



POLITECHNIKA KRAKOWSKA im. TADEUSZA KOŚCIUSZKI

**Wydział Inżynierii Lądowej
INSTYTUT MECHANIKI BUDOWLI**

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Stypuła

Dr inż. Krzysztof Kozioł



METRO W WARSZAWIE JAKO PRZYKŁAD UWZGLĘDNIANIA OCHRONY PRZED DRGANIAMI W PROCESIE TWORZENIA INFRASTRUKTURY TRANSPORTU SZYNOWEGO



INFRASZYN - 2016

WSTĘP

W ramach nowej perspektywy funduszy UE przewidziano szereg inwestycji z zakresu przebudowy, rozbudowy (modernizacji) oraz budowy infrastruktury transportu szynowego.

Szczególnie dotyczyć to będzie infrastruktury kolejowej (przebudowa i rozbudowa dworców i linii kolejowych, koleje dużych prędkości) ale uwzględniono także inwestycje miejskiego transportu szynowego (tramwaj, metro).

Jednym z warunków rozliczenia inwestycji i ich refundacji z funduszy unijnych jest uwzględnienie wymagań ochrony środowiska.

Jedno z takich wymagań dotyczy ograniczenia wpływu drgań generowanych przez transport szynowy na budynki i ludzi w budynkach.

Problematyka uwzględniania tego wpływu w procesie inwestycyjnym została przedstawiona poniżej na przykładzie inwestycji metra w Warszawie.

WSTĘP

Metro (fr. métro, skrót od métropolitain = „stołeczny”) to system bezkolizyjnej kolei miejskiej, której linie są prowadzone głównie pod ziemią (ang. underground, niem. U-Bahn).

Tunele metra są budowane kilka (metro płytkie) lub kilkanaście, a nawet 20–30 metrów (metro głębokie) pod powierzchnią terenu.

Spośród wszystkich środków transportu miejskiego **eksploatacja metra** jest najbardziej „ekologiczna”:

- nie zanieczyszcza powietrza, wody ani gleby,
- a jeśli jedzie w tunelu to także nie emituje hałasu.

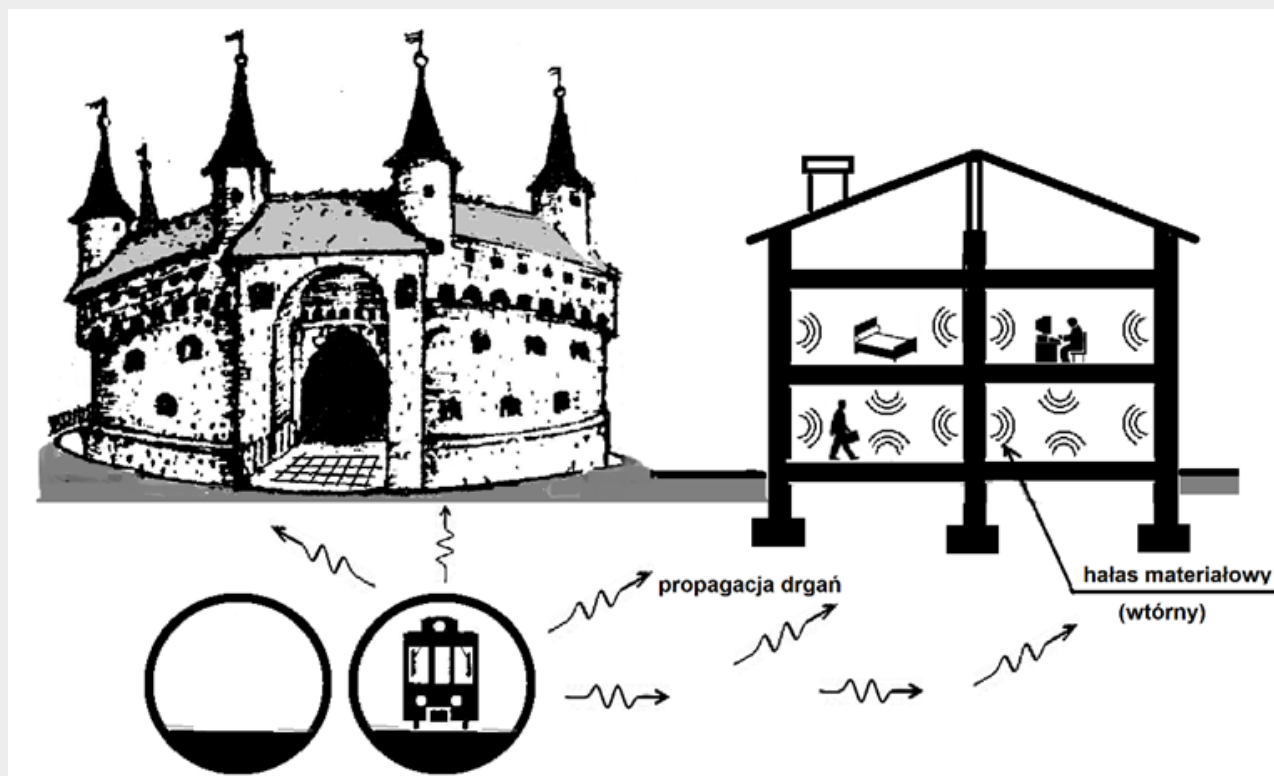
Na etapie budowy metra jedynymi zagrożeniami dla istniejącej zabudowy są:

- ewentualne ruchy powierzchni (osiadania) gruntu podczas drążenia tuneli oraz wykonywania stacji,
- wpływ na budynki drgań wywołanych niektórymi pracami budowlanymi np. wbijaniem w grunt ścianek szczelnych lub pali, co nie odbiega od sytuacji spotykanych przy realizacji inwestycji naziemnych.

WSTĘP

Jedynym zagrożeniem po oddaniu metra do eksploatacji może być wpływ drgań generowanych przejazdami pociągów metra na konstrukcję budynków i na ludzi przebywających w tych budynkach.

W przypadku metra płytkiego czasami może towarzyszyć tym wpływom tzw. hałas materiałowy (hałas wtórny).



Wytyczne i normy dotyczące wpływu drgań na budynki i ludzi w budynkach

Przez ponad ćwierć wieku obiekty metra w Warszawie projektowano i budowano na podstawie przepisów kolejowych a dokumentacja roiła się od odstępstw od tych przepisów.

Obecnie obiekty metra muszą spełniać warunki podane w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 17 czerwca 2011 w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać obiekty metra i ich usytuowanie.

UREGULOWANIA NORMOWE I WYTYCZNE

Obiekty metra muszą spełniać warunki podane w **Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 17 czerwca 2011 w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać obiekty metra i ich usytuowanie**. Załącznik 2 do tego rozporządzenia zatytułowany: **WYMAGANIA W ZAKRESIE OGRANICZENIA WPŁYWU DRGAŃ** wiera m. in. następujące zapisy:

1. Rozwiązania techniczne, w tym konstrukcja tunelu i nawierzchni torowej, powinny zapewniać zabezpieczenie otaczającej zabudowy przed wpływem drgań dynamicznych, z uwzględnieniem wymagań Polskiej Normy PN-B-02170:1985 i PN-B-02171:1988. Należy przyjąć następujące parametry oceny poprawności rozwiązań w zakresie tłumienia drgań:

*1) wpływ drgań na konstrukcję budynku — maksymalny wskaźnik odczuwalności drgań — 0,70,
2) wpływ drgań na ludzi — maksymalny wskaźnik odczuwalności drgań — 0,95,
gdzie wskaźnik odczuwalności drgań stanowi stosunek wartości rzeczywistej drgań do wartości dopuszczalnej dla określonych częstotliwości.*

2. Zasięg obszaru eksploatacyjnych oddziaływań dynamicznych podziemnych odcinków linii metra na otaczającą zabudowę, w średnich warunkach gruntowych, w terenie płaskim określa się na 40 m od skrajnej ściany najbliższego tunelu lub stacji metra, po obu stronach linii metra.

3. Zasięg obszaru eksploatacyjnych oddziaływań dynamicznych naziemnych odcinków linii metra na sąsiednią zabudowę jest zależny od warunków lokalnych i powinien zostać określony w poszczególnych przypadkach na podstawie analizy specjalistycznej uwzględniającej wyniki pomiarów drgań.

UREGULOWANIA NORMOWE I WYTYCZNE

Kolejne punkty:

4. *Podstawowy sposób ochrony* sąsiedniej zabudowy przed drganiami wywołanymi eksploatacją metra stanowi *zaprojektowanie wibroizolacji* w konstrukcji nawierzchni torowej. *Projekt powinien zawierać prognozę wpływu drgań na sąsiednią zabudowę po zastosowaniu wibroizolacji.*

5. *Miejsca* bezpośredniego sąsiedztwa — *przylegania budynków do konstrukcji* obiektów budowlanych *metra* — *powinny być zaopatrzone w wibroizolację* chroniącą budynki przed przeniesieniem się nadmiernych drgań.

6. Zabezpieczenia wibroizolacyjne powinny zostać tak zaprojektowane, aby poziom prognozowanego wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach nie przekraczał progu odczuwalności drgań przez ludzi.

7. *Linia metra powinna być wyposażona co najmniej w dwa punkty pomiaru drgań, zapewniające monitorowanie*, w sposób ciągły, poziomu drgań w poziomie podtorza i budynkach sąsiadujących z linią metra.

