

Trwałość i niezawodność systemów masowo – sprężystych w torze kolejowym

Ralf Jurkewitz, Igor Gisterek, Marta Knawa - Hawryszków



Dipl. Eur. Ing. Ralf Jurkewitz

Calenberg Ingenieure GmbH

Jurkewitz@calenberg-ingenieure.de



dr inż. Igor Gisterek

Jordahl & Pfeifer Technika
Budowlana sp. z o.o.,
Politechnika Wrocławska

igor.gisterek@pwr.edu.pl



dr inż. Marta Knawa -
Hawryszków

Jordahl & Pfeifer Technika
Budowlana sp. z o.o.,
Politechnika Wrocławska

knawa@j-p.pl

Ze wzrostem świadomości oraz wymagań dotyczących ochrony środowiska życia człowieka oraz zwiększenia komfortu przebywania w miejscu pracy i odpoczynku, coraz większego znaczenia nabiera aspekt zapobiegania nadmiernym wpływom wibroakustycznym: drgań i hałasu. Z punktu widzenia promowanego w budownictwie postulatu zrównoważonego rozwoju, rozwiązania w zakresie zabezpieczeń przed tymi niekorzystnymi oddziaływaniami powinny przynosić długofalowe korzyści społeczne i ekonomiczne. W artykule został poruszony temat ochrony przed drganiami i hałasem ludzi przebywających w budynkach oraz

samych budynków położonych w sąsiedztwie linii kolejowej, którą poprowadzono w tunelu. Szczególną uwagę zwrócono na długotrwałą i niezmienną skuteczność zastosowanego rozwiązania wibroizolacji nawierzchni torowej przy użyciu ciężkiego systemu masowo-sprężystego, która została potwierdzona badaniami eksperymentalnymi.

Wprowadzenie

Wzajemne powiązanie przyczynowo - skutkowe w odniesieniu do relacji koło-szyna-siła w zakresie zagadnień statyki można w skrócie przedstawić następująco: parametry fizyczne, tj. siły, naprężenia, przemieszczenia, są zależne głównie od sztywności giętej szyny, rozstawu podkładów kolejowych, sztywności powierzchni podparcia podkładu, obciążenia przekazywanego na koło. Dodatkowo do powyższych wzajemnych powiązań dochodzą parametry fizyczne dotyczące dynamiki, które zależą od charakterystyki samego pojazdu szynowego, stanu kół i szyn, nieresorowanej masy zestawu kołowego, geometrii całego torowiska oraz elementów składowych podtorza, ich masy oraz właściwości wszystkich zastosowanych elementów sprężystych.

W kompleksowym ujęciu problemu rozjazdy i inne nieciągłości powierzchni szyn również powinny być wzięte pod uwagę.

Drgania powstające w wyniku działania sił dynamicznych emitowane są na torze i rozprzestrzeniają się w postaci fal poprzez podtorze, a następnie poprzez ośrodek gruntowy (rys. 1).

Mechanizm transmisji tych fal jest bardziej skomplikowany niż fal dźwiękowych rozprzestrzeniających się w powietrzu, czyli hałasu powietrznego. Jest on zależny m.in. od sztywności podłoża gruntowego, tłumienia gruntu, warunków geologicznych, występowania wód gruntowych. Szczególnie niekorzystna sytuacja ma miejsce jeśli drgania mogą doprowadzić do zjawiska rezonansu gruntowego i w efekcie do wzmocnienia amplitud drgań. W przypadku lokalizacji budynków w strefie oddziaływań dynamicznych pochodzących z dróg szynowych, drgania transmitowane poprzez podłoże gruntowe przekazują się na fundamenty i ściany piwnic, a następnie mogą rozprzestrzeniać się po kolejnych elementach konstrukcji budynku, doprowadzając w najgorszym wypadku do efektu rezonansu. Fale te, rozchodzące się w ciele stałym (podłoże, konstrukcja), są także nazywane wtórnym hałasem materiałowym (z ang. structure-borne noise). Efekt, powstający w wyniku wprowadzenia w drgania elementów konstrukcji budynku przez drgania przenoszone przez ośrodek gruntowy z nawierzchni torowej, jest nieprzy-

jemny dla mieszkańców, którzy mogą odczuwać lub nawet słyszeć wibracje sufitu, podłogi lub ścian, zaczynających pracować jak membrana głośnika.

