.

Beräkningsresultat för samtliga beräkningspunkter redovisas i Bilaga 1.

4 Referenser

1. Buller och vibrationer från spårburen linjetrafik – Riktlinjer och tillämpning, Dnr. S02-4235/SA60, Banverket och Naturvårdsverket, 2006-02-01
2. Beräkning av stomljud från tågtrafik, Version 0.16, ÅF Ljud och Vibrationer, 2013-05-14
3. Markvibrationer Internkurs 2014 (Rev. 10.0, 2014-11-24) Internt material ÅF Ljud och vibrationer
4. Vibrationshastighet från tåg Version 0-19. ÅF Ljud och Vibrationer, 2013-11-13
5. Hamnbanan, sträckan Eriksberg-Pölsebo i Göteborgs kommun – Stomljudsutredning, Trafikverket/Sweco Rail AB/ÅF Infrastructure AB, 2015-03-18
6. Planbeskrivning Detaljplan för Järnvägstunnel och Bostäder vid Säterigatan, Samrådshandling, november 2014
7. Ritningar, plan och profil, Systemhandling ritningsnr
108793-11-110-04500-002
108793-21-400-04480-011
108793-21-400-04532-022
108793-21-400-04375-021
108793-21-400-04720-030
Sweco/Trafikverket 2015-05-31
8. PM Aktivitet 56, Järnvägsutredning, Västlänken, Banverket/WSP, 2004-12-12
9. Kravrapport TRVK322, Västlänken, Trafikverket, 2014-07-22
10. Riktlinjer Buller och vibrationer, Dok.id. 346217, Trafikförvaltningen, Stockholms läns landsting, 2014-05-05
11. Christian Madshus m fl Vibrationsstrategi for Gardermobanen. Detaljplan/reguleringsplan: Måleresultater og beregningsgrunnlag for parsellene mellom Åråsen og Eidsvoll - Fellesrapport. 933016-6. Norges Geotekniske Institutt. 23 juni 1994.
12. Nybyggnation vid Säterigatan, Geoteknisk utredning för detaljplan, Norconsult, 2014-09-24 rev. 2015-03-18

