

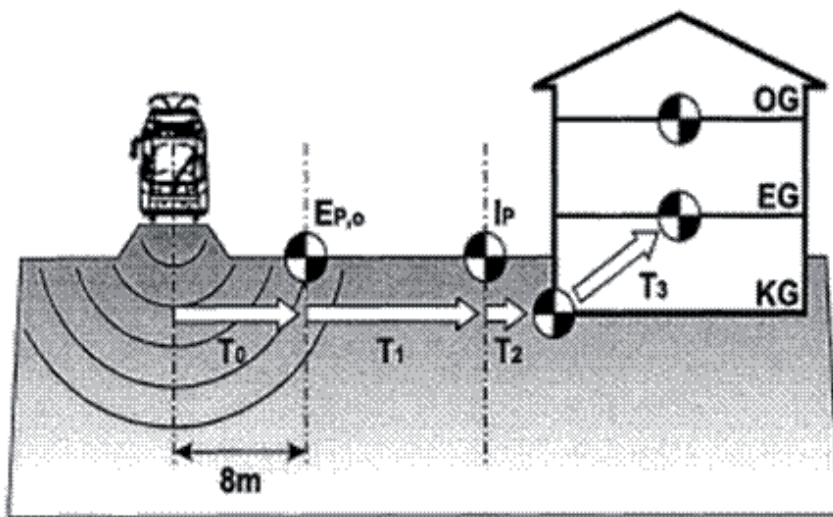
Projektowanie rozwiązań wibroizolacyjnych dla szynowego transportu miejskiego

Matthias Scholz

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie rozwiązań technicznych, które służą ochronie budynków oraz osób w nich przebywających przed drganiami akustycznymi i materiałowymi, wibracjami i hałasem wytwarzanym przez pojazdy szynowe.

Omówienie tych rozwiązań stanowi specjalne zadanie przy projektowaniu systemów transportu szynowego oraz podkreślenie wagi tego zagadnienia jest szczególnie istotne z uwagi na powszechność tego zjawiska. Nie bez znaczenia jest również aspekt ekonomiczny wynikający z kosztów projektowania, realizacji i eksploatacji.

Artykuł jest zmodyfikowaną wersją referatu z konferencji „Zintegrowany system transportu miejskiego z 27 i 28 maja 2010 roku.



1. Przebieg emisji, transmisji i imisji

Aspekt ekonomiczny:

- Rozwiązania chroniące przed drganiami i hałasem emitowanymi przez transport szynowy są zazwyczaj kosztowne, jednak przy dokładnej i poprawnej analizie kosztów całkowitych danej inwestycji kolejowej często koszty te okazują się stosunkowo niewielkie. Dlatego też zastosowanie Mass-Spring-Systems (rozwiązanie techniczne: układ masa-sprężyna), choć podnosi koszty całkowite inwestycji, niesie ze sobą wymierne korzyści.
- Drgania mają negatywny wpływ nie tylko na ludzi, ale także na:
 - budynki i konstrukcje – na przykład historyczny most kolejowy, już uszkodzony w wyniku wcześniejszej eksploatacji tunel, grunty wrażliwe na osiadanie, konstrukcje będące pod ochroną konserwatora zabytków,
 - wszelkiego rodzaju obiekty techniczne wrażliwe na drgania.

Emisja

Jeżeli pojazd z bardzo dobrymi kołami porusza się po bardzo dobrych torach, mamy do czynienia z niewielkimi oddziaływaniami dynamicznymi.

W takim przypadku obliczenia wykonujemy wykorzystując wzory Zimmermanna, a odkształcenia ustalamy w oparciu o normalną analizę statyczną.

W rzeczywistości jednak ani koła, ani szyny nie są idealne. Koła ulegają deformacji i ostatecznie przyjmują kształt owalny lub wielokątny. Szyny nie są doskonale proste. Podłoże nie jest homogeniczne. W wyniku tych czynników masy koła oraz osie poruszają się pionowo, wywołując oddziaływanie dynamiczne koła na szynę. Pociąg jadący ze stałą prędkością wysyła fale drganiowe. Przyjrzyjmy się temu na przykładzie

Tab. 1. Dynamiczne związki przyczynowo-skutkowe sił między kołem a szyną

Dynamiczne wielkości fizyczne:	siły naprężenia odkształcenia wibracje
stanowią funkcję:	dynamiki pojazdu niedoskonałości kształtu koła obciążenia koła nieresorowanej masy wagonu wymiarów wszystkich elementów szyny i konstrukcji nośnej mas wszystkich elementów dynamicznych właściwości elementów elastycznych

niewspółśrodkowego koła. Przyjmijmy, że koło ma średnicę 0,985 m oraz obwód 3 m. Jeśli pociąg jedzie z prędkością 30 m/s = 108 km/h, koło obraca się 10 razy na sekundę. Wytwarza to fale o częstotliwości 10 Hz. Można więc wyznaczyć powyższą częstotliwość w funkcji parametrów geometrycznych pojazdu szynowego i jego prędkości.

Tę relację przedstawia wykres na rysunku 3.

Jak widać na powyższym przykładzie, proste obliczenia statyczne są niewystarczające. Zjawisko „emisji szyny” jest bardzo skomplikowane. Konieczna jest dobra znajomość tego zjawiska, aby móc przeprowadzić jego szczegółową analizę i wyciągnąć praktyczne wnioski.

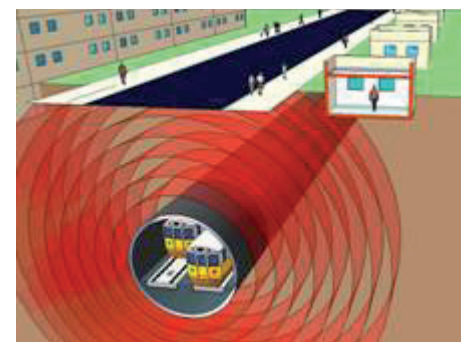
Transmisja

Siły dynamiczne działające na nawierzchnię wytwarzają drgania, które przenoszone są falami na grunt jako wstrząsy. Owe drgania zwane są drganiami akustycznymi materiałowymi.

