

KRZYSZTOF STYPUŁA

prof. dr hab. inż., Politechnika
Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej,
Instytut Mechaniki Budowli, 31-155
Kraków, ul. Warszawska 24,
12 6282394, kstypula@pk.edu.pl

KRZYSZTOF KOZIOL

dr inż., Politechnika Krakowska,
Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut
Mechaniki Budowli, 31-155 Kraków,
ul. Warszawska 24, 12 6282391,
kkoziol@pk.edu.pl

Doświadczenia z metra w Warszawie w zakresie ochrony budynków i ludzi w budynkach przed drganiami¹

Streszczenie. Artykuł dotyczy problemu wpływu drgań generowanych przez metro na blisko położone budynki i na ludzi w tych budynkach. Wymieniono ustawy, wytyczne oraz uregulowania normowe dotyczące tych zagadnień. Podano algorytm ochrony budynków i ludzi w budynkach opracowany na podstawie doświadczeń z funkcjonowania metra w Warszawie. Wymieniono techniczne sposoby obniżenia poziomu drgań generowanych przez metro oraz przedstawiono metodykę zastosowaną podczas projektowania wibroizolacji nawierzchni szynowej na bielańskim odcinku I linii metra w Warszawie. Na koniec podano wnioski dotyczące możliwości wykonania metra w Krakowie z uwagi na wpływy dynamiczne na budynki (w tym budowle zabytkowe) oraz na ludzi przebywających w tych budynkach. Przykłady wielu historycznych miast, w których funkcjonuje komunikacja podziemna świadczą o tym, że metro nie stanowi zagrożenia dla zabytków oraz zabytkowego charakteru tych miast. Metro jest „ekologicznym” środkiem transportu. Jedyne zanieczyszczenie jakie emituje na zewnątrz stanowią drgania generowane przejazdami pociągów. Prawidłowe zaprojektowanie wibroizolacji pozwala wyeliminować problem nadmiernego wpływu drgań metra na budynki i na ludzi w budynkach, nawet w przypadku metra płytkiego, tak jak to ma miejsce w Warszawie. Można zatem przyjąć, że w przypadku budowy metra w Krakowie problem drgań może zostać z powodzeniem rozwiązany, a krakowskie zabytki ani mieszkańcy Krakowa nie ucierpią z tego powodu.

Słowa kluczowe: drgania transportowe, metro, wibroizolacja

Wprowadzenie

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.

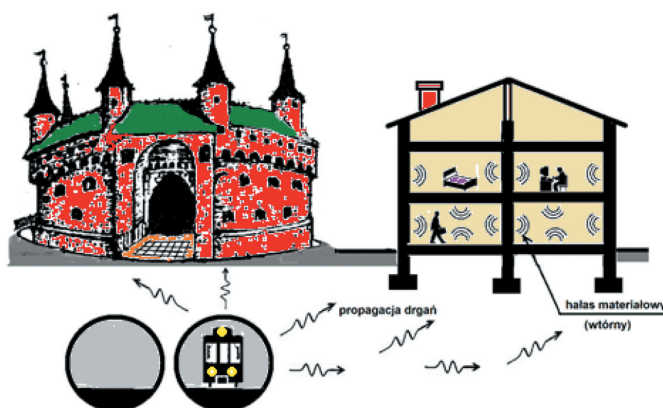
Spośród wszystkich środków transportu miejskiego metro jest najbardziej „ekologiczne”. Nie produkuje spalin, nie zanieczyszcza wody ani gleby wyciekami produktów ropopochodnych, a jeśli jedzie w podziemnym tunelu to także nie emituje hałasu.

Na etapie budowy metra jedynymi zagrożeniami dla istniejącej zabudowy są ewentualne ruchy powierzchni (osiadania) gruntu podczas drążenia tuneli oraz wykonywania stacji, a także wpływ na budynki drgań wywołanych niektórymi pracami budowlanymi np. wbijaniem w grunt ścianek szczelnych lub pali.