RAPPORT

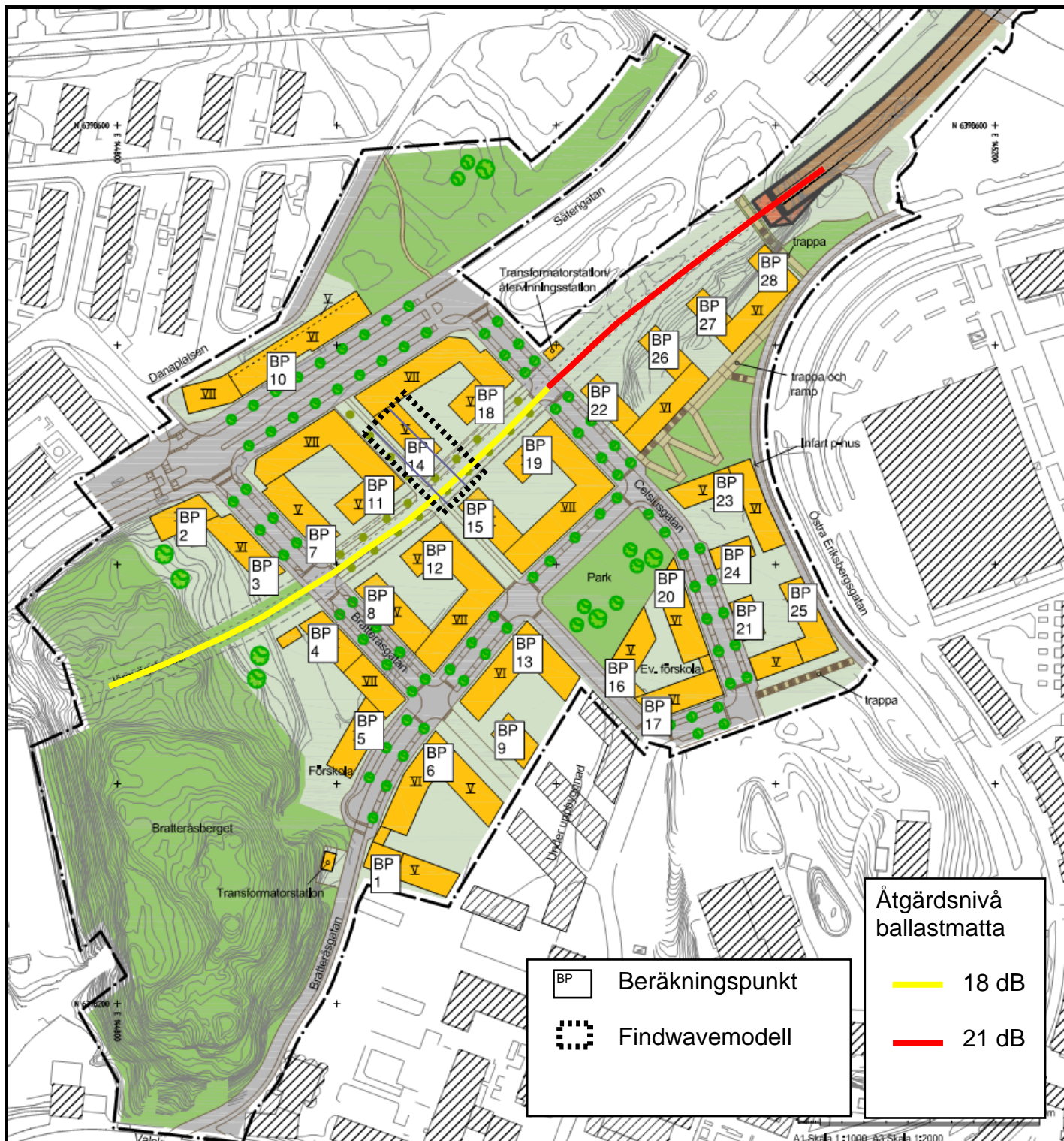


13. Plankarta, Detaljplan för järnvägstunnel och bostäder vid Säterigatan inom stadsdelen Sannegården i Göteborg, 2015-06-17, Koncept 2015-06-01
14. Mejlkonversation med Mats Larsson, Trafikkontoret och Martin Knape, Miljöförvaltningen, april 2015.
15. Trafikverkets synpunkter, mejl erhållet från Stadsbyggnadskontoret, Göteborgs Stad, 2016-05-12.
16. Rapport T0-0403-0503, Citybanan i Stockholm, Stomljudsisolering av banan, Ingemansson Technology AB, 2005-05-06
17. Underlagsrapport Ljud, stomljud och vibrationer MKB Västlänken Trafikverket 2013/92338, 2014-09-01
18. Rapport 31-04900-J, Citybanan Stockholm, teknikstöd Akustik, ÅF – Ingemansson AB, 2009-01-15

Bilaga 1 Tabell Beräkningsresultat

Beräk-nings-punkt (BP)	Tåg-sträck-ning (ca km+m)	RÖK spår (plus-höjd m)	Typ av järnväg	Horison-tellt avstånd, spårmit-till närmsta del av byggnad (ca m)	Grund-läggning (plushöjd, m)	Vertikalt avstånd (ca m)	Undergrund (underlag jordartskarta Norconsult PM bilaga 4)	Trolig grund-läggning	Beräknad vibrations-nivå (mm/s vägd RMS)	Beräknad stömljuds-nivå (dBA max slow)
1	4+700	4,6	betongtunnel på berg	112	13	8,4	sand/grus	pålar till berg	0,01	28
2	4+700	4,6	betongtunnel på berg	47	17	12,4	delvis berg, delvis sand	direkt på berg/pålar till berg	0,01	40
3	4+700	4,6	betongtunnel på berg	10	13	8,4	sand/grus	pålar till berg	0,02	48
4	4+700	4,6	betongtunnel på berg	10	13	8,4	sand/grus	pålar till berg	0,04	48
5	4+700	4,6	betongtunnel på berg	53	13	8,4	sand/grus	pålar till berg	0,02	35
6	4+700	4,6	betongtunnel på berg	84	13	8,4	sand/grus	pålar till berg	0,01	31
7	4+680	4,7	betongtunnel på berg	10	13	8,3	sand/grus	pålar till fast lager	0,04	48
8	4+680	4,7	betongtunnel på berg	10	13	8,3	isälvs-sediment	pålar till fast lager	0,04	48
9	4+680	4,7	betongtunnel på berg	100	13	8,3	isälvs-sediment	pålar till fast lager	0,01	29
10	4+650	4,8	betongtunnel på grundlagd	84	13	8,2	sand/grus	pålar till fast lager	0,01	31
11	4+650	4,8	betongtunnel på grundlagd	10	13	8,2	isälvs-sediment	pålar till fast lager	0,13	44
12	4+650	4,8	betongtunnel på grundlagd	10	13	8,2	isälvs-sediment	pålar till fast lager	0,13	44
13	4+650	4,8	betongtunnel på grundlagd	70	13	8,2	isälvs-sediment	pålar till fast lager	0,01	32
14	4+625	4,9	betongtunnel på grundlagd	10	13	8,1	isälvs-sediment	pålar till fast lager	0,13	44
15	4+625	4,9	betongtunnel på grundlagd	10	13	8,1	isälvs-sediment	direkt på berg/pålar till berg	0,13	44
16	4+625	4,9	betongtunnel på grundlagd	100	13	8,1	isälvs-sediment	pålar till berg	0,01	29
17	4+625	4,9	betongtunnel på grundlagd	128	13	8,1	isälvs-sediment	direkt på berg/pålar till berg	0	27
18	4+560	5	betongtunnel på grundlagd	10	13	8	isälvs-sediment	pålar till fast lager	0,13	46
19	4+560	5	betongtunnel på grundlagd	10	13	8	berg	direkt på berg/pålar till berg	0,06	48
20	4+560	5	betongtunnel på grundlagd	93	13	8	berg	direkt på berg	0	33
21	4+560	5	betongtunnel på grundlagd	126	13	8	berg	direkt på berg	0	30
22	4+520	5,1	betongtunnel på berg	10	13	7,9	berg	direkt på berg/pålar till berg	0,02	51
23	4+520	5,1	betongtunnel på berg	70	13	7,9	berg	direkt på berg/pålar till berg	0,02	34
24	4+520	5,1	betongtunnel på berg	105	13	7,9	berg	direkt på berg	0,01	32
25	4+520	5,1	betongtunnel på berg	136	13	7,9	berg	direkt på berg	0,01	30
26	4+480	5,2	betongtunnel på berg	10	13	7,8	berg	direkt på berg	0,01	51
27	4+450	5,3	betongtunnel på berg	10	13	7,7	isälvs-sediment	direkt på berg/pålar till berg	0,02	48
28	4+400	5,5	betongtunnel på berg	10	13	7,5	berg	direkt på berg	0,02	51

Bilaga 2 Karta beräkningspunkter



1 Findwave®

Findwave® är ett numeriskt beräkningsprogram för att prediktera vibrationer och mark- och strukturburet ljud i tre dimensioner från tåg. Programmet använder Finita Differens- metoden i tidsdomän och är utvecklad av Rupert Taylor Ltd, England.