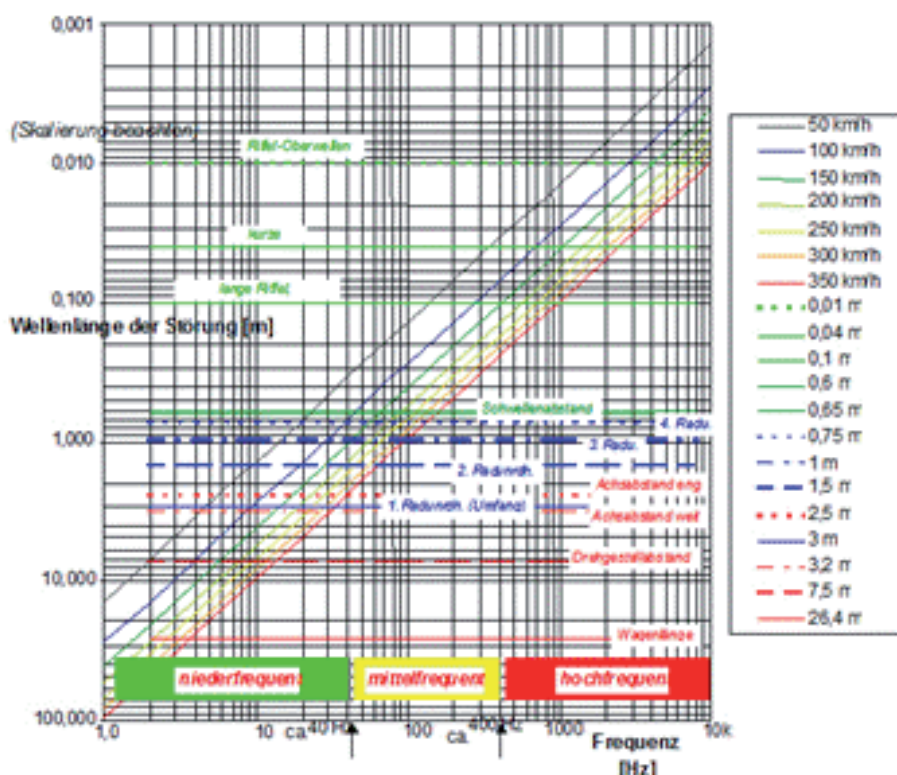
Występują trzy rodzaje fal: fale ciśnieniowe, fale poprzeczne i fale powierzchniowe, których długość zmniejsza się wraz z odległością. Energia rozprzestrzenia się na coraz większym obszarze.

Zachodzi zależność między rozprzestrzenianiem się drgań i wstrząsów w gruncie, a:

- sztywnością gruntu,
- tłumieniem przez materiał,
- gęstością objętościową gruntu,
- warstwowością gruntu,
- wodą gruntową.



2. Propagacja fal wstrząsowych w gruncie



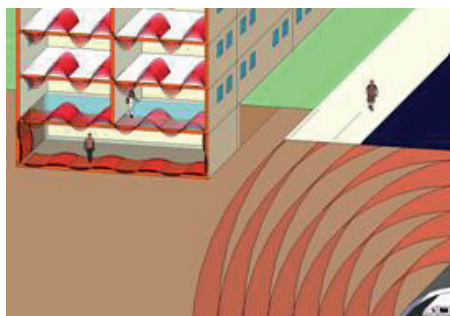
3. Związek między długością fali, prędkością jazdy oraz częstotliwością

Imisja

Z gruntu propagacja drgań przechodzi na fundamenty i ściany piwniczne okolicznych budynków. Stąd drgania przenoszą się na całe budynki.

Budynki składają się z wielu elementów konstrukcyjnych. Owe elementy posiadają tzw. częstotliwości własne, które są wzmacniane przez drgania.

Zwyczajne stropy w domach mieszkalnych posiadają na przykład częstotliwość własną o wartości 25 Hz. Wibracje jadącego tramwaju zawierają często część tej częstotliwości. Strop drga wtedy z tą częstotliwością mocniej niż są wstrząsane fundamenty. Często drgania na górnych piętrach są silniejsze niż na niższych. To zjawisko zwane jest rezonansem. Efekty rezonansowe są szczególnie niekorzystne. Muszą one koniecznie zostać wzięte pod uwagę przy projektowaniu rozwiązań ochronnych. Konsekwencją rezonansu są wtórne drgania akustyczne powietrzne, które różnią się od normalnych akustycznych drgań powietrznych. Wewnątrz budynku praktycznie nie ma możliwości ochrony przed wtórnymi drganiami powietrznymi wywołanymi przez ruch pociągów.



4. Wpływ drgań na budynek, wzmocnienie drgań

Teoria ograniczania negatywnych wpływów – Założenia

Zasadniczo, łańcuch emisji-transmisji-imisji można przerwać w każdym punkcie.

Przy pojeździe

Należy stwierdzić, że można podjąć działania i zastosować środki techniczne przy pojazdach, które mogą ograniczyć emisję drgań.

Polega to na:

- kontroli stanu technicznego kół, czyli ograniczeniu deformacji kół.
- wyborze taboru o „najmniejszej nierosowanej masie zestawu kołowego”

Należy podkreślić, że obciążenie osi pojazdów ma niewielki wpływ na siłę emisji drgań akustycznych materiałowych.

W miejscu emisji

Ważne jest stosowanie rozwiązań ochronnych u źródła emisji. Minimalizowana jest wtedy siła drgań i wstrząsów albo/hoặc ich przenoszenie na grunt. Z reguły najłatwiej przyjmować rozwiązania antywibracyjne działające u źródła emisji, szczególnie w przypadku projektu i realizacji nowych odcinków. Modernizacja istniejących nawierzchni jest już znacznie bardziej skomplikowana i kosztowniejsza.

W miejscu transmisji

Minimalizacja drgań w miejscu transmisji polega na przerwaniu ich propagacji. Efekt ten można osiągnąć dzięki umieszczeniu masywnej bariery, czyli ciężkiej, masywnej, sztywnej ściany betonowej w podłożu lub ekstremalnie podatnej warstwy, co przerywa transmisję

wibracji poprzez grunt do zabudowań w pobliżu trasy.