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 [1, 2]. W przypadku metra płytkiego czasami może towarzyszyć tym wpływom tzw. hałas materiałowy (hałas wtórny), emitowany przez elementy konstrukcyjne budynku (ściany, stropy), które wprawione w drgania działają jak membrany głośników, wydając niskie dźwięki – rysunek 1.

Rodzi się zatem pytanie: czy drgania związane z funkcjonowaniem metra w takich miastach jak Kraków nie będą powodować uszkodzeń zabytkowej zabudowy? Często podnoszone są wątpliwości, czy nie zostanie naruszony zabytkowy charakter miasta, w tym – czy nie zostanie on zakłócony nowymi budowlami wejść do stacji metra. Odpowiedź może być dwojaka: przez podanie przykładów z innych miast o zabytkowym charakterze posiadających linie metra albo przez przekazanie naszych rodzimych doświadczeń w zakresie ochrony budynków i ludzi w budynkach przed drganiami generowanymi przez metro w Warszawie.

Metro od lat funkcjonuje w wielu miastach o zabytkowej zabudowie, nie naruszając ich zabytkowego charakteru ani nie uszkadzając historycznych budowli. A oto kilka spektakularnych przykładów. Metro w Wiedniu (U-Bahn Wien) jest jednym z najstarszych systemów metra w Europie, jego początki sięgają 1898 roku, kiedy to uruchomiono szybką kolej miejską (premetro). Stale rozbudowywane, ma obecnie 5 linii o łącznej długości 78,4 kilometrów (104 stacje), z których trzy przecinają się pod zabytkową zabudową w okolicy Karlsplatz, a dwie przebiegają bezpośrednio pod zabytkową katedrą św. Stefana (Stephansdom).



Rys. 1. Schemat propagacji drgań z tuneli metra i idea hałasu materiałowego

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2015. Wkład autorów w publikację: K. Stypuła 50%, K. Koziol 50%.

W Atenach najstarsza linia podziemnej szybkiej kolei miejskiej działa od 1904 roku i przecina starożytną Agorę Grecką w okolicy stacji Monastiraki. W 2000 roku otwarto dwie nowe linie metra, które krzyżują się z pierwszą linią w tym właśnie zabytkowym centrum. Ogółem obecnie w Atenach są trzy linie metra o łącznej długości 77 kilometrów i o 65 stacjach.

Pierwszą linię metra uruchomiono w Paryżu w 1900 roku. Obecnie jest tam 16 linii, o łącznej długości 215 kilometrów (301 stacji). Jest większe niż metro w Berlinie (10 linii, 173 stacje oraz 146 kilometrów), a także ma więcej linii i stacji niż metro w Londynie (11 linii, 274 stacji oraz 408 kilometrów). Metro paryskie obsługuje jedynie stacje centrum miasta, w dużej mierze zabytkowe, bowiem na przedmieściach działa tzw. RER (Szybka Sieć Regionalna). I tak można by dalej wymieniać korzystające z metra zabytkowe miasta, których autentyczność jest ściśle chroniona: Barcelona, Bruksela, Budapeszt, Londyn, Genua, Mediolan (La Scala), Norymberga, Praga, St. Petersburg, Sztokholm, Rzym itd. Na marginesie warto dodać, że najstarsze obiekty metra same stają się zabytkami i wchodzi do naszego dziedzictwa kulturowego. Dla przykładu paryskie metro słynie ze sztuki kutego żelaza. Do dziś istnieje 86 secesyjnych wejść do metra zaprojektowanych przez Hectora Guimarda, objętych obecnie ochroną konserwatorską. Również w innych krajach wystrój, szczególnie stacji metra, stanowi często swoiste dzieło sztuki.