Zapewnienie wysokiej jakości torowisk zapewnia znaczną redukcję generowanych sił dynamicznych i drgań. Inne działania służące ochronie przed drganiami mogą być podejmowane w samych pojazdach szynowych lub na drodze transmisji drgań, a także u ich odbiorcy.

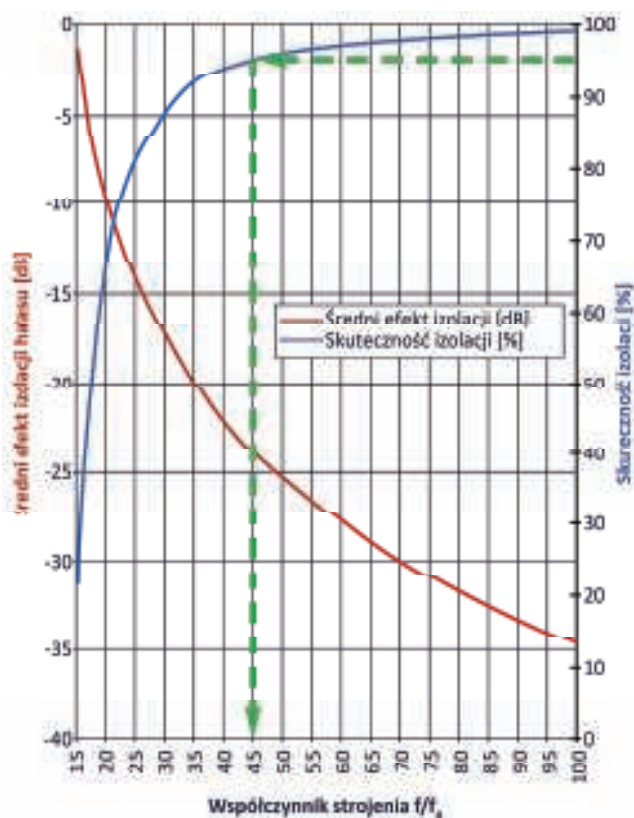
W niniejszym artykule skoncentrowano się na przykładzie jednego z najbardziej efektywnych środków ochrony czynnej (aktywnej), czyli podejmowanej u źródła generującego drgania, mającej na celu zmniejszenie intensywności propagacji fal do podłoża. Chodzi o tzw. „ciężki” system masowo-sprężysty (z ang. „heavy” mass-spring system). W literaturze przedmiotu spotyka się różne podziały i nazewnictwo tych systemów; tu przymiotnika użyto w odniesieniu do znacznej masy płyty nawierzchni. Generalnie można założyć, że im większa masa sprężynująca usytuowana powyżej elementów elastycznych, oraz im bardziej miękka warstwa elastyczna, tym lepsza skuteczność izolacji. W uproszczeniu oznacza to, że im niżej elementy elastyczne wbudowane są w torowisku w stosunku do poziomu styku koło-szyna, tym większe tłumienie. Ciężkie systemy masowo-sprężyste składają się z masywnej płyty ważącej ok. 3 t/m, spoczywającej na elastycznych elementach. Układ ma porównywalną lub większą masę na metr długości toru w porównaniu do masy poruszających się po nim pojazdów.

Skuteczność poszczególnych środków ochrony przed emisjami, nazywana tłumiennością (z ang. insertion loss), jest mierzona w dB i wskazuje jak zmienia się poziom drgań poprzez zastosowanie ochrony wibroakustycznej w odniesieniu do stanu bez żadnych środków ochrony.