I programmet modelleras järnvägen med räls och t ex ballast. Den exciterande kraften från en tågpassage representeras för varje hjul av massor och fjädrar som rör sig med tågets hastighet över cellerna i rälen. Genom rörelseekvationer i tre dimensioner ger detta upphov till att alla typer av mekaniska vågfenomen förekommer i modellen. Vibrationer alstras både av den gravitationsbestämda lastens rörelse och av tåghjulens rörelse över spårjämnheter. Mer om programmet kan läsas i Ref. 3.

Findwave® har bland annat använts vid dimensionering av Jubilee-line's Line's tunnelbanelinje i London, Docklands Light Railway, Metron i Köpenhamn, Singapore Circle Line, Parramatta Rail Link i Sydney, Thames Link 2000 och Canton Railway i Honk Hong Kong.

I Sverige har Rupert Taylor och Findwave® tillsammans med ÅF Ljud och Vibrationer (dåvarande Ingemansson) använts bland för annat Citytunneln i Malmö för att dimensionera stomljuddämpande åtgärder. Resultatet där blev fullgott utan onödig överdimensionering. Programmet har även använts vid Järnvägsutredningen för Västlänken och vid Tvärbanan i Stockholm (Ref 4).

2 Avgränsningar och antaganden

Vid numerisk modellering måste avgränsningar och förenklingar göras. Avgränsningar görs delvis av randvillkoren. Programmet har dessutom ett tak för maximalt antal element vilket begränsat modelleringsområdet till en byggnad.

Cellernas uppbyggnad med rektangulära eller kubiska element har inneburit att samtliga strukturer har för enkelhetens skull har ortogonal karaktär dvs. att endast räta vinklar förekommer. Elementinteraktion är dock tredimensionell

Då spänning och töjning i mark och struktur är små kan linjära elastiska förhållanden antas gälla. Detta innebär bland annat fullständig överföring från mark till pålar (inga icke linjäriteter vid skiljeytan).

Då modellen är deterministisk styrs noggrannheten i resultatet av det indata som modellen byggs upp med. För resonemang kring osäkerheter se rapport, kap. 2.3.

3 Beräkningsmodell Säterigatan järnvägssträckning ca 4+600

Modellen för Säterigatan vid sträckning ca 4+600 består av kubelement, totalt 300x210x158 st. med elementstorlek 0,2x0,2x0,2 m³. Total storlek på modellen är 60 meter i x-led (vinkelrätt järnväg), 41 m i y-led (höjded) och 31,6 m i z-led (parallellt järnväg). Se Figur 1 och 2.

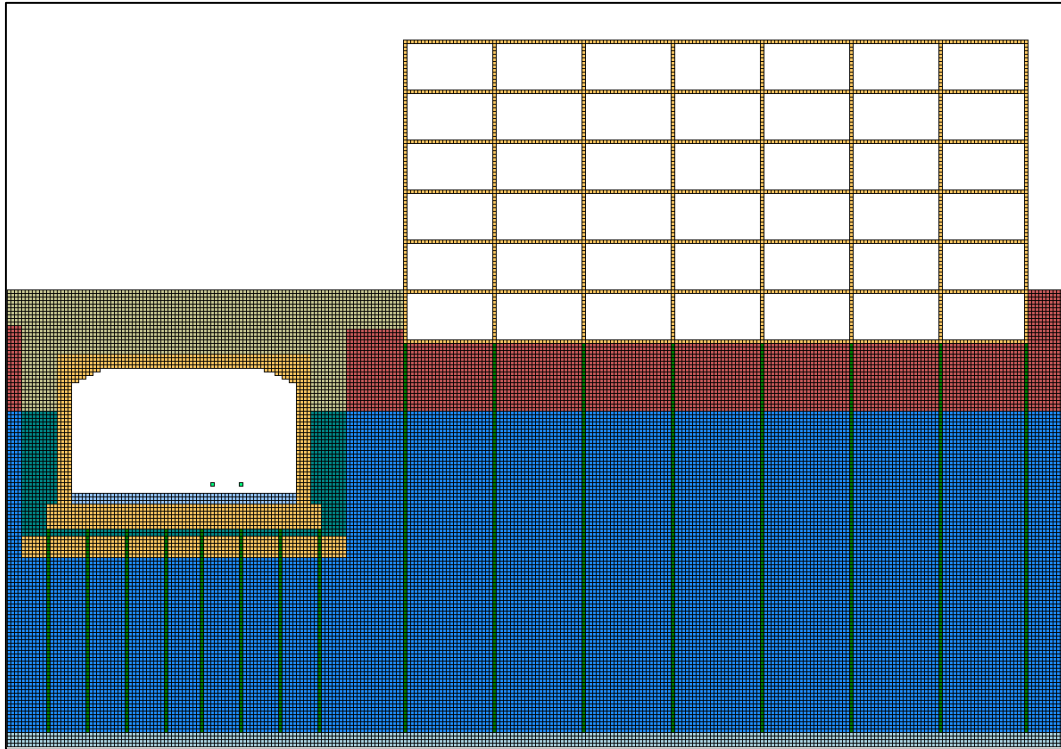
Där geometri avviker från cellstorlek, t.ex. vid tvärsnitt räls, har materialparametrar skalats för att uppnå rätt böjstyvhet och massa per meter.