Jak wynika z powyższych przykładów, metro może funkcjonować w zabytkowej zabudowie miejskiej, przy czym istotna jest ochrona tej zabudowy i jej mieszkańców przed nadmiernym wpływem drgań generowanych przejazdami pociągów metra. Autorzy, zajmujący się przez wiele lat rozwiązywaniem tego typu problemów w przypadku metra w Warszawie (por. [3–10]), przedstawiają poniżej wybrane doświadczenia z tego zakresu.

Uregulowania normowe i wytyczne

Jak już wspomniano, wpływ drgań na konstrukcję obiektów budowlanych i na ludzi przebywających w budynkach jest w praktyce jedynym problemem ochrony środowiska związanym z komunikacją podziemną. Dlatego, budując metro, a następnie go eksploatując, należy w tym zakresie spełnić wymagania odpowiednich ustaw, rozporządzeń i norm.

Wśród ustaw należy wymienić:

- Ustawa „Prawo ochrony środowiska” z dnia 27 kwietnia 2001 (Dz. U. z 2001, Nr 62, poz. 627),
- „Ustawa o dostępie do informacji o środowisku i jego ochronie oraz o ocenach oddziaływania na środowisko” z dnia 9 listopada 2000 (Dz.U. z 2000 r. Nr 109, poz. 1157),
- „Ustawa o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie” z dnia 13 kwietnia 2007 (Dz.U. z 2007 r., Nr 75, poz. 493),
- Ustawa „Prawo budowlane” z dnia 7 lipca 1994 r. (Dz.U. z 1994 r., Nr 89, poz. 414).

Już pierwsza z tych ustaw w art. 6 ust. 1 stwierdza: *Kto podejmuje działalność mogącą negatywnie oddziaływać na środowisko, jest obowiązany do zapobiegania temu oddziaływowaniu.*

Obiekty metra muszą spełniać warunki podane w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 17 czerwca 2011 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty metra i ich usytuowanie. Kwestię ochrony przed drganiami metra reguluje załącznik 2 do tego rozporządzenia zatytułowany: **WYMAGANIA W ZAKRESIE OGRANICZENIA WPŁYWU DRGAŃ²**. Załącznik ten zawiera 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.
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.

² Załącznik został przyjęty na wniosek Metra Warszawskiego, na podstawie założeń opracowanych przez prof. dr hab. inż. Krzysztofa Stypułę.

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.

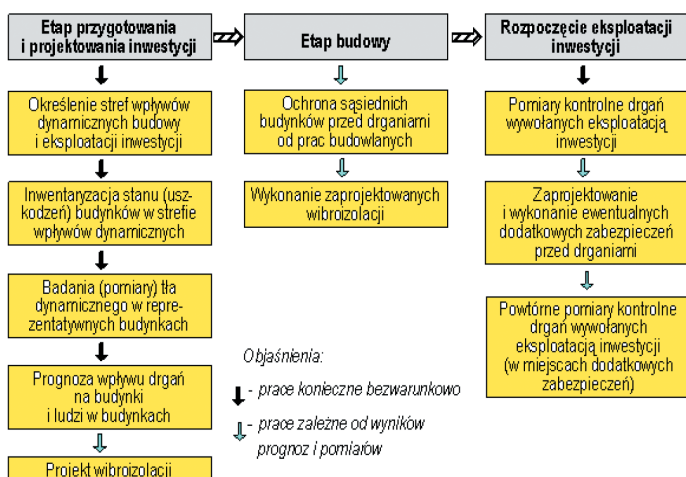
Jak wspomniano w powyższym Rozporządzeniu, zasady diagnostyki i kryteria ocen wpływu drgań na konstrukcję budynków i na ludzi w nich przebywających zawarte są w dwu polskich normach opracowanych w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej:

- 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

W przypadku inwestycji takiej jak metro, ochrona istniejących budynków i ludzi w nich przebywających przed wpływem drgań wymaga wykonania w odpowiedniej kolejności szeregu prac takich jak: inwentaryzacja stanu technicznego wytypowanych (reprezentatywnych) obiektów budowlanych, pomiary dotychczasowych wpływów na te obiekty drgań od istniejącego już transportu miejskiego (pomiary tła dynamicznego), prognozy wpływu przyszłych drgań metra na te obiekty i ludzi w nich przebywających, a w razie potrzeby zaprojektowanie odpowiednio skutecznych rozwiązań ograniczających te wpływy. Taki algorytm postępowania, opracowany na podstawie doświadczeń zebranych przez autorów podczas projektowania wibroizolacji metra w Warszawie, przedstawiono na rysunku 2.