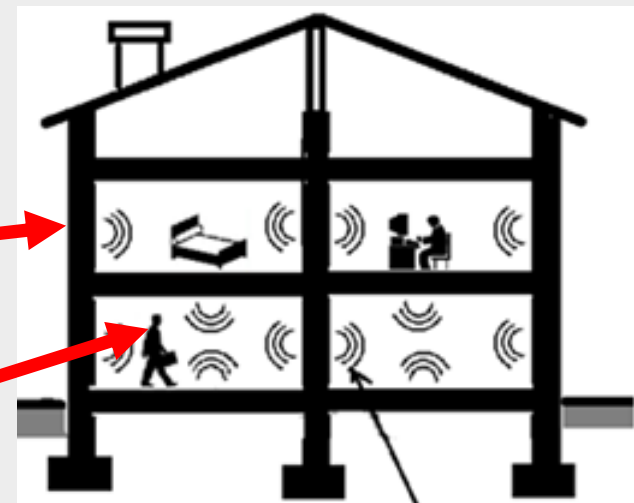
8. W przypadku konieczności wykonywania robót powodujących drgania znaczące dla obiektów budowlanych należy:

- 1) określić zasięg wpływu tych drgań;
- 2) wykonać prognozę ich wpływu na te obiekty;
- 3) wykonać ocenę tego wpływu na podstawie pomiarów kontrolnych podczas wykonywania robót.

UREGULOWANIA NORMOWE I WYTYCZNE

Jak wspomniano w powyższym Rozporządzeniu **zasady diagnostyki i kryteria ocen** wpływu drgań na konstrukcję budynków i na ludzi w nich przebywających zawarte są **w dwu polskich normach** opracowanych w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej:

- **PN-B-02170:1985. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.**

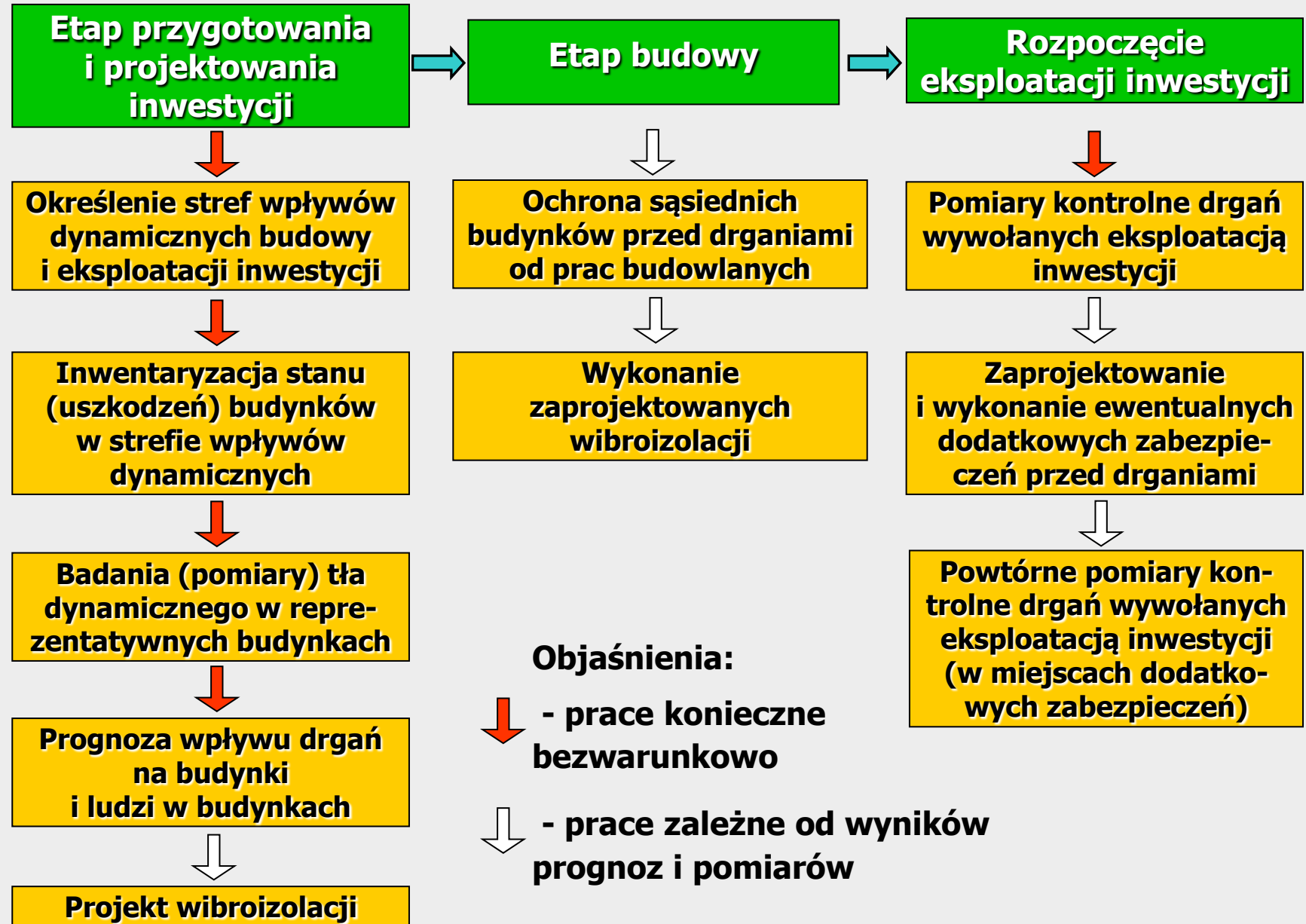


- **PN-B-02171:1988. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.**

Podane w tych normach **kryteria oceny stanowią podstawę do prawidłowego zaprojektowania zabezpieczeń** budynków i ludzi w nich przebywających **przed nadmiernym wpływem drgań.**

ALGORYTM OCHRONY ZABUDOWY PRZED DRGANIAMI METRA

Algorytm postępowania, opracowany na podstawie doświadczeń zebranych przez autorów podczas projektowania wibroizolacji dla metra w Warszawie



ALGORYTM OCHRONY ZABUDOWY PRZED DRGANIAMI METRA

Podany algorytm może ulegać modyfikacjom związanym z lokalnymi wymaganiami i warunkami w jakich prowadzona jest inwestycja (np. wymóg monitorowania drgań w przypadku metra), czy z organizacją procesu inwestycyjnego np. w przypadku inwestycji w systemie „projektuj i buduj”: część prac związanych z przygotowaniem inwestycji jest po stronie inwestora a dalsza część przez wykonawcę inwestycji.

Na przykładzie II linii metra w Warszawie:

- Przed rozpisaniem przetargu w systemie „projektuj i buduj” Metro Warszawskie zleca w ramach przygotowania inwestycji wykonanie m.in. inwentaryzacji stanu budynków w strefie oddziaływań metra oraz wykonanie analizy wpływu drgań i obciążeń dynamicznych na konstrukcje budynków i ludzi w nich przebywających.

Dalsze prace zlecane są już przez firmę wyłonioną w przetargu. I tak na odcinku centralnym II linii metra były to następujące prace:

- Projektowanie wibroizolacji,
- Projekt monitoringu drgań i hałasu podczas budowy,
- Projekt monitoringu drgań w fazie eksploatacyjnej.
- Projekt porealizacyjnych pomiarów drgań wywołanych ruchem pociągów metra,
- Pomiary monitorujące drgania i hałas podczas budowy,
- Wykonanie systemu monitoringu drgań generowanych przez metro,
- Opracowanie raportu dotyczącego powykonawczych pomiarów wibracji od metra.

ALGORYTM OCHRONY ZABUDOWY PRZED DRGANIAMI METRA

W przypadku przebudowy nawierzchni szynowej bez zmiany jej konstrukcji wykonanie pomiarów przedrealizacyjnych w poszczególnych budynkach i określenie w nich wpływu drgań na budynki i na ludzi w tych budynkach może być wystarczające do określenia czy i gdzie konieczne jest zastosowanie dodatkowej wibroizolacji i wówczas obliczenia symulacyjne zmierzające do zaprojektowania skutecznej wibroizolacji ogranicza się jedynie do tych budynków, w sąsiedztwie których taka wibroizolacja jest potrzebna.

TECHNICZNE SPOSOBY OBNIŻENIA POZIOMU DRGAŃ OD METRA

Najbardziej skutecznymi sposobami zmniejszenia wpływu drgań generowanych przez metro na otoczenie jest obniżenie poziomu emisji drgań z tunelu. Do takich sposobów można zaliczyć:

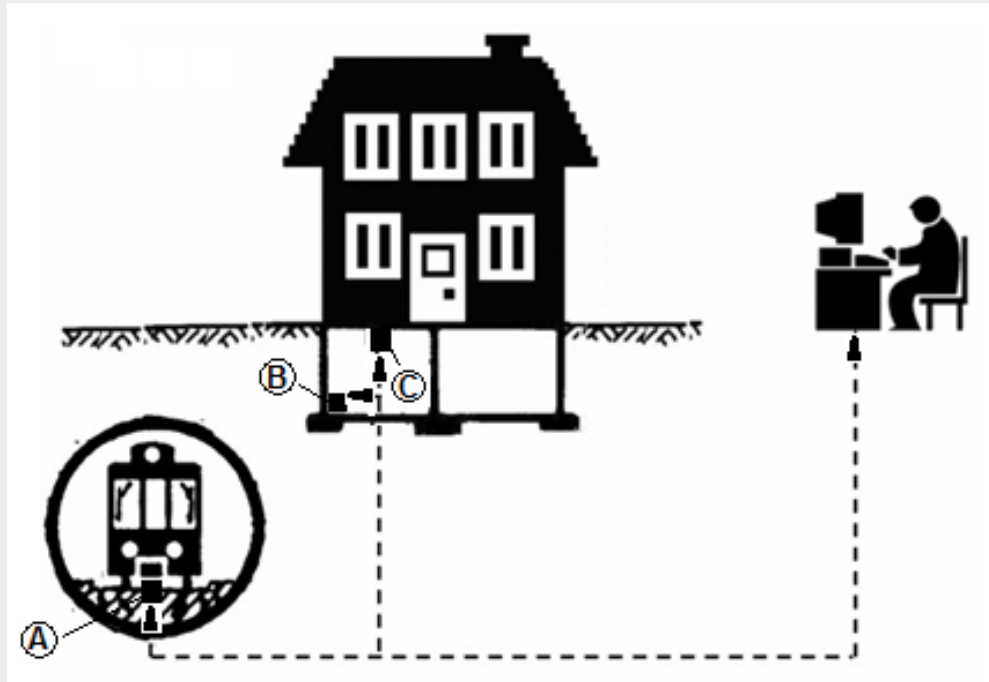
- Kontrolę stanu szyn metra i szlifowanie szyn,
- Monitorowanie poziomu drgań generowanych przez poszczególne pociągi metra w zależności od stanu kół wagonów metra (utrata kolistego profilu kół na skutek zużywania się materiału kół) i reprofilacja kół,
- Zastosowanie wibroizolacji w konstrukcji nawierzchni szynowej.