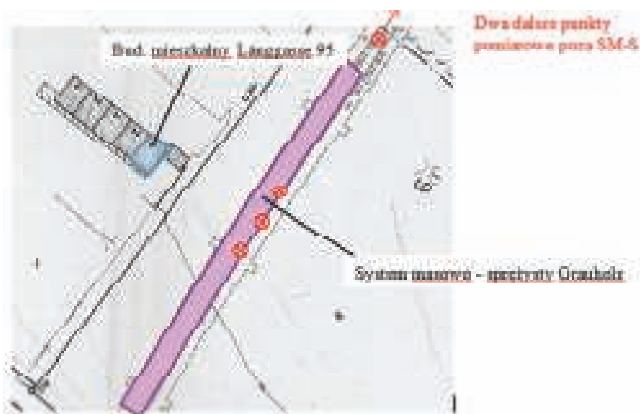
Częstotliwość własna drgań układu, nazywana także częstotliwością dostrojczą, jest najbardziej relewantnym kryterium przy ogólnej ocenie efektywności wibroizolacji. Im niższa częstotliwość dostrojczą, tym wyższą skuteczność izolacji można osiągnąć. Pozytywne efekty wibroizolacji można zauważyć począwszy od wartości współczynnika strojenia, zdefiniowanego jako stosunek częstotliwości wymuszenia do częstotliwości własnej układu (f/f_0), równego 1,5. Przy wartości tego współczynnika równej 3,5 uzyskuje się skuteczność izolacji na poziomie prawie 20 dB. Oznacza to, że poziom drgań poniżej zastosowanej wibroizolacji w torowisku jest zredukowany z 90% do 10%. Jeśli środki ochrony zostały dobrze dobrane i rzetelnie wykonano ich montaż, można osiągnąć tłumienie dochodzące do 30



1. Źródła emisji i rozprzestrzenianie się drgań w podłożu gruntowym



2. Skuteczność wibroizolacji



3. Położenie SM-S i punktów pomiarowych w tunelu Grauholz



4. Położenie punktu pomiarowego (po prawej stronie, pod osłoną) względem toru

dB, co odpowiada redukcji przekazywania się drgań do 3% (rys. 2).

Dane ogólne

Tunel Grauholz leży w ciągu linii kolejowej wychodzącej z węzła kolejowego Berno w kierunku północnym, około 5 km od miasta. Ponad tunelem, nieco na zachód od osi budowli znajdują się budynki mieszkalne, które należało objąć ochroną przed drganiami i hałasem. Podczas wymiany nawierzchni w roku 1993 na długości około 100 m zabudowano pierwszy na terenie Szwajcarii system masowo – sprężysty (SM-S). Aby zabezpieczyć mieszkańców i nieruchomości również przed spodziewanym, znaczącym wzrostem natężenia przewozów, zaprojektowano ciężki system masowo – sprężysty, z płytą o grubości 65 cm, posadowioną sprężysto na macie wibroizolacyjnej. Po niemal dwudziestu latach zdecydowano się wykonać ponowne pomiary kontrolne w domu położonym najbliżej tunelu.

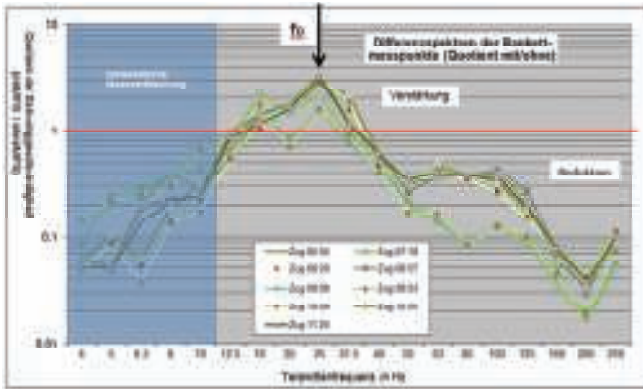
Pomiary drgań w tunelu

Punkty pomiarowe, rozmieszczone po trzy na zewnątrz od toru, były oddalone od siebie o 12 metrów. Punkty na SM-S zlokalizowano w środku długości płyty, punkty na nawierzchni klasycznej – około 60 m dalej na północ (rys. 3). Rejestracje przejazdów pociągów następowały z zastosowaniem automatycznego wyzwalacza, zaś identyfikacja składów odbywała się zgodnie z rozkładem jazdy, identyfikując czas i kierunek ruchu pociągu. Czujniki zostały osłonięte od oddziaływania fali powietrznej za pomocą zewnętrznych, masywnych metalowych osłon, jak na fot. 4.