W miejscu imisji

Możliwe jest także zaprojektowanie rozwiązań technicznych na budynku będącym pod wpływem negatywnych oddziaływań, celem jego ochrony przed wstrząsami z podłoża. Istnieją tutaj dwa sposoby. Tańszym wariantem jest izolacja jedynie górnych pięter budynku. W tym przypadku w konstrukcji obiektu umieszczania jest elastyczna warstwa. Wstrząsy mogą się rozprzestrzeniać w piwnicy i fundamentach, nie docierają jednak prawie do wyższych pięter. Droższy, ale skuteczniejszy wariant polega na osadzeniu warstwy elastycznej w podłożu, okalając cały budynek. Dzięki temu cały budynek jest ochroniony przed drganiami. Wibracje nie wnikają do konstrukcji budynku. Dzięki odpowiedniemu doborowi środków i materiałów drgania są zupełnie nieodczuwalne i niesłyszalne dla mieszkańców.

Dużą wadę takiego rozwiązania stanowi jego ograniczona skuteczność, tylko do jednego konkretnego budynku. Z reguły stosuje się takie rozwiązania jedynie w przypadkach, kiedy budynek jest wykonywany przy już istniejącej trasie transportu szynowego.



5. Lenbach Gärten w Monachium, posadowienie na warstwie elastycznej Calenberg Cimax – układanie warstwy w wykopie

Zasady: zwiększenie elastyczności, zwiększenie masy

Elastyczność zwiększa podatność torów, przez co drgania i wstrząsy są minimalizowane już w miejscu ich powstawania, czyli przy kontakcie koła z szyną. Ponadto miękka warstwa oddziela od siebie dwie sztywne, przez co dochodzi do zakłócenia przenoszonej energii drgań. Dodatkowe masy podnoszą opór przeciw drganiom – tak zwaną impedancję, co także zakłóca przenoszenie energii drgań. Najkorzystniejsze efekty przynosi oczywiście zwiększenie zarówno elastyczności jak i masy.

Ryzyko przesunięć częstotliwości z powodu zastosowania elementów elastycznych i dodatkowych mas

Podczas doboru środków i elementów mających przeciwdziałać drganiom należy pamiętać o wyjątkowo istotnym aspekcie: przez umieszczenie dodatkowych elementów elastycznych przesuwają się istniejące częstotliwości własne

oraz powstają nowe, dodatkowe częstotliwości własne i możliwość powstawania rezonansu. W efekcie część częstotliwości emisji, które wcześniej nie były krytyczne, może nagle przestoczyć się w niepożądane szkodliwe emisje. To zjawisko należy koniecznie uwzględnić przy wymiarowaniu projektowanych elementów antywibracyjnych lub ochronnych przy torach, nawierzchni lub izolowanych budynkach.

Skuteczność rozwiązań antywibracyjnych

Zasadniczo można stwierdzić, że:

- im więcej masy umieszczone jest nad elementem elastycznym, tym lepiej,
- im bardziej miękki jest element elastyczny, tym lepiej.

Z tego wynika (w niewielkim uproszczeniu): im głębiej umieszczony jest element elastyczny, tym większy jest efekt tłumienia. Skuteczność w typowych sytuacjach pokazuje rysunek 7.

Zasadniczo można stwierdzić, że:

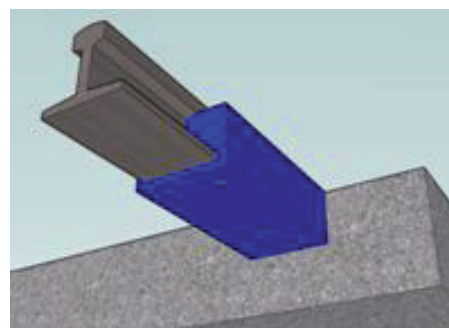
- mata pod podłoże toru jest skuteczniejsza niż mata pod podkład,
- mata pod podkład jest skuteczniejsza niż mata podtorowa.

Realizacja rozwiązań antywibracyjnych: Elastyczny punkt podparcia o niewielkiej sztywności i ciągła płyta podtorowa

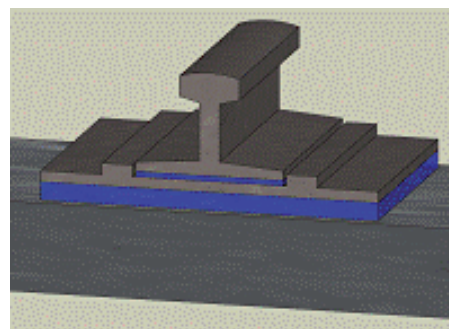
Najprostszym rozwiązaniem jest montaż elastycznego punktu podparcia – mocowania szyny o niewielkiej sztywności. Nie wystarczy jednak użycie elastycznej płyty podtorowej o sztywności ok. 50 kN/mm. Konieczne jest osiągnięcie sztywności w punktach podparcia o wartości co najwyżej ok. 25 kN/mm lub mniej. W tym celu konieczne jest zastosowanie odpowiedniego mocowania.

Elastyczne obudowy na podkłady – tzw. „buty podkładowe”

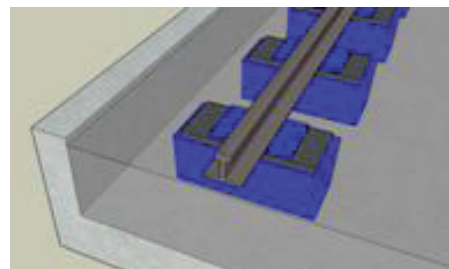
W tej technologii punkty podparcia są zamocowane do bloków podkładowych. Bloki te są pokryte elastyczną powłoką. Efekt tłumienia takiej konstrukcji jest większy niż w metodzie elastycznego podparcia. Jako rozwiązanie ochronne przeciw drganiom i wstrząsom nie jest jednak wystarczające.