Szlifowanie szyn jest zabiegiem standardowym w miejskim transporcie szynowym (metro, tramwaje).

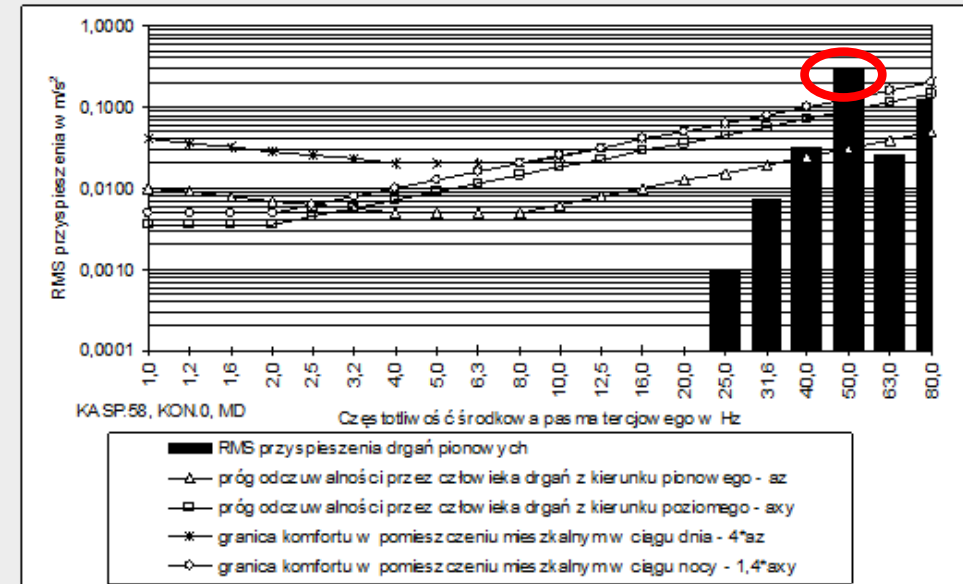
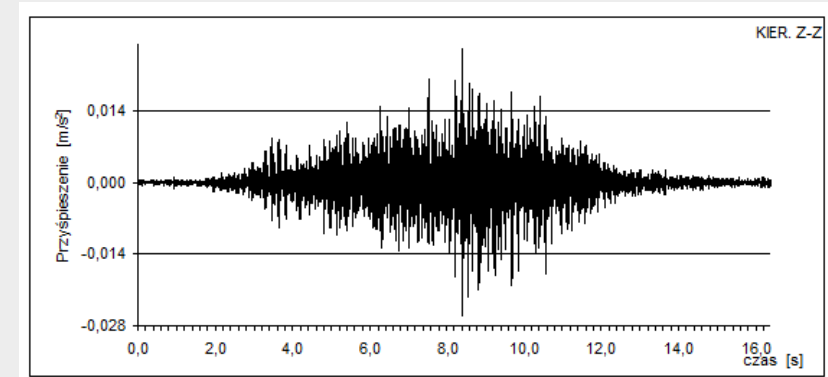
Ale przede wszystkim duże znaczenie ma monitorowanie poziomu drgań i wymiana lub reprofilacja kół wagonów.

TECHNICZNE SPOSOBY OBNIŻENIA POZIOMU DRGAŃ OD METRA

Autorzy opracowali i wykonali wspólnie z firmą NEOSTRAIN Sp. z o.o. system monitoringu wpływu drgań metra na budynki i na ludzi w budynkach na I-szej (3 punkty) i na II-giej linii metra w Warszawie.

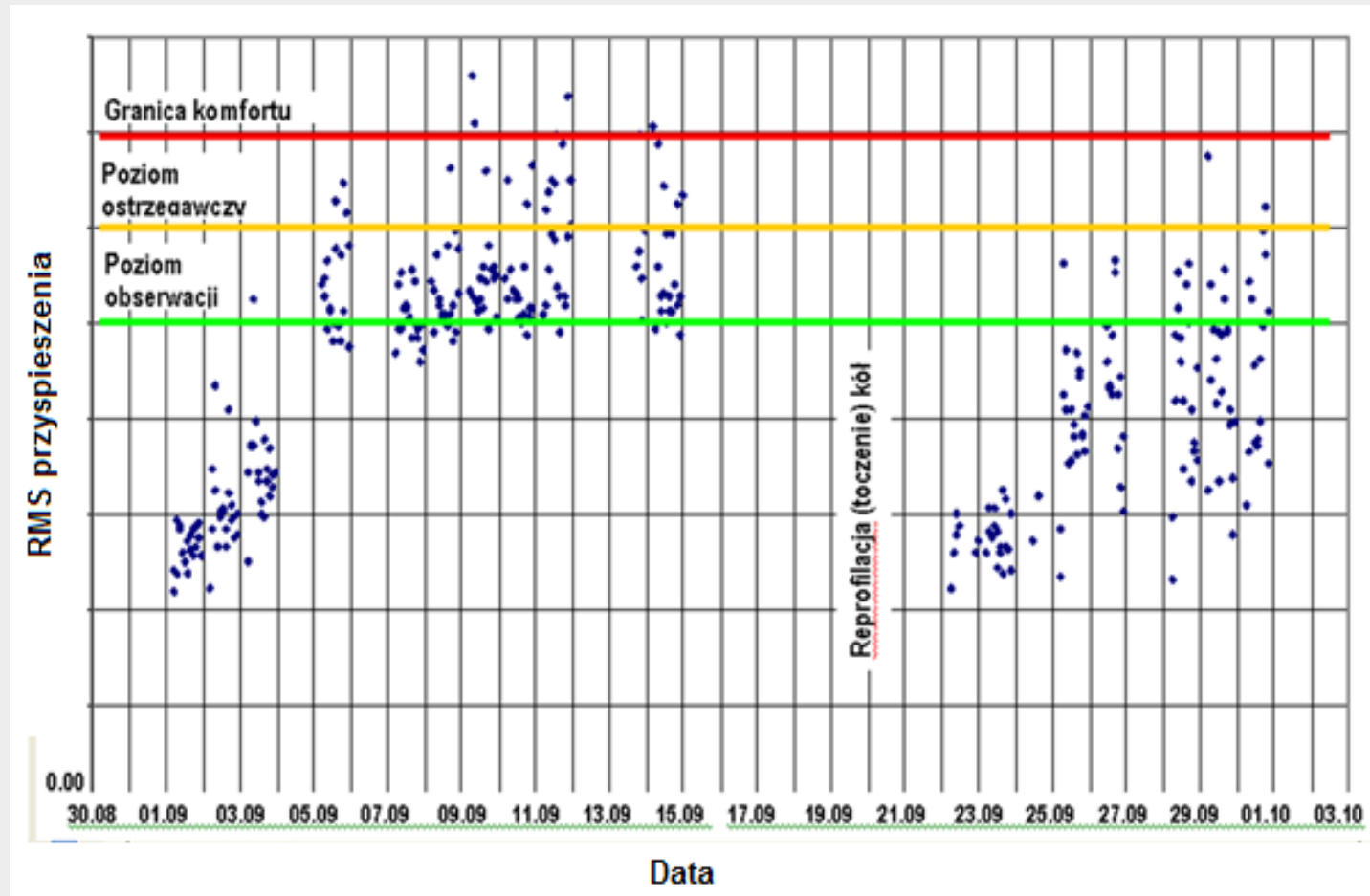


Schemat ideowy systemu monitoringu drgań w warszawskim metrze: A – czujnik do pomiaru drgań w tunelu metra, B - czujnik do pomiaru drgań konstrukcji budynku w poziomie posadowienia, C – czujnik do pomiaru drgań stropu budynku



TECHNICZNE SPOSOBY OBNIŻENIA POZIOMU DRGAŃ OD METRA

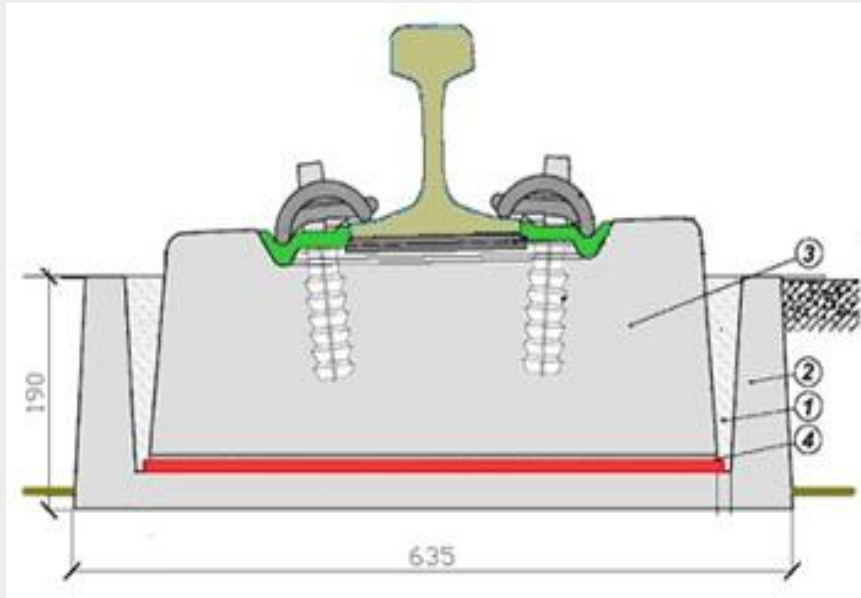
Największa wartość z analizy jest nanoszona na wykres i porównywana z granicami zaznaczonymi na wykresie, dając informację o konieczności wymiany kół.