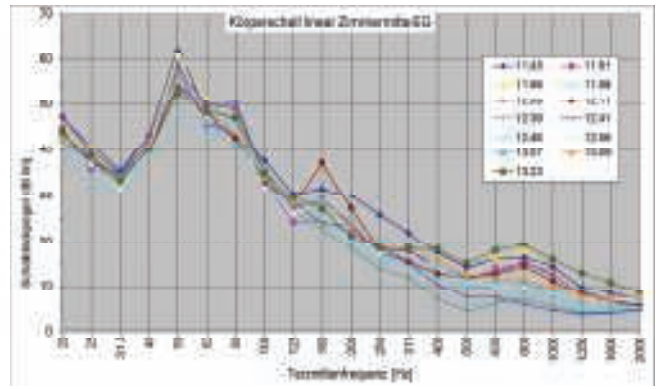
Dla przebiegów pociągów z jednakową prędkością po SM-S i torze klasycznym porównywano ich uśrednione w czasie spektra tercjowe, z których wybierano część środkową o czasie trwania 10s. Na rys. 5 pokazano wykres wartości uśrednionych z trzech czujników, dla przykładowych pociągów. Wyróżniają się na nim wzmocnienie drgań w pobliżu częstotliwości własnej SM-S (około 25 Hz) oraz istotna redukcja drgań dla częstotliwości powyżej 40 Hz.

Pomiary w budynku mieszkalnym

Dom szeregowy mieszczący się przy Länggasse 95 (fot. 7), należy do Landwirtschaftlichen Schule (Szkoły Gospodarki Rolnej). Od przeprowadzenia poprzedniej serii pomiarów w roku 1995 nie dokonano zmian w jego konstrukcji. W roku 2014 zmierzono na poziomie parteru i pierwszego piętra poziomy drgań i hałasu wywołanych przejazdem około 30 pociągów. Wyniki pomiarów pozostały niezakłócone ze względu na czasową nieobecność mieszkańców. Ocenę oddziaływania drgań przeprowadzono analogicznie jak w roku 1995. Dla wybranych składów zmierzono środkowe pasma tercjowe przy przejeździe pociągu. Otrzymane wyniki zestawiono z danymi zebranymi 19 lat wcześniej. Oceny oddziały-



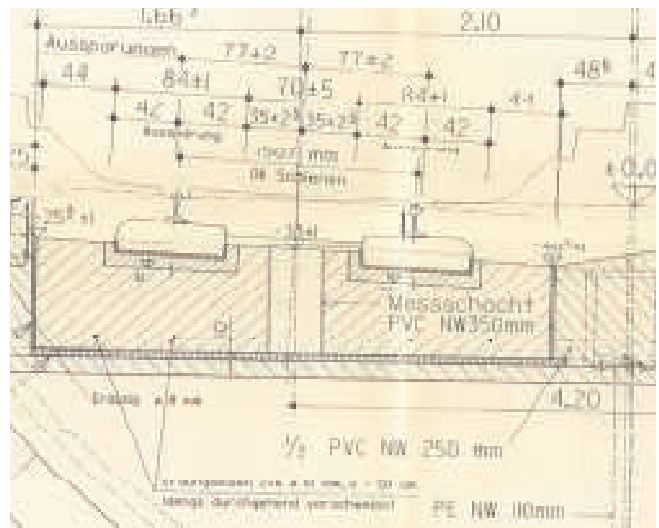
5. Przykładowy wykres drgań zmierzonych na SM-S