8. Schemat elastycznego mocowania



9. Ciągła, nieprzerwana podkładka pod szynę



10. Twarda nawierzchnia bezpodsypkowa z elastycznymi „butami podkładowymi”

Generell gilt

Bestehende Zwischenschicht



mit besserer Wirkung



Schwellensohle



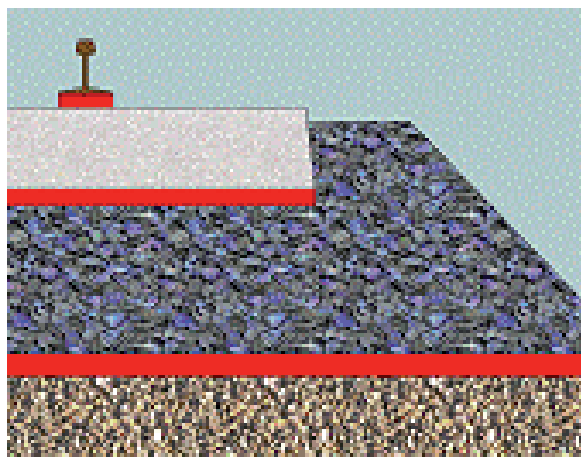
mit besserer Wirkung

Gleisbettmatte



mit besserer Wirkung

Mass-Feder-System



6. Kolejność skuteczności rozwiązań antywibracyjnych

Generell gilt:

Elastische Zwischenschicht



mit besserer Wirkung



Schwellensohle



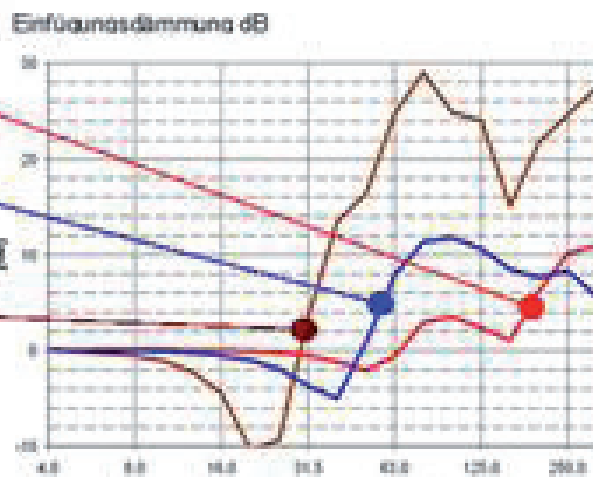
mit besserer Wirkung

Gleisbettmatte



mit besserer Wirkung

Mass-Feder-System

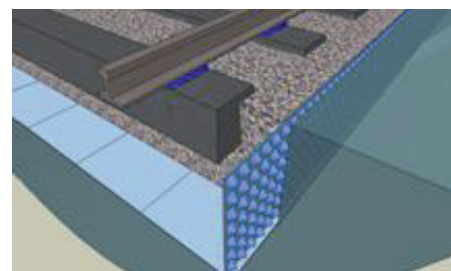


7. Jakościowa skuteczność rozwiązań antywibracyjnych

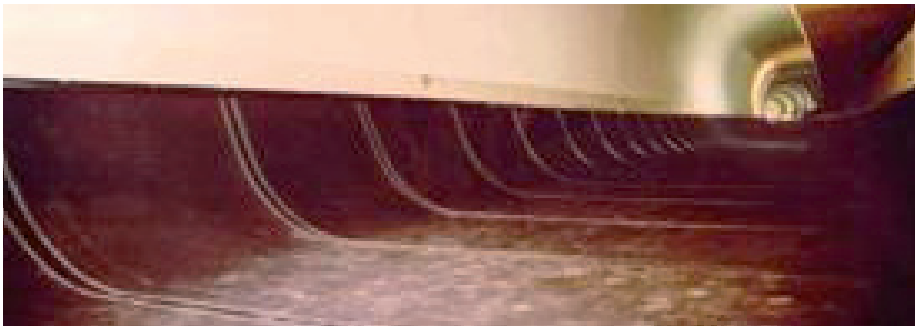
Maty wibroizolacyjne pod podłożem torowym

Maty wibroizolacyjne pod podłożem torowym stosowane są zarówno w przypadku nawierzchni bezpodsypkowych jak i podsypkowych.

Dzięki zastosowaniu maty pod podłożem toru przerywany jest kontakt (a tym samym transmisja drgań) między podłożem a nawierzchnią. Mata stanowi rodzaj wanny, która całkowicie izoluje podłoże toru z tłucznia (podsypki).



11. Nawierzchnia podsypkowa z matą wibroizolacyjną pod podłożem torowym



12. Jednotorowy tunel metra wyposażony w matę pod podłożem torowym przed ułożeniem podsypki

jest znacznie lżejsza od pociągu (licząc masę na m²). Typowy ciężar płyty wynosi około 1 do 2 ton na metr. Ciężar pociągu to około 3 t/m. Pociąg jest więc cięższy niż płyta Light Mass-Spring-System.

Mass-Spring-System betonowany na miejscu na ciągłej warstwie wibroizolacyjnej

Realizując konstrukcję jako Light Mass-Spring-System betonuje się go z reguły na miejscu na ciągłej, szczelnej warstwie mat wibroizolacyjnych pod podłożem toru.



13. Tor podsypkowy na moście przed wykonaniem nawierzchni

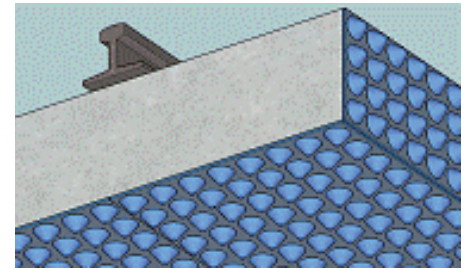
Uwagi wstępne dotyczące tzw. Light Mass-Spring-System

Najlepsza skuteczność wibroizolacyjna osiągnięta jest przez równoczesne zwiększenie masy i zredukowanie sztywności torów. Efekt nazywany jest Mass-Spring-System (układ masa-sprężyna). Mass-Spring-System składa się z dwóch podstawowych elementów: co najmniej jednej dodatkowej masy na torowisku oraz warstwy sprężystej. Dodatkową masę w tym wypadku zazwyczaj stanowi płyta betonowa.