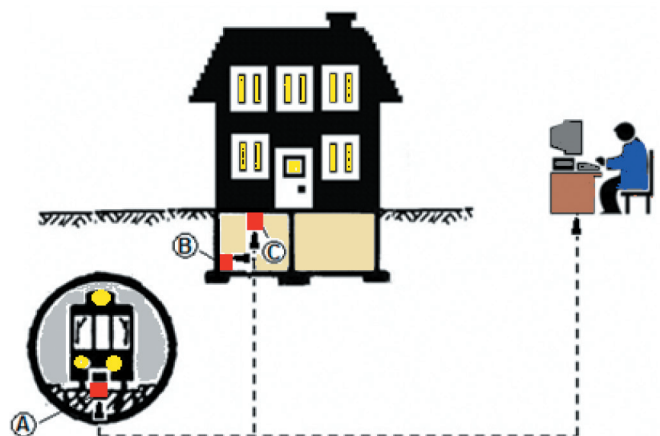
Rys. 2. Harmonogram prac z zakresu ochrony przed drganiami w przypadku inwestycji transportu szynowego

Techniczne sposoby obniżenia poziomu drgań generowanych przez metro

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). Jednak zdecydowanie większe obniżenie wpływów dynamicznych metra na sąsiednią zabudowę uzyskuje się w wyniku monitorowania poziomu drgań i wymiany lub reprofilacji kół wagonów. Bowiem w wyniku zdeformowania kół wpływ drgań na budynki, a przede wszystkim na ludzi w tych budynkach, może wzrosnąć nawet kilkunastokrotnie. Dlatego w warszawskim metrze opracowano³ system monitorowania wpływu drgań na budynki i na ludzi w tych budynkach. Na I linii metra warszawskiego system został zainstalowany w trzech punktach (w trzech budynkach), a na odcinku centralnym II linii metra wykonywany jest w dwóch punktach. Na każdy punkt składają się czujniki pomiarowe umieszczone w dolnej części budynku, celem oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku oraz na stropie w budynku, celem oceny wpływu drgań na ludzi. Dodatkowy czujnik służy do pomiaru drgań w tunelu metra obok danego budynku). Schemat ideowy jednego punktu systemu monitorowania drgań w metrze warszawskim przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat ideowy systemu monitoringu drgań w metrze warszawskim 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

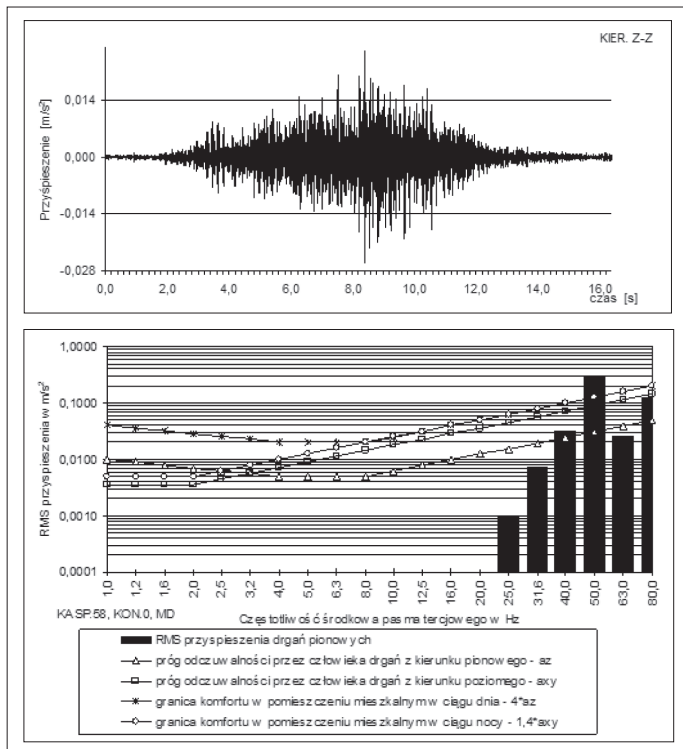
³ System monitoringu drgań został opracowany przez zespół pracowników Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. K. Stypuły i zrealizowany we współpracy z firmą NeostRAIN sp. z o.o.