6. Przykładowy wykres hałasu zmierzonego na parterze domu



7. Widok zewnętrzny przedmiotowego budynku mieszkalnego



8. Przekrój poprzeczny nawierzchni kolejowej w tunelu Grauholz

wań dokonano zgodnie z wymogami normy DIN 4150-2. Jednocześnie wewnątrz budynku dokonywano oceny poziomu hałasu. W roku 2014 wartości zmierzone na parterze okazały się być znacząco wyższe niż na piętrze, z różnicą sięgającą niemal 8 dB. Ogólny poziom hałasu w porównaniu z pomiarami z roku 1995 nieznacznie wzrósł na parterze, natomiast na piętrze budynku odnotowano kilkunastoprocentowy spadek. Dla wybranych składów ponownie zmierzono środkowe pasma tercjowe przy przejeździe pociągu. Na rys. 6 pokazano przebiegi poziomu ciśnienia akustycznego w zależności od częstotliwości, zmierzone na parterze domu.

Porównanie z wynikami pomiarów z roku 1995

Porównanie wykresu przedstawionego na ilustracji 5 z zamieszczonym poniżej na rys. 9, przedstawiającym wyniki pomiarów z roku 1995 dowodzi, że częstotliwość własna układu wynosi niezmiennie około 25 Hz. Świadczy to o fakcie zachowania charakterystyki materiałowej maty wibroizolacyjnej o właściwościach sprężysto – tłumiących oraz o stabilnym położeniu toru. Odpowiedni dobór surowców oraz właściwa technologia wykonania powoduje, że możliwe jest zagwarantowanie znacznie dłuższego niż wzmiankowane dwadzieścia

lat okresu przydatności produktu. Szczególnie predystynowane do wyrobów długowiecznych są sprawdzone w wieloletnich testach mieszanki kauczuków naturalnych i syntetycznych, jak w opisywanym przykładzie. Również specyficzne ukształtowanie powierzchni maty, ułatwiające odwodnienie, wraz z całkowitą nienasiąkliwością jej struktury chroni konstrukcję drogi kolejowej i wydłuża okres jej eksploatacji. Na wykresie przedstawionym na ilustracji 9 linią kreskową zaznaczono teoretyczny przebieg według symulacji, zaś linią kropkowaną – wyniki rzeczywistych pomiarów. Wartości przedstawione na wykresie oznaczają względną skuteczność tłumienia, opisując różnice powstałe przez odjęcie wyników zebranych w środkowym punkcie SM-S od wartości zmierzonych poza SM-S.

Wyniki pomiarów drgań wskazują, że w domu przy Länggasse 95 wartości amplitud drgań zmierzonych w roku 2014 są nawet o połowę niższe, niż w roku 1994. Większą redukcję uzyskano na piętrze budynku. Przyczyn takiego stanu rzeczy można upatrywać między innymi w wyjątkowo rygorystycznej polityce utrzymaniowej zarządcy infrastruktury, jak i w konsekwentnie utrzymywanej tendencji wymiany i modernizacji taboru, prowadzonej od wielu lat przez głównych przewoźników w regionie, czyli SBB i BLS. Wpływ na przesunięcie pasma drgań przypisuje się najczęściej zambia-

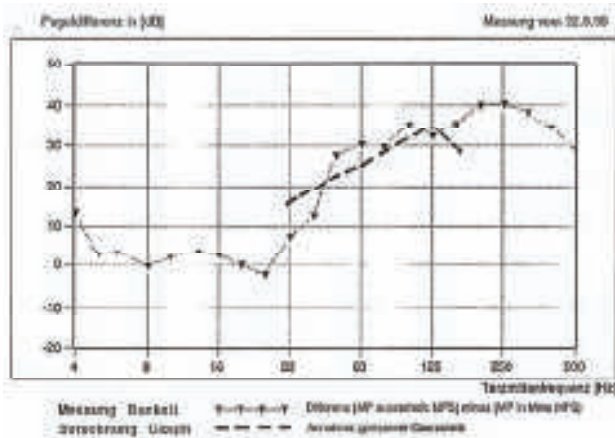
nie tradycyjnych stalowych sprężyn i resorów w zawieszeniu pierwszego i drugiego stopnia pojazdów na bloki metalowo – gumowe (tzw. wkładki MEG) i miechy powietrzne. Wyniki wartości pomiarów w latach 1995 i 2014 zestawiono w tabeli 1.