Istnieją dwa rodzaje Mass-Spring-Systems: Light Mass-Spring-System (lekki system masa-sprężyna) oraz Heavy Mass-Spring-System (ciężki system masa-sprężyna).

Light Mass-Spring-System

Lekki system masa-sprężyna z reguły składa się z cienkiej płyty betonowej położonej na elastycznej warstwie. Płyta w tym systemie



17. Detal: Płyta na macie na przykład USM 1000W

Mass-Spring-System betonowany na miejscu nałożysku paskowym lub punktowym

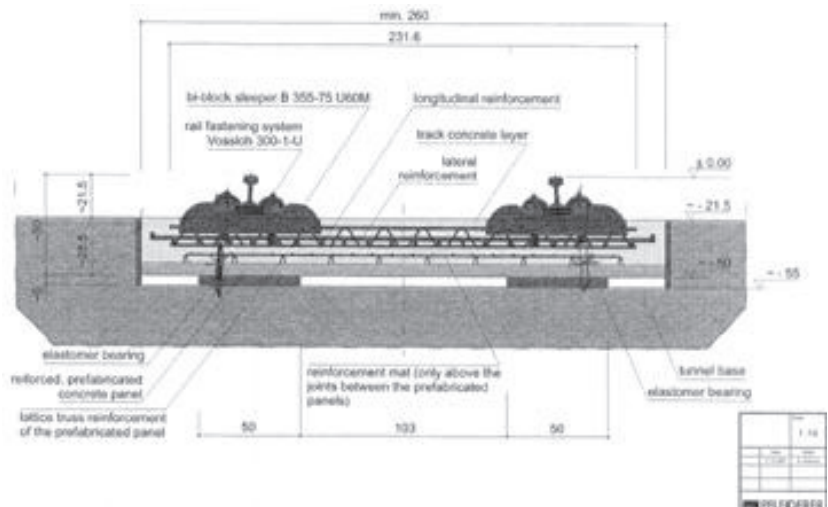
Light Mass-Spring-System może zostać wykonany także nałożyskach paskowych lub pojedynczych punktowych. W zależności od grubości płyty, w ten sposób wykonywany jest także Heavy Mass-Spring-System – ciężki system masa-sprężyna.



14. Light Mass-Spring-System na macie pod podłożem toru USM 1000W przed betonowaniem



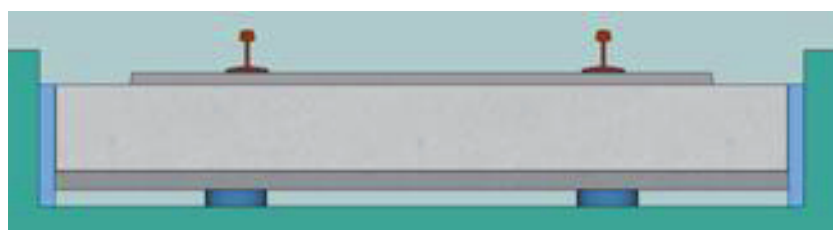
15. Light Mass-Spring-System po szalunku



18. Light Mass-Spring-System nałożyskach paskowych lub punktowych, System Pfeleiderer Rheda City



16. Light Mass-Spring-System na macie USM 1000W w miejscu rozjazdu

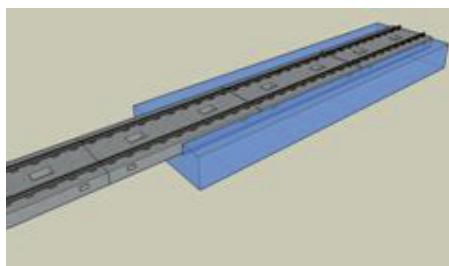


19. Przekrój przez wykończony Mass-Spring-System

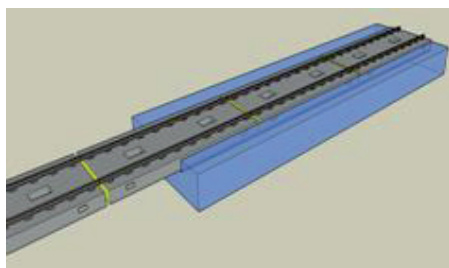
Heavy Mass-Spring-System

Ciężki system masa-sprężyna składa się z ciężkiej płyty betonowej położonej na elementach elastycznych. „Ciężki” oznacza tu, że konstrukcja nośna posiada masę o ciężarze 2,5 tony lub więcej. Tym samym system jest mniej więcej równie ciężki jak pociąg lub cięższy od pociągu. Dotychczas wykonano już systemy o ciężarze 5 ton/metr na trasach o bardzo wysokich wymaganiach technicznych.

Istnieje bardzo wiele różnych wariantów konstrukcji Heavy Mass-Spring-Systems dostosowanych technologicznie do specyficznych wymagań danych inwestycji. Spośród nich przedstawiono poniżej najczęściej stosowane.



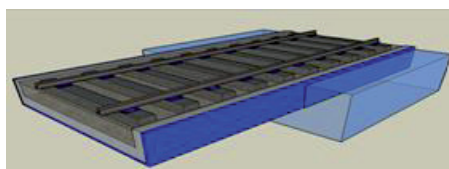
20. Heavy Mass-Spring-System z ciągłą płytą o dowolnej długości; płyta podzielona jest jedynie przez przerwy robocze (w wyniku betonowania); na całej długości jest monolityczna



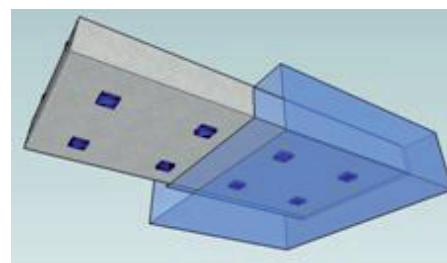
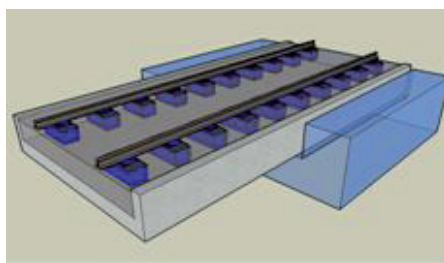
21. Heavy Mass-Spring-System składający się z oddzielnych płyt

Różnice między tymi wariantami – „oddzielne płyty” i „ciągła płyta” – wynikają nie tylko z ich konstrukcji, ale również ze sposobu przenoszenia drgań. Rozwiązanie ze zdylatowanych płyt może drgać również w kierunku podłużnym.