Drgania zarejestrowane w budynku podczas każdego przejazdu pociągu metra są poddawane analizie wpływu drgań na konstrukcję budynku i na ludzi w budynku. Przykładową analizę wpływu na ludzi (w tercjach częstotliwości) przedstawiono na rysunku 4.

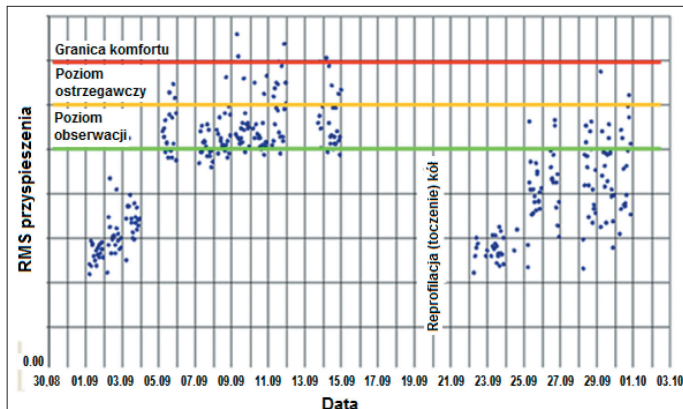
Największa wartość uzyskana z analizy jest nanoszona na wykres i porównywana z granicami zaznaczonymi na tym wykresie (przykładowy wykres na rysunku 5), dając informację o konieczności wymiany kół w przypadku przekroczenia tych granic.

Na powyższym wykresie widoczne są zmiany wpływu drgań na ludzi w miarę zużywania się kół oraz po wykonaniu reprofiliacji kół.

Kolejnym ważnym krokiem w kierunku ograniczenia emisji drgań jest zastosowanie rozwiązań wibroizolacyjnych w tunelu metra: w konstrukcji nawierzchni szynowej i w konstrukcji podtorza. W metrze warszawskim na

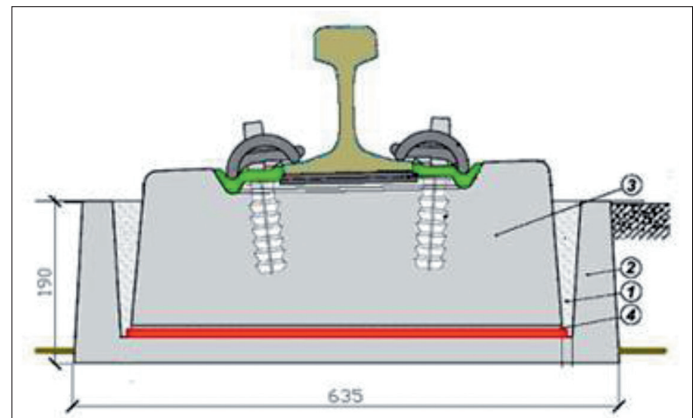


Rys. 4. Przebieg czasowy drgań pionowych stropu oraz wyniki analizy wpływu tych drgań na ludzi przebywających na tym stropie