Przykładowy wykres rozkładu w kolejnych dniach największych wartości z analizy wpływu na ludzi w monitorowanym budynku drgań generowanych przez pociąg o numerze x

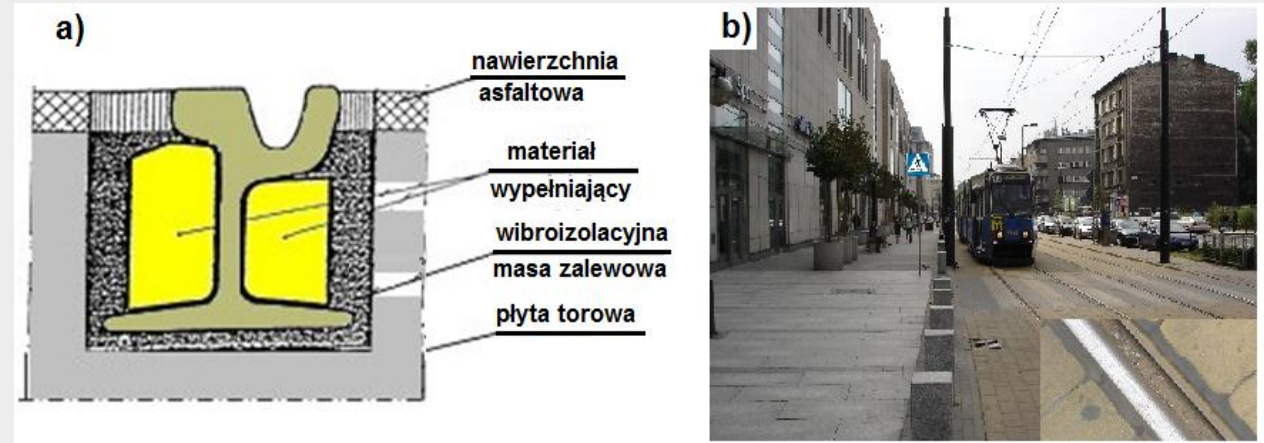
TECHNICZNE SPOSOBY OBNIŻENIA POZIOMU DRGAŃ OD METRA

Kolejnym krokiem w kierunku ograniczenia emisji drgań jest zastosowanie rozwiązań wibroizolacyjnych w tunelu metra - w konstrukcji nawierzchni szynowej



Schemat zastosowanej w warszawskim metrze podpory blokowej w systemie EBS EDILON (wg materiałów firmy TINES SA)

1-wibroizolująca otulina bloku, masa zalewowa Edilon Corkelast, 2 – prefabrykowane gniazdo bloku podporowego, 3 – betonowy blok podporowy, 4 - sprężysta podkładka wibroizolacyjna Edilon Resilient Strip

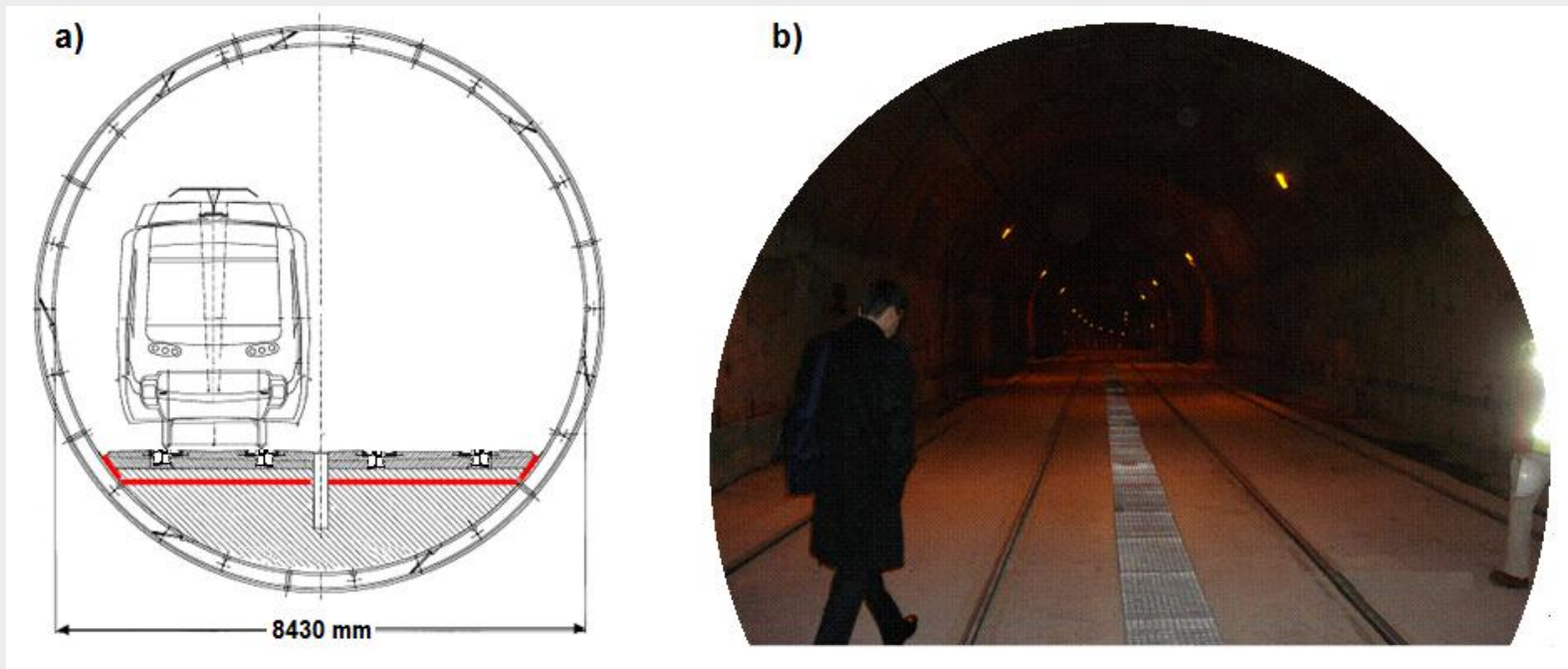


System ERS:

- a) schemat ideowy systemu,
- b) widok torowiska tramwajowego z tym systemem

TECHNICZNE SPOSOBY OBNIŻENIA POZIOMU DRGAŃ OD METRA

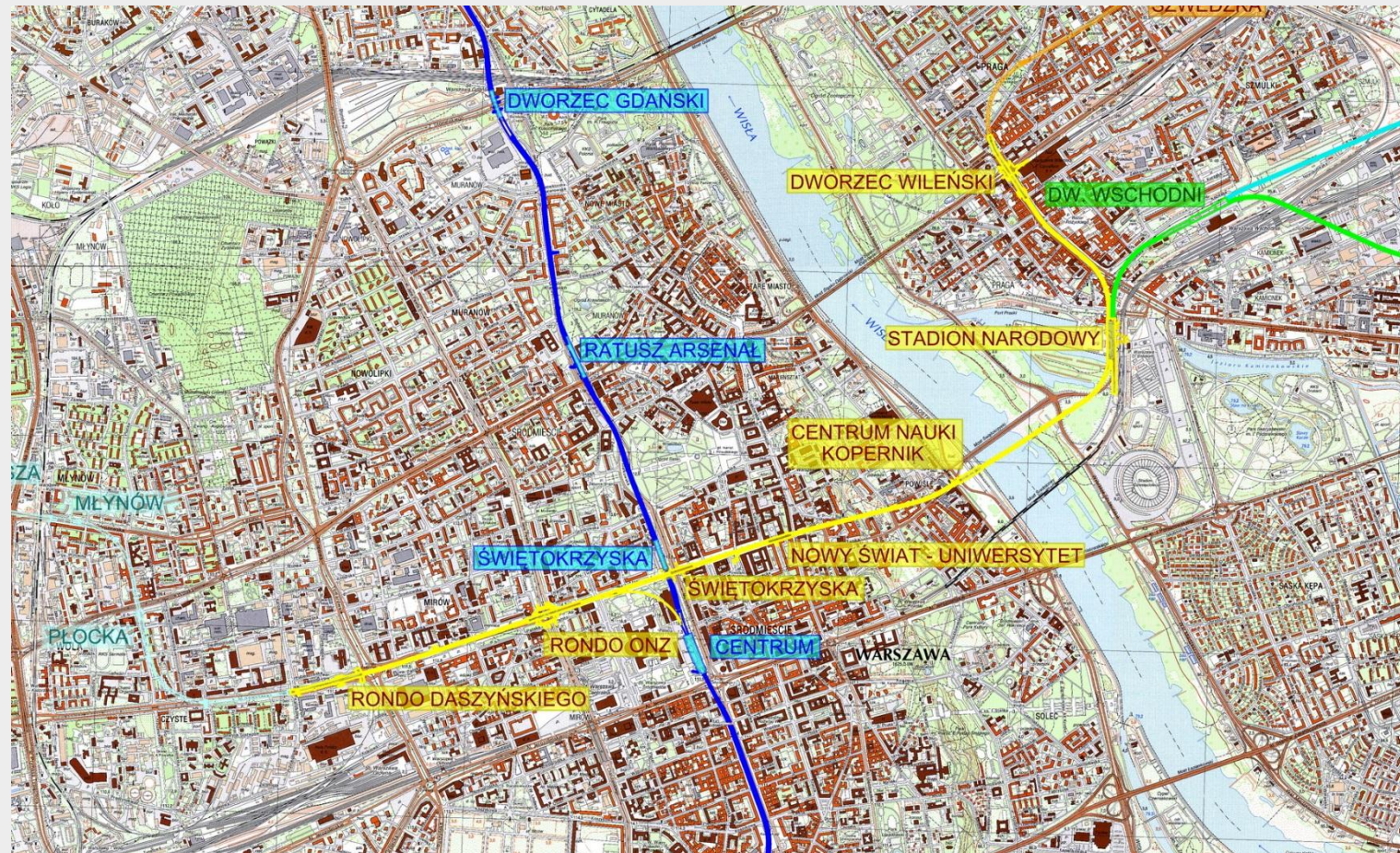
Rozwiązanie z ERS stosowane jest obecnie m. in. w Madrycie również w połączeniu, tam gdzie to konieczne, z matą wibroizolacyjną pod płytą torową. Zaletą systemu ERS jest ułatwienie ewakuacji ludzi (np. podczas pożaru, wypadku czy zamachu) oraz umożliwienie poruszania się w tunelach metra pojazdów służb medycznych i ratunkowych, policji, oddziałów antyterrorystów itp. Zastosowanie dodatkowo oprócz systemu EBS lub ERS mat wibroizolacyjnych pod płytą torową zwiększa skuteczność wibroizolacyjną takiego rozwiązania.