Randvillkor i z=0 och z=max är ett *end-to-end* villkor vilket innebär att när tåget körs ut i ena ändan kommer det in i andra. På så sätt skapas ett oändligt långt tåg. En

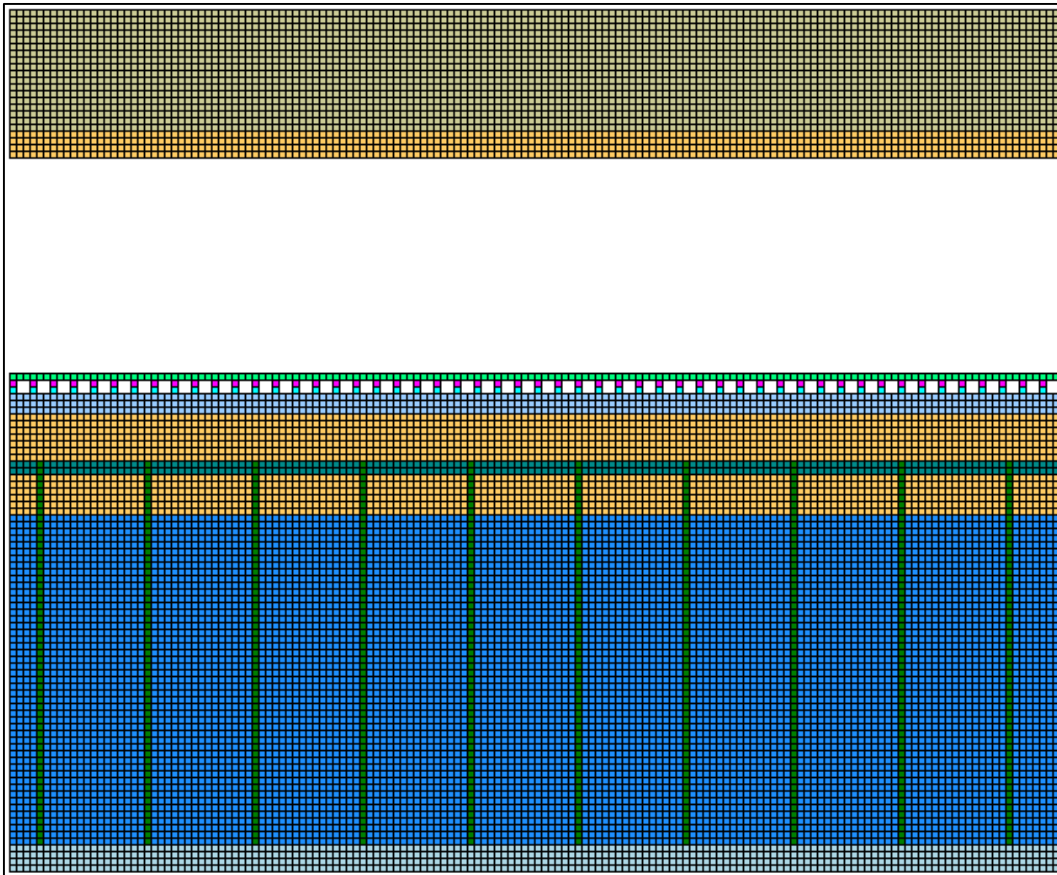
förutsättning för att detta randvillkor skall gälla är att de 5 yttersta elementen i z-led är identiska vid bägge ändarna. Reflexionsfria randvillkor har satts i $x=0$, $x=\max$, $y=0$ och $y=\max$.

Innehållet i modellen, järnväg, mark, luft och byggnad, skapas genom att varje element tillges materialparametrar med tillhörande färgkod.

Modellen körs i 32768 tidssteg om totalt 1 sekund. Tidssignalen omvandlas sedan genom Fouriertransform till frekvensdomän i tersband.



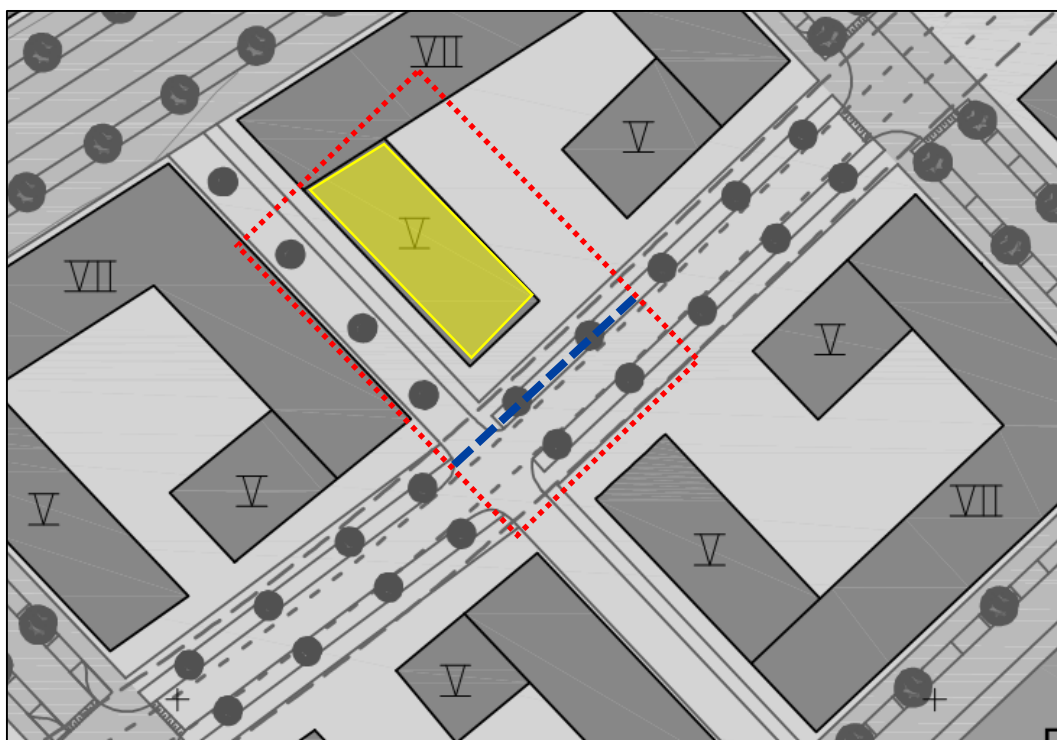
Figur 1. Tvärsnitt av modellen i XY-led.



Figur 2. Tvärsnitt av modellen i ZY-led.