W wyjątkowych sytuacjach stosowany jest system Heavy Mass-Spring-System z nawierzchnią podsypkową. W ten właśnie sposób w latach 2005-2007 w Berlinie zostało wyciszzone metro pod budynkiem Parlamentu. Wybrano ten właśnie system, ponieważ planowano w przyszłości dalszą rozbudowę trasy, co w wypadku nawierzchni podsypkowej jest łatwiejsze i tańsze w wykonaniu.



22. Heavy Mass-Spring-System z nawierzchnią podsypkową



23 i 24. Heavy Mass-Spring-System z elastycznie posadowionym blokiem podkładowym

Także stosując powyższy wariant Heavy Mass-Spring-System z elastycznie posadowionym blokiem podkładowym można uzyskać bardzo dobre efekty wibroizolacyjne. Jest on jednak bardzo skomplikowany w wykonaniu oraz kosztowny.

Wymiarowanie rozwiązań technicznych tłumiących emisję drgań: Częstotliwość drgań własnych, częstotliwość dostrojeniowa

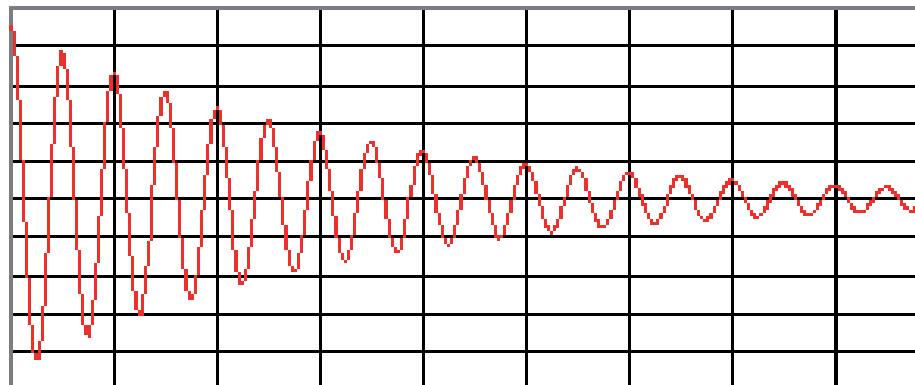
Mass-Spring-System (układ masa-sprężyna) charakteryzuje się częstotliwością drgań własnych, inaczej zwaną częstotliwością dostrojeniową. W tym wypadku jest to częstotliwość drgań skierowanych w kierunku pionowym systemu, którym on podlega wskutek uderzeń, jednak bez obciążenia go taborem kolejowym. Jednostką pomiaru jest Hz – drgania na sekundę. Tłumienie drgań powoduje, że wartość amplitudy drgań maleje w czasie.

Wartość częstotliwości dostrojeniowej sys-

temu jest istotna z tego powodu, że jest najważniejszym kryterium uwzględnianym w ocenie skuteczności zastosowanych rozwiązań technicznych służących do tłumienia drgań systemu.

Wartość parametru tłumienia emitowanych drgań jako kryterium oceny skuteczności rozwiązań technicznych służących do tłumienia vibracji systemu

Skuteczność technicznych rozwiązań służących do tłumienia drgań systemu oceniana jest na podstawie parametru tłumienia emitowanych drgań. Parametr tłumienia emitowanych drgań określa, w jaki sposób zmienia się vibracja systemu po zastosowaniu technicznych rozwiązań służących do tłumienia drgań systemu. Porównane zostaje drganie systemu bez użycia rozwiązania technicznego z jego zachowaniem przy zastosowaniu metod pozwalających na izolowanie drgań.



25. Zjawisko zanikania wychylenia systemu (wygaszania) od pionu podczas jego drgania



26. Parametr tłumienia emitowanych drgań dla różnych wartości częstotliwości dostrojeniowej

Parametr tłumienia [dB] = drgania bez systemu tłumienia [dB] – drgania z systemem tłumienia [dB].

Wszystkie wyżej wymienione wielkości są funkcjami częstotliwości drgania systemu.

Wielkość wartości tłumienia drgań systemu uzależniona jest w wysokim stopniu od częstotliwości dostrojonej systemu. Na rysunku nr 26 przedstawione zostały w uproszczony sposób przykładowe wykresy częstotliwości dostrojonej o wartości od 7 Hz do 20 Hz.

Po uproszczeniu przyjąć można, że:

- niska wartość częstotliwości dostrojonej systemu = wysoki stopień izolacji drgań systemu,
- wysoka wartość częstotliwości dostrojonej systemu = niski stopień izolacji drgań systemu.

Dla przedziału drgań o niskiej częstotliwości parametr tłumienia drgania przyjmuje wartość ujemną, co oznacza, że w tym przedziale drgania zostają wzmocnione poprzez zastosowane rozwiązanie. Skutek zatem jest odwrotny od zamierzonego – system zamiast tłumić drgania, dodatkowo je wzmacnia.

O pozytywnym działaniu systemu tłumienia można mówić dopiero, kiedy parametr tłumienia drgania jest większy o około 1,5 raza od częstotliwości dostrojonej systemu. Przy 3-krotnej wielkości wartości częstotliwości dostrojonej tłumienie drgań osiąga wartość ok. 20dB, co powoduje zmniejszenie drgania systemu o około 10%.

Osiągnięcie wysokiego stopnia tłumienia jest kosztowne – każdy „wytłumiony decybel” stanowi wymierną wartość kosztorysową.

Wysoki stopień tłumienia = wysoka skuteczność = wysokie koszty.