Analiza wpływu drgań na konstrukcje budynków i ludzi w budynkach

W strefie oddziaływania metra zinwentaryzowano wcześniej 473 budynki.

W celu przeprowadzenia szczegółowych badań i analiz, obejmujących: pomiar tła dynamicznego, modelowanie oraz wykonanie obliczeń symulacyjnych, wybrano 77 budynków reprezentatywnych.



Analiza wpływu drgań na konstrukcje budynków i ludzi w budynkach

Dokonując wyboru brano pod uwagę następujące kryteria:

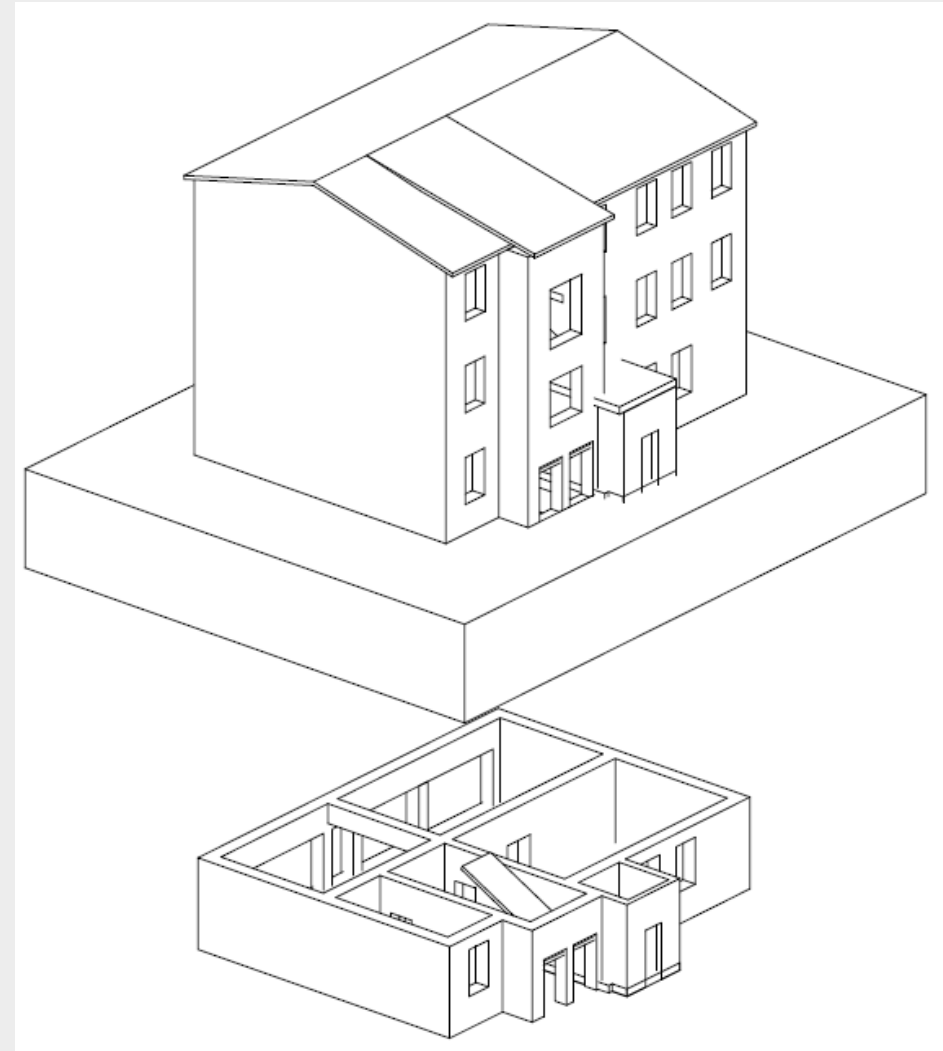
- cechy wpływające na odpowiedź dynamiczną konstrukcji, a więc typ konstrukcji i materiały z jakich jest wykonana, wymiary – w tym liczba kondygnacji, stan zachowania konstrukcji itp.
- zakwalifikowanie budynku do obiektów zabytkowych,
- przeznaczenie pomieszczeń (z uwagi na ocenę wpływu drgań na ludzi),
- odległość budynku od tunelu metra, torów tramwajowych i od jezdni,
- możliwość dostępu do budynków (zgoda właścicieli).

Pod względem cech dynamicznych wyróżniono następujące typy budynków:

- niskie i średnio-wysokie (do 5 kondygnacji nadziemnych) budynki o tradycyjnej konstrukcji murowej,
- średnio-wysokie i wysokie (do 16 kondygnacji nadziemnych) budynki mieszkalne (ewentualnie z parterem o przeznaczeniu handlowo-usługowym) lub biurowe o konstrukcji szkieletowej, płytowo-słupowej lub monolitycznej,
- nietypowe obiekty niskie i średnio-wysokie (sakralne, przemysłowe, itp.),
- wysokościowce.

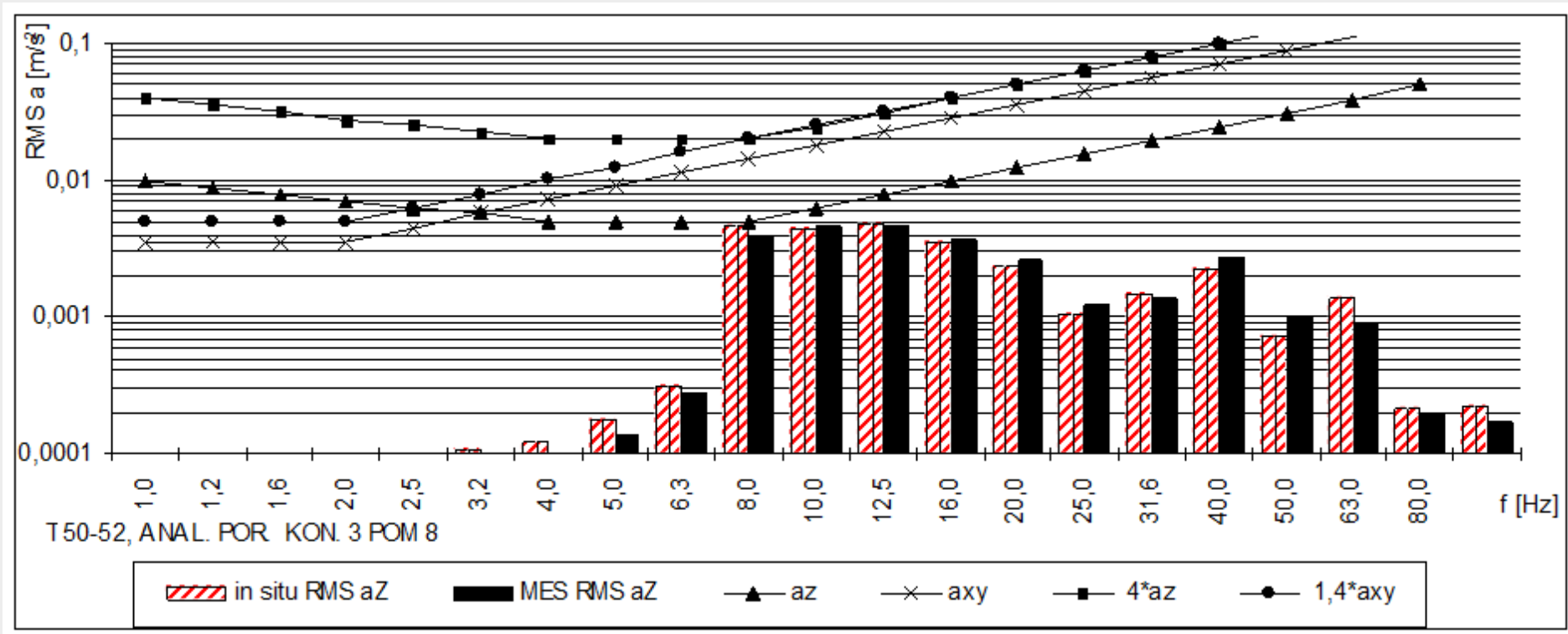
Analiza wpływu drgań na konstrukcje budynków i ludzi w budynkach

Wizualizacja modelu obliczeniowego budynku (całość i pojedyncza kondygnacja)