Valt tvärsnitt av järnväg är ca 4+600. Här går järnvägen i pålgrundlagd betongtunnel. Horisontellt avstånd mellan byggnad och spårmitt (närmsta spår) är 10 m och vertikalt avstånd mellan byggnad och rälsöverkant är 10 m. Beräkning har gjorts för pålad tunnel.

Som underlag för geometri av tunnel har Ref. 1 använts.



Figur 3. Del av planområde som modellerats. Röd linje: avgränsning modell. Blå linje: modellerad närmsta räl. Gult område: modellerad byggnad (bearbetning från Ref.14).

4 Geometri och materialparametrar













Från de geotekniska markundersökningar som genomförts på fastigheten har Norconsult (Ref. 9) tagit fram dynamiska parametrar för marken vilka använts i modellen tillsammans med uppgifter från Ref.6. Undersökningarna är gjorda i flera punkter och lagertjocklek och parametrar varierar något varför medelvärden valts. Marken består av ett fast friktions/sandlager och bergyta antas förekomma vid 22-25 meters djup. Högsta grundvattenyta förekommer vid 7 meters djup (Ref.1) Vattenförekomsten i marken har tagits hänsyn till genom att vatten påverkar Poissons tal σ vilket gör att hastigheten för kompressionsvågen ökar.

Byggnadens geometri har skissats från detaljplan (Ref.14). Begränsningar i modellens möjliga storlek har gjort att en huskropp har modellerats (se Figur 3). Byggnaden består av en platsgjuten styv stomme (ytterväggar, innerväggar samt bjälklag) av betong 0,2 m tjock. Bottenplatta under byggnader/garage är 0,4 m tjock. Bjälklagens spännvidd är 5 meter. Våningshöjd är 3 m och högsta byggnadshöjd 15 m. Bottenplattan vilar på 32 st. spetsburna pålar av betong med tvärsnitt $0,25 \times 0,25 \text{ m}^2$. Enligt Ref.17 kan borrade stålrörspålar vara aktuella närmst tunnel men då dessa normalt fylls med betong modelleras de som betongpålar här.

Tågtunneln består av betong där väggar och tak är 0,8 m tjocka, bottenplatta är 1,2 meter tjock under bottenplattan är ett 0,4 meter tjockt packat fyllningslager. Fyllningen omsluter även tunneln. Under fyllningen ligger en 1,2 m tjock UV-gjuten tätka av betong enligt Ref.1. I första beräkningsfallet ligger tätkakan på mark och i andra beräkningsfallet står den på spetsburna pålar (80 st. betongpålar med tvärsnitt $0,25 \times 0,25 \text{ m}^2$, fördelade på 8 st i rad tvärs tunneln var tredje meter i tunnelns längdriktning) enligt Ref. 17.

I Tabell 1 redovisas materialparametrar använda i modellen tillsammans med tillhörande färgkod (se även Figur 1 och 2).

Tabell 1. Materialparametrar använda i modellen (ej omskalade). Beskrivs av skjuvmodul G , kompressionsmodul D , densitet ρ , skjuvvågshastighet c_s , kompressionsvågshastighet c_p , dämpfaktor η samt tvärkontraktionstal σ .

Material	G [Pa]	D [Pa]	ρ [kg/m ³]	c_s [m/s]	c_p [m/s]	η [-]	σ [-]	Färgkod i Findwave
Räl (UIC60) ²	1.9e+10	6.3e+10	1500	3530	6490	0,01	0.29	
Railpad ²	5.0e+7	3.0e+8	62,5	895	2190	0.05	0.40	
Sliper ²	2.7e+10	9.4e+10	2400	3350	6260	0,06	0.30	
Ballast ²	8.7e+8	2.1e+8	1800	220	340	0,03	0.15	
Luft ¹	0	1.4e+5	1.18	0	344	0,005	0.50	
Fyllning över gvy ³ och ⁴	1.8e+7	2.7e+8	1800	100	250	0,02	0.40	
Fyllning under gvy ³ och ⁴	2.1e+7	5.4e+8	2100	100	1600	0,03	0,498	
Sand över gvy ³ och ⁴	8.5e+7	2.3e+8	1700	220	370	0,02	0,21	
Sand under gvy ³ och ⁴	1.9e8	4.4e+9	1700	330	1600	0,02	0,47	
Berg ³	1.6e+10	5.4e+10	2800	2400	4400	0,005	0.29	
Betong ¹	1.16e+10	3.1e+10	2400	2200	3600	0,05	0.20	
Pålar ¹	1.16e+10	3.1e+10	2400	2200	3600	0,05	0.20	

¹ Findwave®, Rupert Taylor, Ref.15

² Brekke&Strand, Ref. 8

³ WSP Ref. 6

⁴ Norconsult Ref.9

5 Dynamiska tågparametrar

För att simulera en godstågspassage i 70 km/h har multiplar av godsvagnspassager använts. Modellens storlek har anpassats så att ett exakt antal axlar från godsvagnar ryms, vilket är en förutsättning i programmet.

Information om typiska parametrar för axelavstånd och fjäder-massa-systemet vid hjulen för godsvagnar har tagits från Ref.5 och Ref.15. Dessa parametrar är exempelvis dimensioner, ofjädrade och fjädrade massor, dynamisk styvhet och dämpning och förlustfaktor för den primära och sekundära fjädringen. Dessa redovisas i Tabell 2. Axellast för detta tågfordon är 22,5 ton. Simulering har gjorts med 30 tons axellast och resultatet visade marginell skillnad.

Även om Hamnbanan skall dimensioneras för 30 ton axellast kommer sträckan, enligt Trafikverket, inte tillåtas trafikeras med högre last inom överskådlig tid, då övriga sträckor på Hamnbanan inte är dimensionerade för denna last (Ref. 16).