Analogicznie każda jednostka częstotliwości, o którą obniży się wartość dostrojonej systemu stanowi realny koszt. Istotne zatem jest, aby heavy Mass-Spring-System (układ masa-sprężyna) stosować jedynie wtedy, kiedy jest to konieczne. Dla takiego układu niezbędna jest znajomość jego właściwości izolacji drgań, czyli wartości parametru tłumienia drgania systemu oraz skuteczność zastosowanej w tym celu metody. Aby móc określić te parametry konieczne jest dokonanie prognozy drgań systemu.

Prognozowanie, obliczenia oraz modelowanie właściwości dynamicznych pojazdu i toru jazdy

Często inwestor zlecający zaprojektowanie i wykonanie danego odcinka, na którym konieczne jest uwzględnienie rozwiązań wibroizolacyjnych, nie podaje w dokumentacji przetargowej dokładnych danych dotyczących konkretnych środków technicznych i metod. Raczej stawiany jest (szczególnie w przypadku tak zwanych przetargów i projektów funkcjonalnych „zaprojektuj i wybuduj”) wymóg ograniczenia (do danych

wartości) drgań wpływających na środowisko znajdujące się w sąsiedztwie źródła drgania lub podawane są minimalne wartości tłumienia drgań, które należy spełnić. Wykonawca – na przykład firma budowlana lub dostawca elementów elastycznych, mat itp. – sam musi stwierdzić i obliczyć dokładne wartości wibroizolacji i zwymiarować konstrukcje. Taką koncepcję, obliczenia i projekt systemu musi wykonać wyspecjalizowany projektant i doradca.

Obliczenia

Aby odpowiednio zwymiarować konstrukcję obliczenia przeprowadzane są na tzw. modelu impedancji (model pozornego oporu) w dolnym przedziale częstotliwości.

- System podzielony zostaje na elementy (m.in. sprężyny, tłumiki, masy (ciała fizyczne), belki obciążone zginaniem itd.), dla których znana jest ich reakcja wskutek obciążenia dynamicznego.
- Wyżej wymienione elementy składane są w całość w odniesieniu do rzeczywistej konstrukcji. Przy składaniu kompleksowych elementów złożonych z tłumika, sprężyny i masy stosuje się zasadę szeregowości i równoległości układu.
- Po przeprowadzeniu takiego procesu znana jest wartość impedancji górnej krawędzi szyny w miejscu działania sił między kołami pojazdu a szyną, a także wartość impedancji koła w miejscu jego nacisku na szynę. Z tego wynika, że znana jest reakcja systemu wskutek sinusoidalnego oddziaływania obciążenia w miejscu przyłożonej siły działającej na system.
- W ten sposób otrzymać można rozwiązanie układu obliczeń dla tego systemu. W podobny sposób można wyznaczyć bardziej skomplikowane rozwiązania dla Mass-Spring-System, uwzględniając np. linie ugięcia szyny kolejowej, zdeformowane koła pojazdu itd.

Do tego celu wykorzystać należy odpowiednie algorytmy matematyczne (takie jak np. wzory szybkiej transformacji Fouriera).

- Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawić można jako wykres w zależności od czasu – np. obniżenie punktu podparcia podczas przejazdu pociągu, bądź jako wykres przedziału częstotliwości drgań – np. jako zakres działania prędkości drgania szyny.

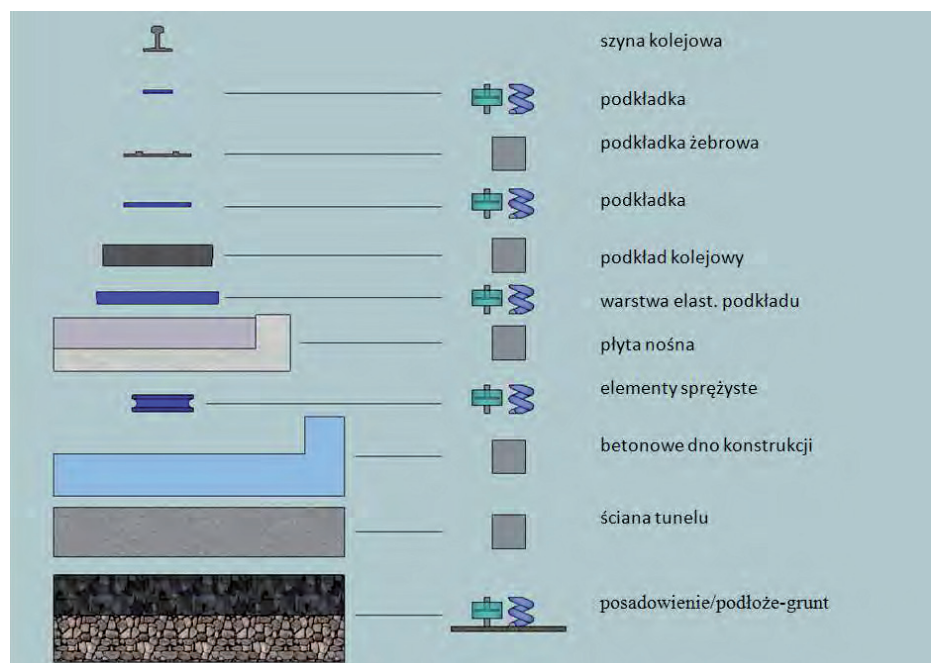
Istotne jest, aby uwzględnić przy tym oddziaływanie wszystkich właściwości elementów systemu zależnych od częstotliwości drgań oraz wszystkich czynników działających na system badanego systemu, takich jak:

- właściwości dynamiczne pojazdu,
- zdeformowane koło pojazdu szynowego,
- nieresorowana masa zestawu kołowego,
- wymiary wszystkich elementów zarówno szyny jak i konstrukcji, na której posadowiona jest szyna,
- ciężar elementów konstrukcji,
- właściwości dynamiczne wszystkich elementów sprężystych.

Dzięki uwzględnieniu wszystkich ważnych czynników wpływających na przeprowadzane obliczenia dopuszczalne jest zastosowanie niewielkich wartości tolerancyjnych. Przyjęcie niewielkich wartości tolerancyjnych pozwala na optymalne zwymiarowanie w pełni funkcjonalnego a zarazem ekonomicznego rozwiązania technicznego.