Pasma tercjowe uzyskane w pomiarach z 1995 i 2014 roku wykazują zbliżony przebieg. Dominujące częstotliwości leżą w obydwu przypadkach pomiędzy 40÷63 Hz, co przedstawiono na rysunkach 10 i 11.

Pomiary hałasu w budynku przynoszą nieco niejednoznaczne wyniki. O ile w roku 1995 na obydwu kondygnacjach budynku stwierdzono niemal identyczny poziom hałasu, to w roku 2014 ujawniło się istotne zmniejszenie poziomu hałasu na piętrze domu. Na parterze

Tab. 1. Porównanie wartości pomiarów drgań w latach 1995 i 2014

Rok pomiaru	Parter	V_{rms} [mm/s]	Piętro	V_{rms} [mm/s]
	średnia	Poziom 90%	średnia	Poziom 90%
1995	0,054	0,075	0,034	0,045
2014	0,039	0,049	0,019	0,024
wskaźnik 2014 / 1995	0,73	0,66	0,56	0,53



9. Względna skuteczność tłumienia według pomiarów z 1995

pomiary wykazały zwiększenie poziomu hałasu o około 2 dB, natomiast redukcja na górnej kondygnacji osiągnęła wartość 6 dB. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 2.

Pasma tercjowe w pomiarze hałasu wykonanym w 2014 wykazują największe wartości w przedziale pomiędzy 31 i 125 Hz. Przy wyższych częstotliwościach, powyżej 315 Hz hałas pozostaje na bardzo niskim poziomie. Analiza poziomu hałasu z roku 1995 nie wykazuje na piętrze domu spadków przy częstotliwościach 125 Hz i wyższych. Może to być powiązane z wpływem hałasu zewnętrznego (parter jest osłonięty od pobliskiej szosy przez ukształtowanie terenu) lub z niedoskonałością sprzętu pomiarowego. W związku z tym poziom hałasu zmierzonego na górnej kondygnacji w 1995 mógł zostać zawyżony.

Pomiary z roku 2014 i ocena według BEKS

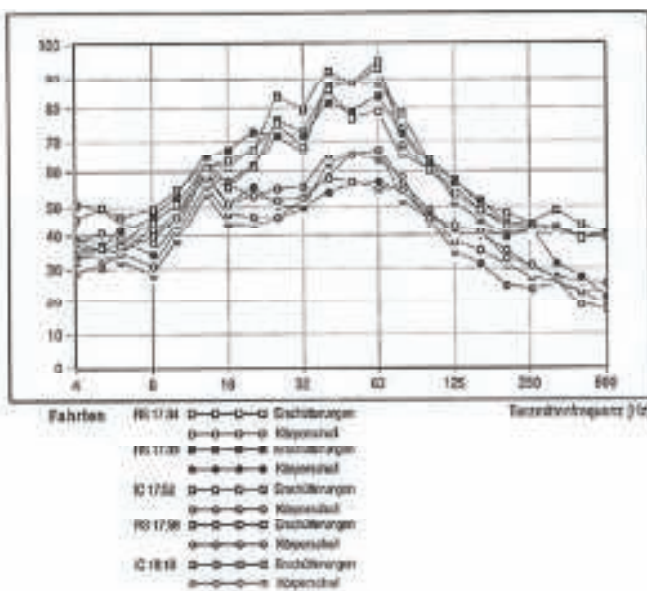
Z pomiarów przeprowadzonych w roku 2014 uzyskano wyniki wpływu drgań i hałasu, które porównano z wartościami dopuszczalnymi w lokalnych przepisach. Wyniki zestawiono w tabeli 3. Szkoła oraz jej budynki mieszkalne są położone w strefie mieszanej, co wpływa na wielkość dopuszczalnych drgań. Uzyskane wyniki wskazują, że poziom oddziaływań jest znacząco niższy niż granica wartości dopuszczalnych.