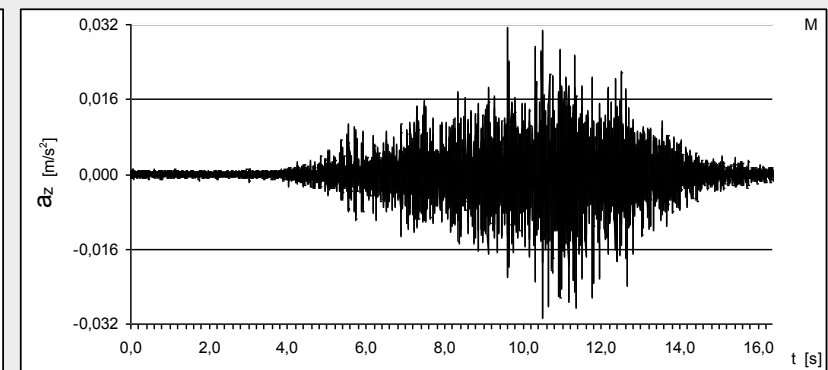
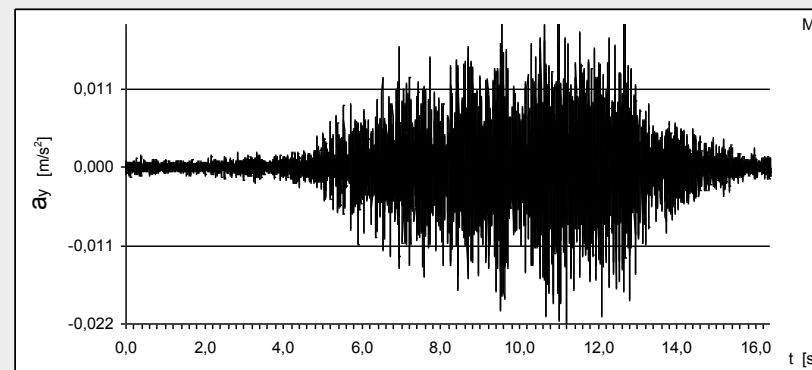
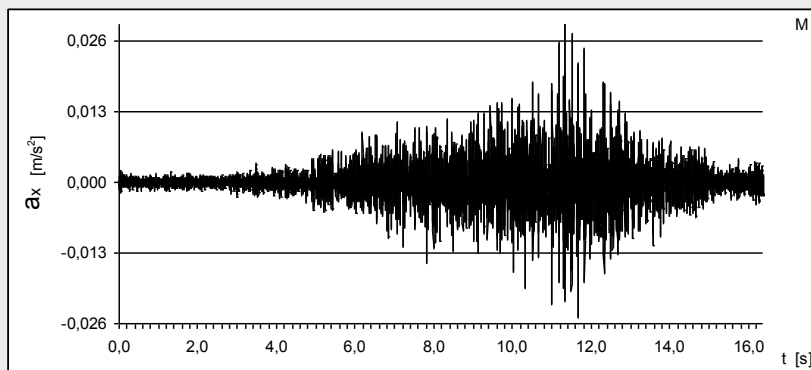
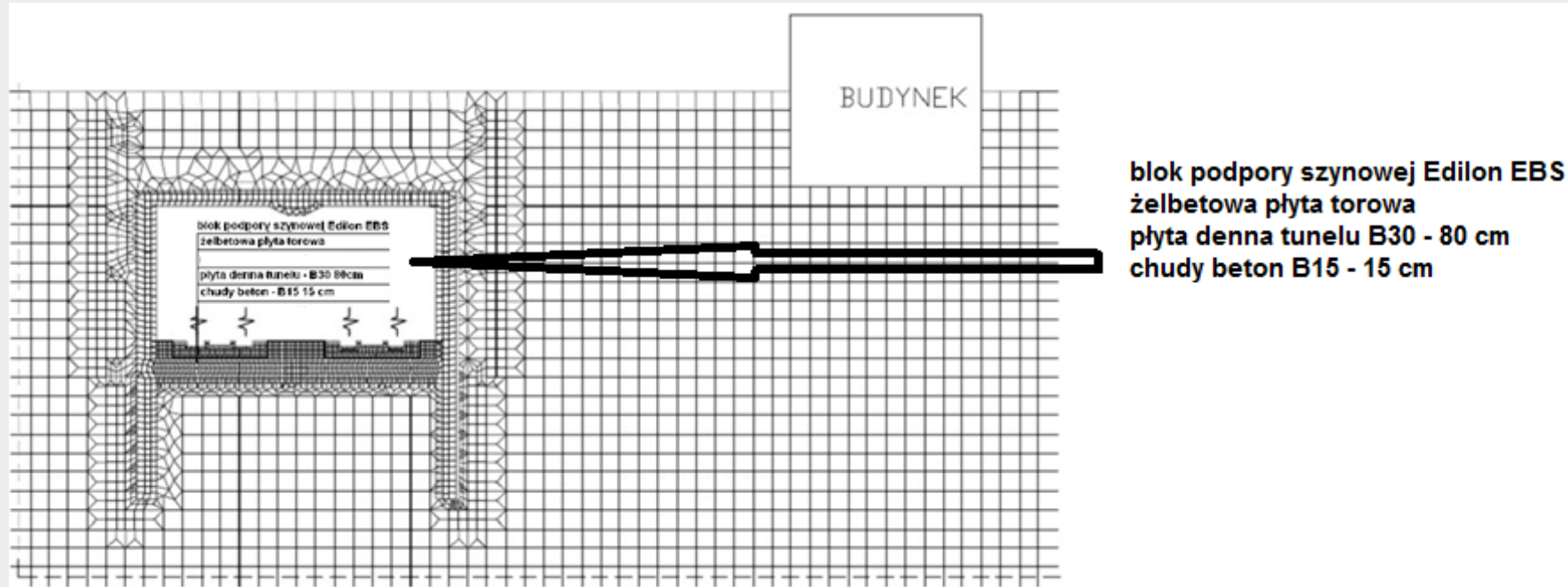
Analiza wpływu drgań na konstrukcje budynków i ludzi w budynkach

Weryfikacja modelu - analiza porównawcza wpływu na ludzi drgań pionowych posadzki na 3-ej kondygnacji jednego z reprezentatywnych budynków w przypadku przejazdu samochodu ciężarowego - wg badań in situ i symulacji numerycznej



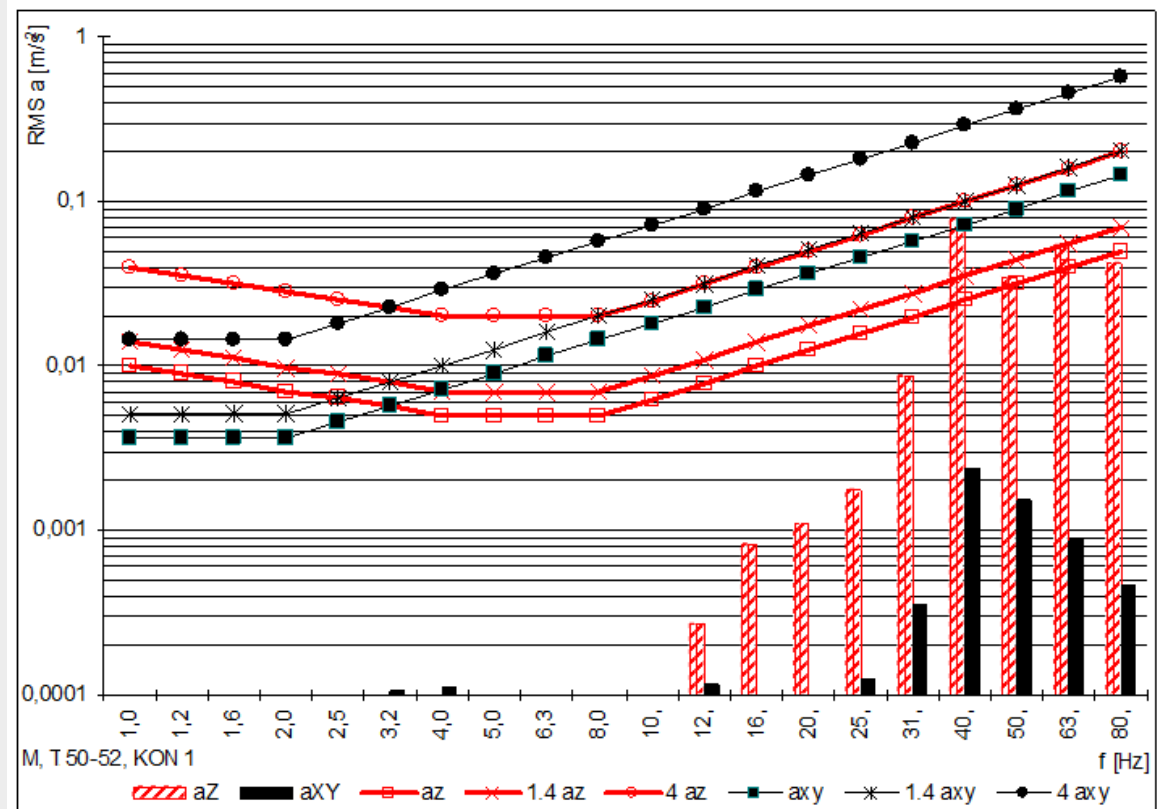
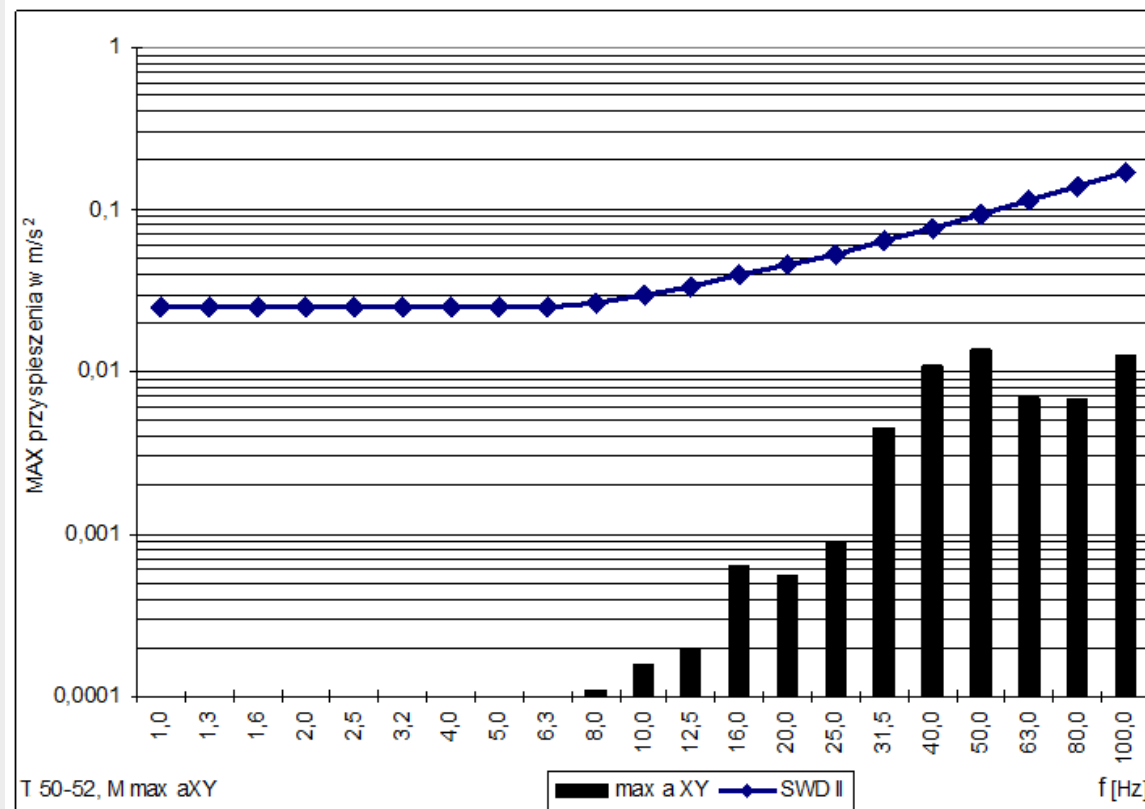
Analiza wpływu drgań na konstrukcje budynków i ludzi w budynkach