Schemat obliczeniowy Mass-Spring-System (układu masa-sprężyna)

Na podstawie przykładowego Mass-Spring-System należy pokazać z jakich elementów składać się może „wyciszona” nawierzchnia. Należy podkreślić, że każdy z wykorzystanych elementów (np. sprężyny, tłumiki oraz masa) może być w inny, dowolny sposób uzależniony od częstotliwości drgań systemu. Zależności te



27. Schemat Mass-Spring-System

powinny być bardzo dokładnie uwzględnione podczas wykonywania obliczeń. Wykorzystując wspomniane elementy można skonstruować każdy, dowolny Mass-Spring-System. Stanowi on układ nałożonych na siebie elementów masy fizycznej, sprężyny i tłumików. Wszystkie wyżej wymienione elementy konstrukcji oraz ich właściwości zostały uwzględnione.

Model składa się z różnych mas, tłumików oraz sprężyn, które w zależności od typu pojazdu są ze sobą w różny sposób zestawiane i łączone.

Wartości graniczne imisji

Przeważnie przyjmowane są następujące wartości graniczne imisji (tabele 3 i 4).

Wnioski

- Dzięki odpowiednio zaprojektowanym rodzajom nawierzchni oraz zastosowaniu elementów elastycznych, można spełnić nawet bardzo wysokie wymagania ochrony środowiska, eliminując lub znacznie redukując niekorzystne oddziaływania wibracyjne wywołane przez środki transportu szynowego.
- Rozwiązania techniczne, chroniące przed emisją i imisją drgań wywołanych przez trasy szynowe, są drogie - nieraz bardzo drogie. Wydając ułamek tych kosztów na wykwalifikowane doradztwo wyspecjalizowanych projektantów, można oszczędzić znakomitą część niepotrzebnych kosztów,

wynikających z doboru nieodpowiednich rozwiązań w danym projekcie. Takie doradztwo zapewnia z jednej strony wystarczającą i odpowiednią ochronę antywibracyjną, a z drugiej strony minimalizuje koszty będące rezultatem przewymiarowania i aplikacji nieadekwatnych do potrzeb środków technicznych.

- Indywidualny dla danej inwestycji, odpowiedni wybór technologii i materiałów o wysokiej jakości zapewnia długotrwałą, gwarantowaną wibroizolację. Istotną rolę w racjonalnym procesie wyboru, przygotowania i realizacji systemu ochrony przed wibracjami mogą odegrać jedynie doświadczeni projektanci i wykonawcy materiałów, których referencją jest wieloletnie doświadczenie przy realizacji konkretnych projektów. ◀

Tab. 2. Właściwości elementów Mass-Spring-System

Element	Modelowanie oraz właściwości zastosowanego elementu
Szyna kolejowa	belka obciążona zginaniem i ścinaniem (wraz z ciężarem własnym) (Timoshenko-belka), nieściśliwa
Podkładka	warstwa sprężysta, posadowiona wzdłuż na elementach sprężyn i amortyzatorów (zespół posadowienia), ściśliwa
Podkładka żebrowa	masa, znajduje się wzdłuż konstrukcji, nieściśliwa
Podkładka	warstwa sprężysta, posadowiona wzdłuż na elementach sprężyn i amortyzatorów (zespół posadowienia), ściśliwa
Płyta nośna	belka obciążona zginaniem i ścinaniem (wraz z ciężarem własnym) (Timoshenko-belka), nieściśliwa
Elementy sprężyste pod płytą nośną	warstwa sprężysta, posadowiona wzdłuż na elementach sprężyn i amortyzatorów (zespół posadowienia), ściśliwa
Betonowe dno konstrukcji + ściana tunelu	belka obciążona zginaniem i ścinaniem (wraz z ciężarem własnym) (Timoshenko-belka), nieściśliwa
Posadowienie / podłoże-grunt	sprężysta półprzestrzeń, osiada wskutek obciążenia

Tab. 3. Wartości A służące do oceny imisji drgań w mieszkaniach i podobnie użytkowanych budynkach wg niemieckiej normy DIN 4150, cz. druga, czerwiec 1999

Lp.	Miejsce oddziaływania	w ciągu dnia			nocą		
		Au	Ao	Ar	Au	Ao	Ar
1	Obszary, na których znajdują się jedynie budynki przemysłowe/gospodarcze oraz w drodze wyjątku pomieszczenia mieszkalne dla właścicieli i kierowników firm oraz personelu nadzorującego	0,40	6,00	0,20	0,30	0,60	0,15
2	Obszary, na których znajdują się głównie budynki przemysłowe/gospodarcze	0,30	6,00	0,15	0,20	0,40	0,10
3	Obszary, na których znajduje się równie dużo budynków przemysłowych/ /gospodarczych, jak i mieszkalnych	0,20	5,00	0,10	0,15	0,30	0,07
4	Obszary, na których znajdują się głównie bądź wyłącznie budynki mieszkalne	0,15	3,00	0,07	0,10	0,20	0,05
5	Obszary pod szczególną ochroną, np. szpitale, sanatoria położone w specjalnie przeznaczonych na nie miejscach	0,10	3,00	0,05	0,10	0,15	0,05

Tab. 4. Wartości imisji drgań służące do oceny wtórnych drgań akustycznych powietrznych

Lp.	Rodzaj pomieszczenia / przeznaczenie	LrI,T	LrI,N
1	Pomieszczenia sypialne	-	30
2	Pomieszczenia mieszkalne	40	-
3	Pomieszczenia lekarskie, gabinety, sale operacyjne, pomieszczenia instytucji naukowych, czytelnie w bibliotekach, pomieszczenia dydaktyczne	40	-
4	Pomieszczenia konferencyjne, biurowe, laboratoryjne	45	-
5	Duże pomieszczenia biurowe, wyłącznikownie, drukarnie – o ile znajdują się tam także miejsca pracy	50	-
6	Pozostałe pomieszczenia, które przeznaczone są do częstszego niż sporadycznego pobytu osób	Do ustalenia indywidualnie, zgodnie z koniecznością ochrony danego użytkownika	

LrI,T = poziom zakłóceń w środku w ciągu dnia w dB(A)
LrI,N = poziom zakłóceń w środku nocą w dB(A)

Matthias Scholz
SSF Ingenieure