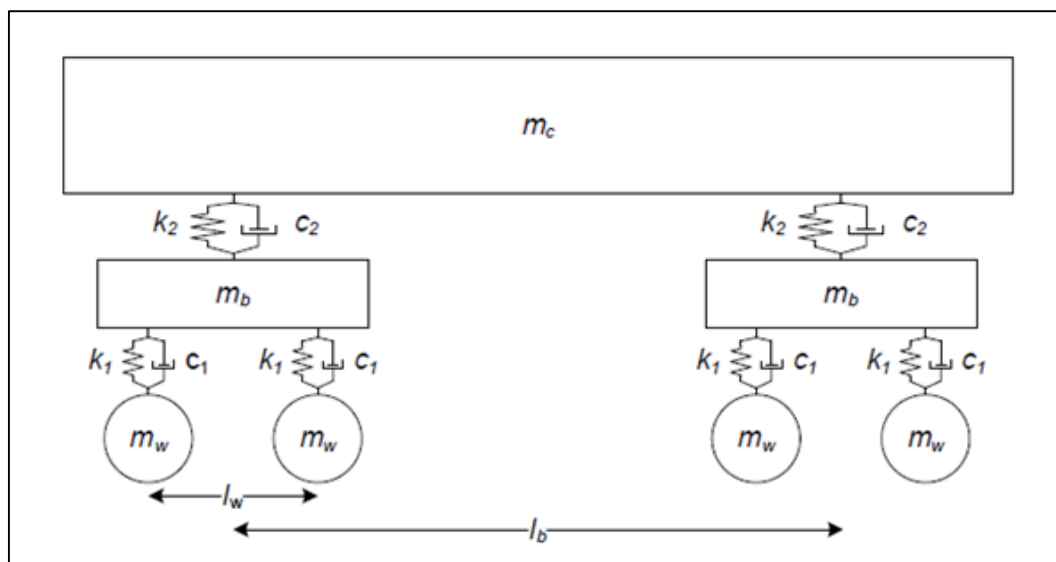
I Figur 4 visas en skiss på använt tågfordon motsvarande en godsvagn med Y25 bogie (Ref. 5).

Tabell 2. Indata för tågfordonets dynamiska egenskaper.

Fordonsparameter		Värde (fördelat per hjul)
cc-längd mellan bogie ²	l_b	8,9 m
cc-längd mellan hjul ²	l_w	1,8 m
Vagnsvikt ²	m_c	11 269,5 kg
Bogievikt ²	m_b	518 kg
Hjulvikt (ofjädrad) ²	m_w	1425 kg
Styvhet primärfjädring ²	k_1	5,5e6 N/m
Styvhet sekundärfjädring ²	k_2	5e5 N/m
Dämpning primärfjädring ²	c_1	4e4 Ns/m
Dämpning sekundärfjädring ²	c_2	2e4 Ns/m
Hertzian kontaktstyvhet hjul/räl ¹		1,2e9 N/m
Tåghastighet		30, 40, 50, 60, 70 km/h

¹ Findwave®, Rupert Taylor, Ref 15,

² RIVAS, Ref 5.



Figur 4. Skiss av det kopplade massa-fjädersystem som ett tågfordon utgör (taget från RIVAS, Ref.5).

Sliprar har i modellen lagts med cc-avstånd 60 cm och övriga dimensioner på räl, slipers och ballast enligt Ref. 8 och Ref.15.

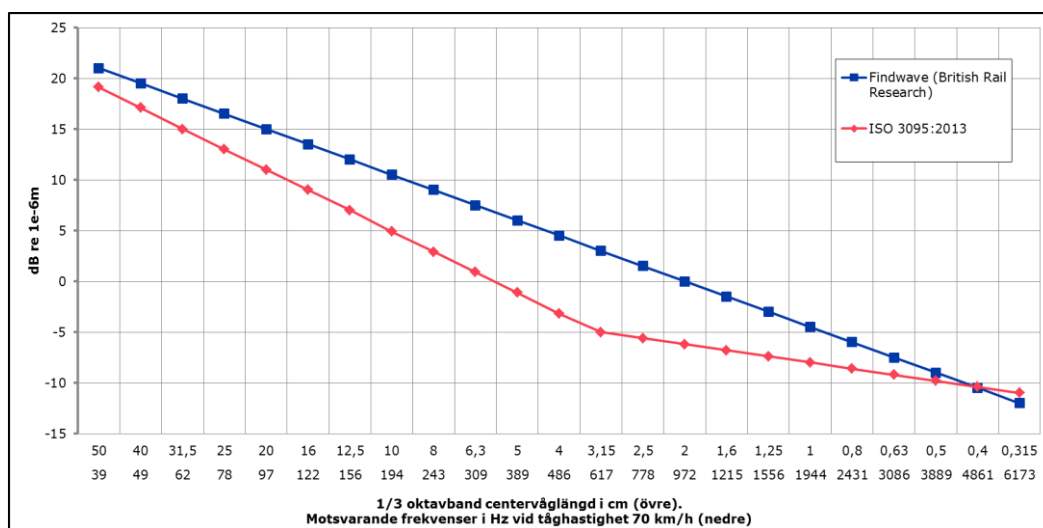
6 Ytojämnhet av räls och hjul

En avgörande faktor för hur mycket vibrationer i hörbart frekvensområde som alstras vid en tågpassage är ytojämnhet av räls och hjul. Detta förklaras ofta i ett

väglängdsspektrum som anger ett förhållande mellan vertikala ojämnheter i räls och ojämnheternas utbreddhet i rälsens längdriktning.

I Findwave används ett kombinerat spektrum för rälsens och hjulens ytojämnhet, se Figur 5. Detta spektrum härstammar från British Rail Research. I Sverige förhåller sig Trafikverket till ett spektrum från ISO 3095 (Ref.10) som beskriver rälsens ytojämnhet (Ref.11). När ytojämnhet av rälsen för aktuell kvalitetsklass K0 överskrider spektrat från ISO-standarderna med mer än 15 dB behöver rälsen slipas (Ref. 2).