Przykład modelu propagacji drgań na odcinku bielańskim I linii metra w Warszawie



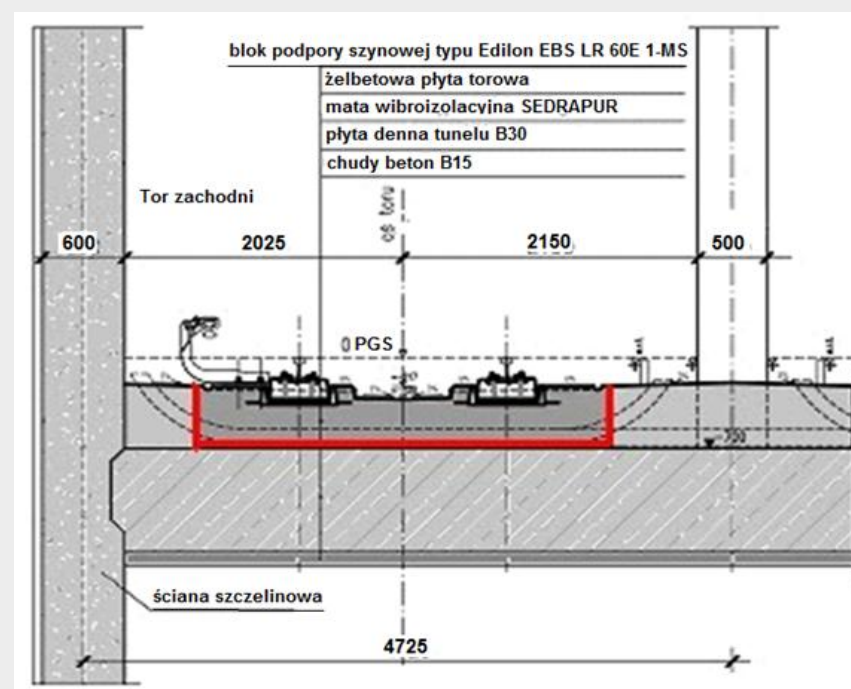
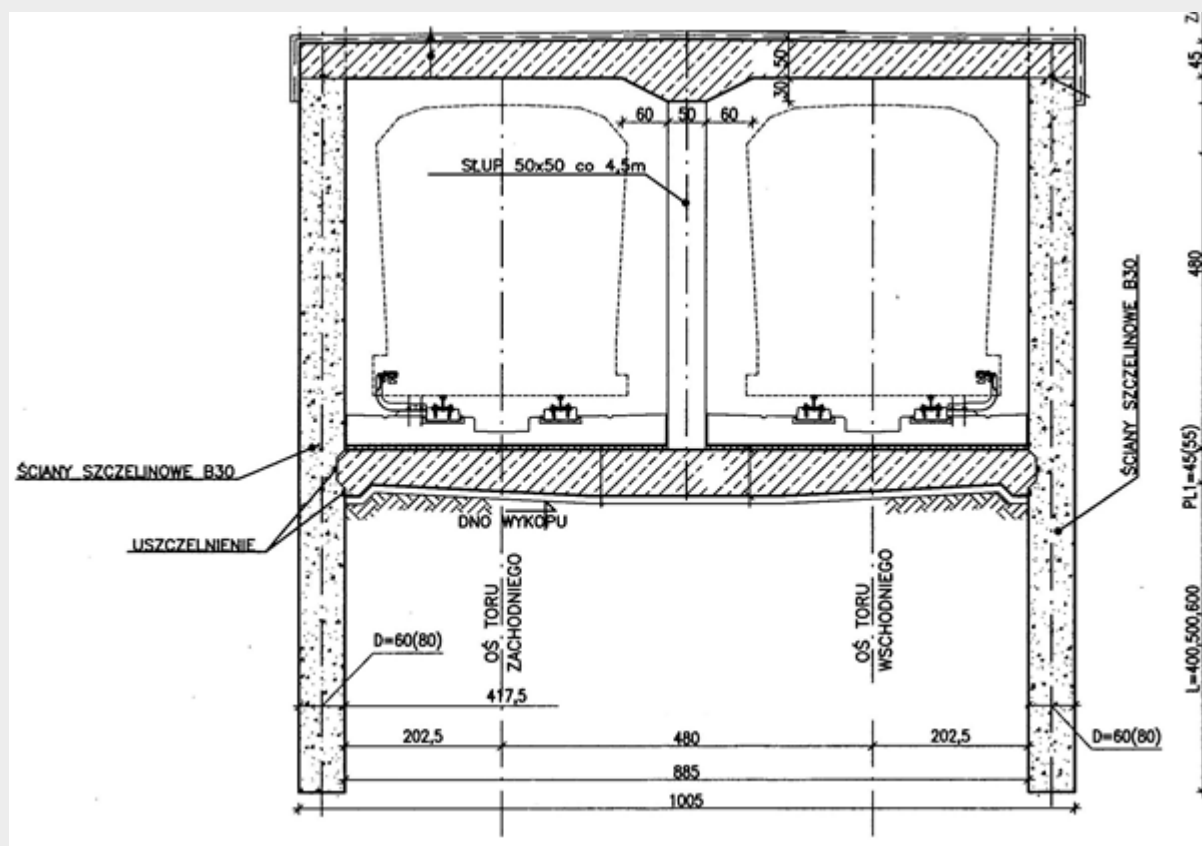
Analiza wpływu drgań na konstrukcje budynków i ludzi w budynkach

Otrzymane dla każdego budynku prognozowane wibrogramy drgań jego fundamentów posłużyły do przeprowadzenia obliczeń dynamicznych budynku i opracowania prognoz wpływu drgań na konstrukcję budynku (rys. 8) i na ludzi w budynku (rys. 9)



ZAPROJEKTOWANIE WIBROIZOLACJI NA I LINII METRA

W większości budynków reprezentatywnych prognozowany poziom wpływu drgań na ludzi był zbyt wysoki (znaczące przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi), dlatego zaprojektowano w tunelu na odcinkach gdzie usytuowane są te budynki nową **nawierzchnię bezpodsypkową z zastosowaniem bloków w otulinie systemu EBS Edilon** oraz tam gdzie to było konieczne także **mat wibroizolacyjnych**.