Podsumowanie i wnioski

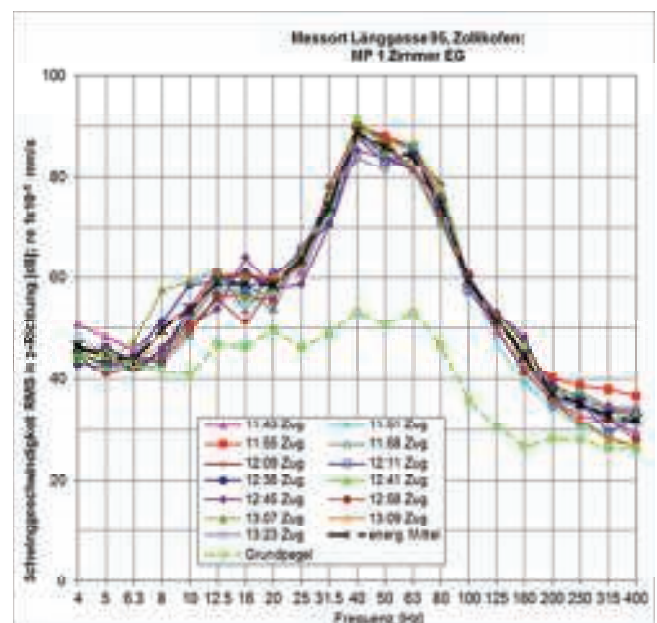
Przeprowadzone w roku 2014 pomiary kontrolne zabudowanego w roku 1993 systemu masowo – sprężystego w tunelu kolejowym Grauholz pod Bernem wykazały następujący wpływ na budynek mieszkalny położony przy Länggasse 95:

- wartości uzyskane w pomiarach zasadniczo potwierdzają wyniki z roku 1995,
- pomiary przeprowadzone w tunelu potwierdzają istnienie częstości własnej systemu masowo – sprężystego w pobliżu 25 Hz oraz analogiczne tłumienie jak 19 lat wcześniej,
- w roku 2014 stwierdzono obniżony poziom drgań, co jest trudne do jednoznacznej interpretacji,
- ostatnie pomiary kontrolne wykazały zbliżony poziom hałasu na parterze i istotne jego obniżenie na piętrze budynku,
- system masowo – sprężysty po dwudziestu latach funkcjonowania nadal skutecznie spełnia funkcję ochrony otoczenia przed niekorzystnym wpływem drgań i hałasu.

Pomiary przeprowadzono pod obciążeniem zwykłym ruchem kolejowym. Nie udało się ustalić wpływu stanu toru i szyn oraz taboru na wielkość zmierzonych oddziaływań. Z tego powodu nie przeprowadzono korekty obliczeniowej, pozwalającej przybliżyć w porównaniu wyniki z lat 1995 i 2014. Spokojny sen mieszkańców stanowi jednak wystarczające potwierdzenie słuszności podjętych działań.



10. Pasma tercjowe pomiarów drgań na parterze budynku w 1995



11. Pasma tercjowe pomiarów drgań na parterze budynku w 2014

Tab. 2. Porównanie wartości pomiarów hałasu w latach 1995 i 2014

Rok pomiaru	Parter L _v [dBA]	Piętro L _v [dBA]
1995	28,9	28,7
2014	30,6	22,9
różnica (2014 – 1995)	1,7	-5,8

Tab. 3. Porównanie wartości pomiarów drgań i hałasu z roku 2014 z wartościami dopuszczalnymi

Pomiar emisji 13.05.2014, bud. mieszkalny Länggasse 95				Dop. wartości wg BEKS	
Pokój parter		Pokój piętro		drgania	hałas
KB _{FTr,1Std} [-]	LEQ _{1-Std} [dBA]	KB _{FTr,1Std} [-]	LEQ _{1-Std} [dBA]		
0,032		0,000		0,07	
	15,1		7,3		30,0