Resultaten i beräkningar har därför korrigerats från British Rail Research till ISO 3095:2013 för respektive tågshastighet, enligt Ref. 7.



Figur 5. Kombinerad ytojämnhet av räls och hjul vid tågshastighet 70 km/h använd i Findwave samt rälsens ytojämnhet från ISO 3095.

7 Beräkningsresultat

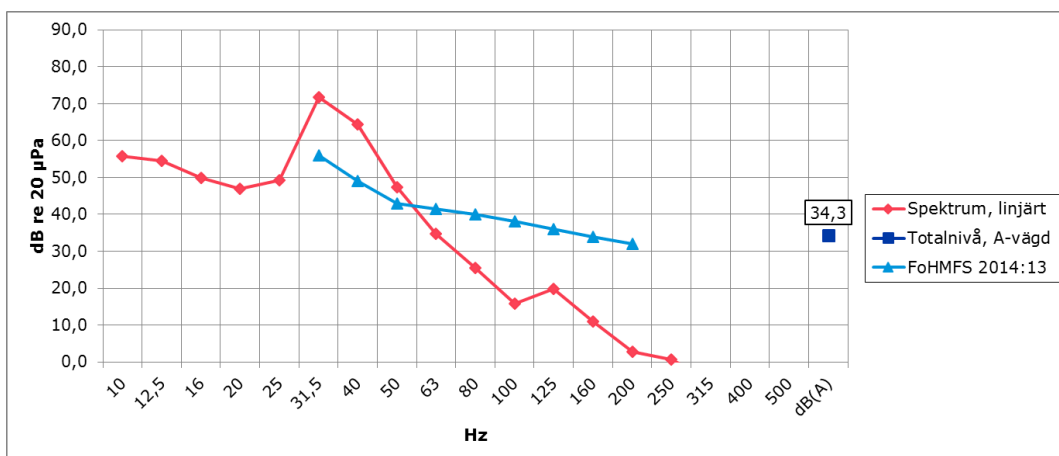
Stomljudsnivån beräknas genom ett spatialt medelvärde av vertikala vibrationshastigheter för samtliga element i betongbjälklaget under ett rum i markplan närmst järnvägen. Detta görs för tersband med centerfrekvenser från 10-500 Hz. För att få ljudtrycksnivå subtraheras 27 dB från vibrationsnivån vilket är en "tumregel" byggd på matematiska samband giltiga för frekvenser över 125Hz, ljudutstråling från golv och tak, normalmöblerat rum och takhöjd på 2,5 m och efterklangstid på ca 0,5 s (Ref.12). Lägre frekvenser har mindre ljudutstråling från golv/takplatta vilket korrigeras för med mellan 0 och 10 dB (Ref. 13).

Beräknad stomljudsnivå i markplan för byggnad 10 meter horisontellt avstånd från spårmittpunkt är 34,3 dBA re 20 µPa maximal ljudnivå slow för pålad tunnel. Se Figur 7.

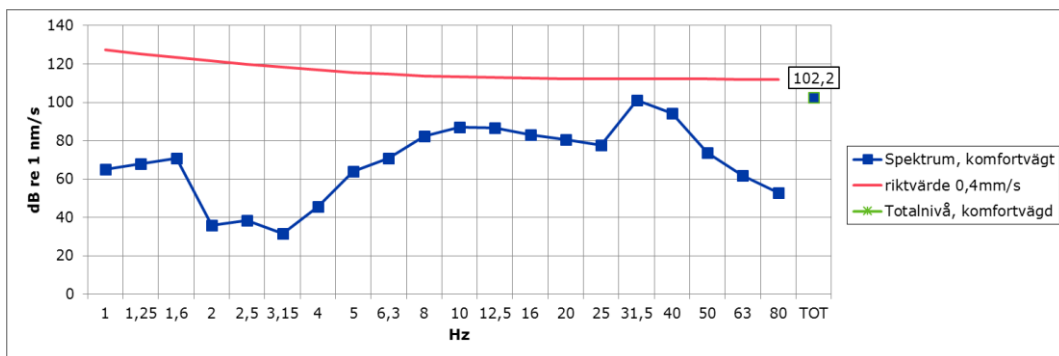
Grovt räknat blir stomljudsnivån för oslipade spår och hjul, likt modellen den semiempiriska modellen, 10 dB(A)-enheter högre.

Vibrationsnivån är den komfortvägda vertikala vibrationsnivån i bjälklag i frekvenser 1-80 Hz RMS slow. Beräknad vibrationsnivå i markplan för byggnad 10 meter horisontellt avstånd från spårmittpunkt är 102,2 dB re 1mm/s. Det motsvarar knappt 0,13 mm/s i vibrationshastighet. Se Figur 8.

Resultatet för beräkning i byggnad vid ca 4+600 bedöms representera byggnader hela sträckan 4+540 till 4+660 som ligger på samma avstånd från tåg tunnel.



Figur 7. Spektrum med beräknad stomljuds nivå och jämförelse med Folkhälsomyndighetens lågfrekvenskrav. Tåghastighet 70 km/h.



Figur 8. Spektrum med beräknad vibrationsnivå och jämförelse med riktvärde motsvarande 0,4 mm/s. Tåghastighet 70 km/h.