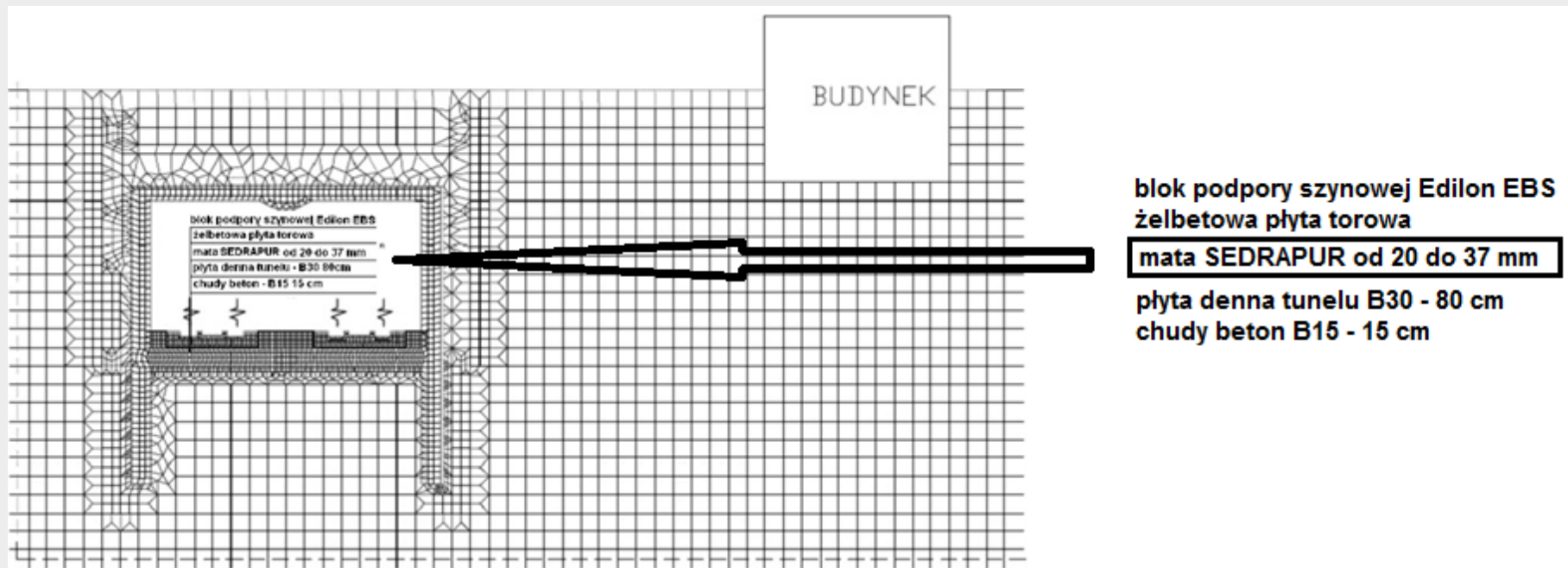


Projekt wykonało Biuro Projektów METROPROJEKT Sp. z o.o., a obliczenia wibroizolacji w IMB PK

Procedura projektowania wibroizolacji

Kolejny etap - zaprojektowanie wibroizolacji, dobór mat wibroizolacyjnych o odpowiednich parametrach.

Wstawia się do konstrukcji nawierzchni szynowej analizowaną wibroizolację i ustala nowe wymuszenie kinematyczne dla poszczególnych budynków.



Stosując to wymuszenie wykonuje się obliczenia dynamiczne sprawdzając wpływ drgań na ludzi na poszczególnych kondygnacjach. Jeżeli nie uzyskano spełnienia wymaganych kryteriów trzeba powtórzyć obliczenia zmieniając parametry wibroizolacji.

ZAPROJEKTOWANIE WIBROIZOLACJI NA I LINII METRA

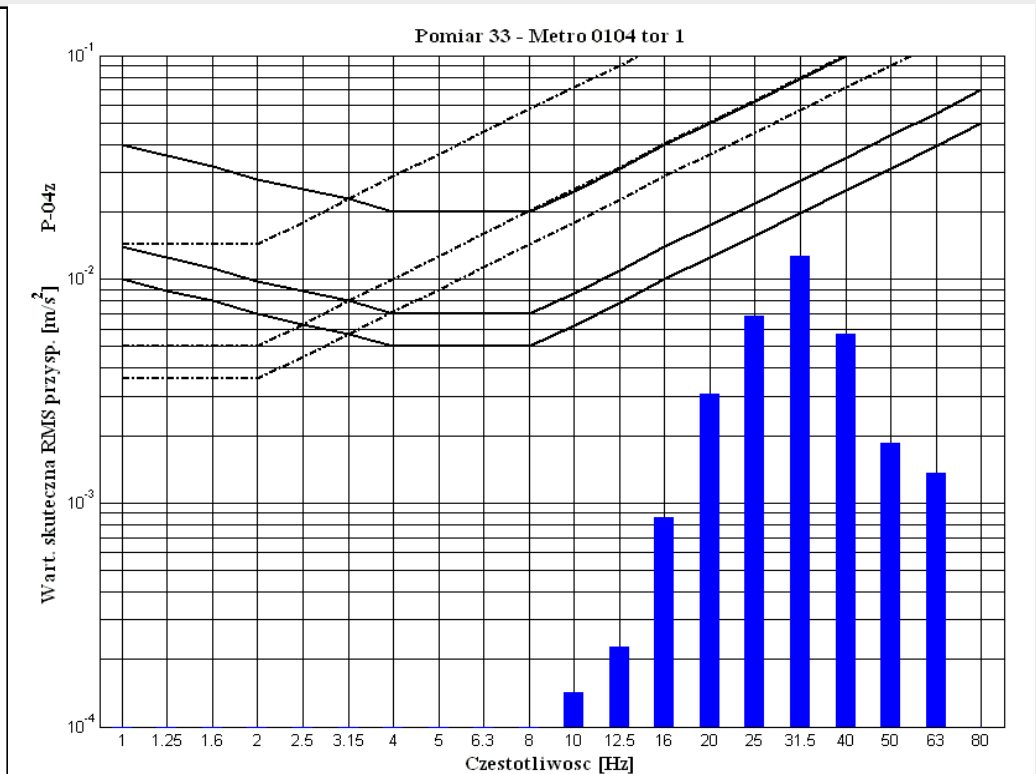
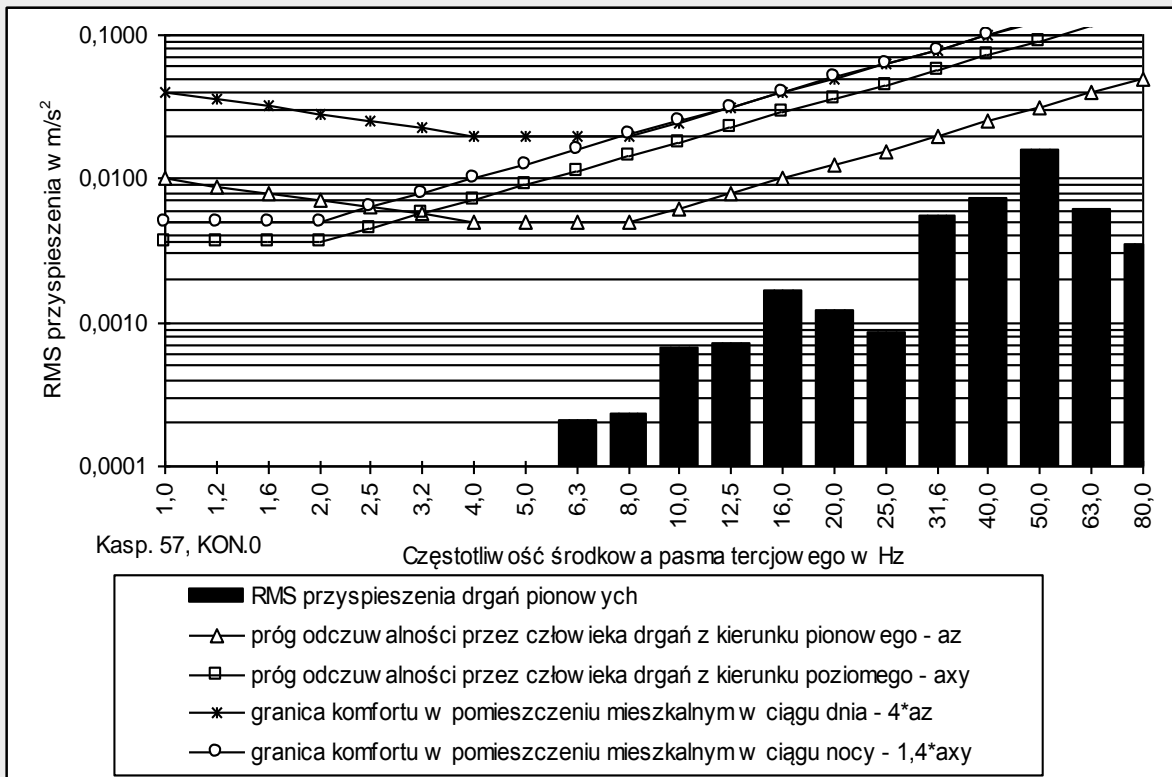


Widok stacji Stare Bielany z systemem EBS

ZAPROJEKTOWANIE WIBROIZOLACJI NA I LINII METRA

Po uruchomieniu metra we wszystkich budynkach reprezentatywnych wykonano pomiary porealizacyjne.

We wszystkich budynkach pomiary porealizacyjne potwierdziły uzyskanie obniżenia poziomu drgań stropów w budynkach poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi.



PODSUMOWANIE

Autorzy niniejszego opracowania podobne analizy wykonali jeszcze dla kolejnych odcinków II linii metra tj. odcinka zachodniego i odcinka wschodniego-północnego. Ponadto dla centralnego odcinka II linii metra w Warszawie wykonano w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej jeszcze:

- Projekt monitoringu drgań w fazie eksploatacyjnej.
- Projekt porealizacyjnych pomiarów drgań wywołanych ruchem pociągów metra,
- System monitoringu drgań wywołanych ruchem pociągów metra podczas eksploatacji.,
- Porealizacyjne pomiary drgań wywołanych ruchem pociągów metra.

Autorzy wykonali także projekty wibroizolacji:

- w kolejowym tunelu średnicowym w Warszawie,
- Odcinka Warszawa Zachodnia – Warszawa Wschodnia,
- na dworcach Katowice Osobowa i Kraków Główny oraz podziemnego dworca Łódź Fabryczna
- a także projekty wibroizolacji kilku linii tramwajowych w Warszawie (m. in. na Moście Śląsko-Dąbrowskim) i w Krakowie.



**Jedzie, jedzie Pendolino
W polityki świat,
Jedni twierdzą, że jest wredne,
Drudzy, że bez wad.**

**A mnie guzik to obchodzi,
Jako pasażera,
czy się będą jeszcze długo,
Czy też krótko spierać.**

**Jadę szybko, punktualnie
I to na plus piszę.
Ale w drugiej klasie ciasno,
Że ja ledwo dyszę.**

**Mało także jest toalet,
To rzecz oczywista,
Ale jak chcesz szybko jechać,
Musisz nogi ścisnąć.**

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