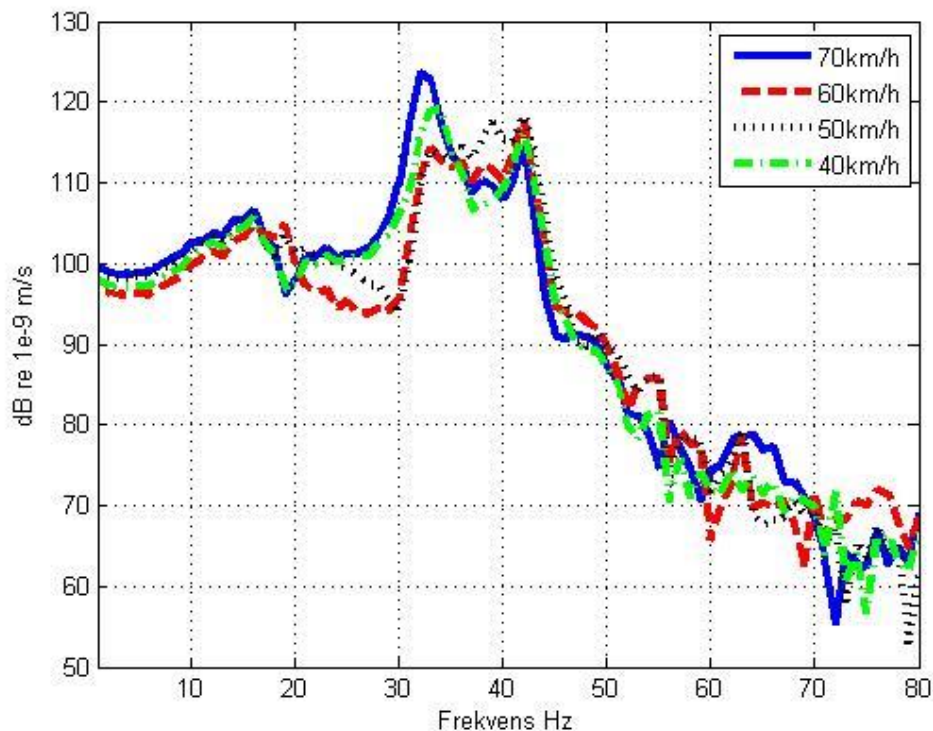
7.1 Tåghastighet

Beräkningar har gjorts för lägre tåghastigheter än planerad STH (största tillåtna hastighet). Generellt ökar vibrationer och stömljud med tåghastighet. Dock kan vissa lägre tåghastigheter ge upphov till högre nivåer på grund av att exv. sliperfrekvensen sammanfaller med resonerande frekvens i annan del av konstruktionen av tågtunnel eller byggnad. Sliperfrekvens är tåghastighet i m/s dividerat med sliperavstånd 0,6 m. För beräkningar med ÅF's empiriska modeller så ökar vibrations respektive stömljudsnivån med tåghastighet (linjärt mellan 40 och 70 km/h). Beräkningar med numeriskt beräkningsprogram Findwave visar högre stömljuds och vibrationsnivåer för 40 km/h och 70 km/h jämfört med övriga tåghastigheter. Se Tabell 3 och figur 6.

Tabell 3. Beräknad stömljudsnivå och vibrationsnivå för olika tåghastigheter.

Tåghastighet	Stömljud LpA max slow (dB(A) re 20e-6 Pa)	Vibrationer RMS 1s komfortvägt (dB re 1nm/s)
30km/h	31,6	98,1
40km/h	32,8	101,5
50km/h	31,7	98,2
60km/h	31,5	97,9
70km/h	34,3	102,2

I Figur 6 redovisas beräknade vibrationer i tunnelgolv för olika tågshastigheter.



Figur 6. Linjärt spektrum för ovägd vibrationsnivå för olika tågshastigheter beräknat i tunnelgolv.

8 Referenser till Bilaga 3

1. Ritning 108793-21-400-04532-022, Systemhandling Hamnbanan Göteborg, Sweco/Trafikverket, 2015-05-31
2. Räfflor och Vågor – Tillståndsbedömning (Tersbanddiagram), Banverket Verksamhetssystemet Handbok BVH 1588 Diarenummer F 08-1549/BA40.
3. <http://www.ruperttaylor.com/index1.htm>
4. The prediction of vibration, groundborne noise and structure-radiated noise using finite difference methods R M Thornely-Taylor Rupert Taylor Ltd, Uckfield, East Sussex, TN22 3BG, UK
5. Vibration reduction for reference cases, Deliverable D1.12, RIVAS Railway Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative project, 2013-12-16.
6. Memo, Västlänken, Dynamic Properties of Soil and rock, Bo Andréasson, WSP Civils, Göteborg 2004-11-24
7. Findwave User Manual 7th Issue, Rupert Taylor Ltd, 2014-05-13
8. Calculation of Insertion Loss in the Botniabanen, Report, Brekke & Strand, Oslo 2002-10-03
9. Mejlkorrespondens med Joel Wessman Norconsult, 2015-06-22
10. Svensk Standard SS-EN ISO 3095:2013 Järnvägar – Akustik – Mätning av bulleremission från spårfordon (ISO 3095:2013), 2013-08-19
11. Telefonsamtal med Johan Jonsson, Trafikverket, 2015-06-17
12. Prediktering av stomljud på sträckan Pölsebo-Eriksberg Hamnbanan Göteborg, dubbelspår Rapport Objekt nummer 108793 , Trafikverket/WSP, 2014-10-19
13. Internt ÅF material

14. Illustrationsritning, Detaljplan för järnvägstunnel och bostäder vid Säterigatan inom stadsdelen Sannegården i Göteborg, Göteborgs Stad, Stadsbyggnadskontoret, 2015-06-17
15. Findwave 2014, Rupert Taylor Ltd
16. Samtal med Karl Holmström, Biträdande projektledare Hamnbanan, Trafikverket, 2015-06-11
17. Rapport grundläggning av byggnader och järnvägstunnel inom detaljplan för säterigatan, uppdragsnummer PM2343005612, granskningshandling, Sweco Civil AB, 2016-03-30