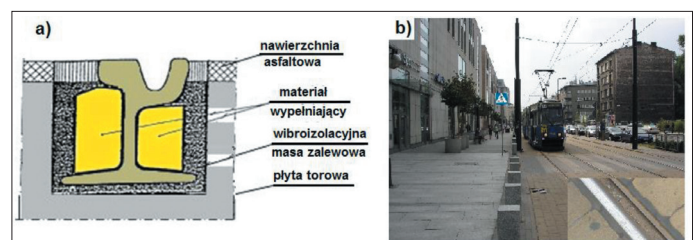
Rys. 5. Przykładowy wykres rozkładu, w kolejnych dniach, największych wartości z analizy wpływu na ludzi w monitorowanym budynku drgań, generowanych przez pociąg o numerze x

I i II linii metra zastosowano system bloków w otulinie tzw. EBS (Embedded Block System) – rysunek 6, który uzupełniono matą wibroizolacyjną pod płytą torową. Zamiast systemu EBS możliwe jest zastosowanie, znanego u nas z nawierzchni tramwajowych, systemu szyny w otulinie tzw. ERS (Embedded Rail System) – rysunek 7. Przykładowo, takie rozwiązanie stosowane jest obecnie m.in. w Madrycie również w połączeniu, tam gdzie to konieczne, z matą wibroizolacyjną pod konstrukcją toru (rysunek 8). Zaletą systemu ERS jest ułatwienie ewakuacji ludzi z tunelu (np. podczas pożaru, wypadku czy zamachu terrorystycznego) 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.

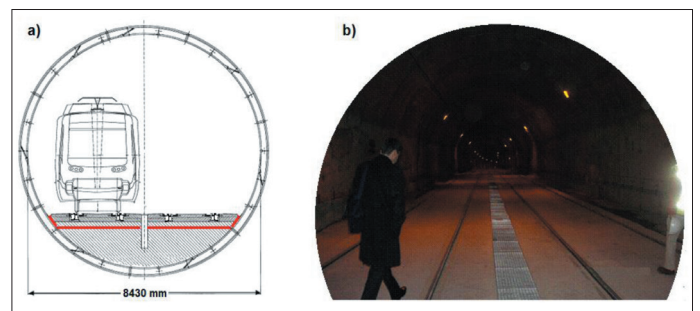


Rys. 6. Schemat zastosowanej w metrze warszawskim podpory blokowej w systemie EBS EDILON (wg materiałów firmy TINES SA)

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



Rys. 7. System ERS: a) schemat ideowy systemu, b) widok torowiska tramwajowego z tym systemem



Rys. 8. Tunel metra w Madrycie z systemem ERS: a) przekrój tunelu (czerwonym kolorem zaznaczono matę wibroizolacyjną), b) widok zrealizowanej nawierzchni

Zaprojektowanie wibroizolacji nawierzchni metra na bielańskim odcinku I linii metra w Warszawie

Sposób postępowania, prowadzący do prawidłowego zabezpieczenia budynków i ludzi w budynkach, przeszedł można na przykładzie ostatniego (tzw. bielańskiego) odcinka I linii metra w Warszawie. Cały odcinek od stacji „Marymont” do stacji „Młociny”, o długości około 3,9 kilometra, składa się z 4 stacji, 4 tuneli szlakowych oraz torów odstawczych. Na jego części, tj. od stacji „Słodowiec” do końcowej stacji „Młociny” (rys. 9), analizowano konieczność zastosowania wibroizolacji. Na rozważanym odcinku, w strefie oddziaływań dynamicznych metra, której zasięg został w Warszawie (metro płytkie) określony na 40 metrów (w rzucie poziomym), od ścian zewnętrznych tunelu znalazło się 129 budynków. 36 z nich wybrano jako reprezentatywne. We wszystkich 129 budynkach wykonano inwentaryzację stanu technicznego ich konstrukcji (wraz z fotograficzną dokumentacją uszkodzeń), a następnie w budynkach reprezentatywnych wykonano kolejno:

- pomiary tła dynamicznego⁴,
- prognozę wpływu drgań na budynek i ludzi przebywających w budynku.



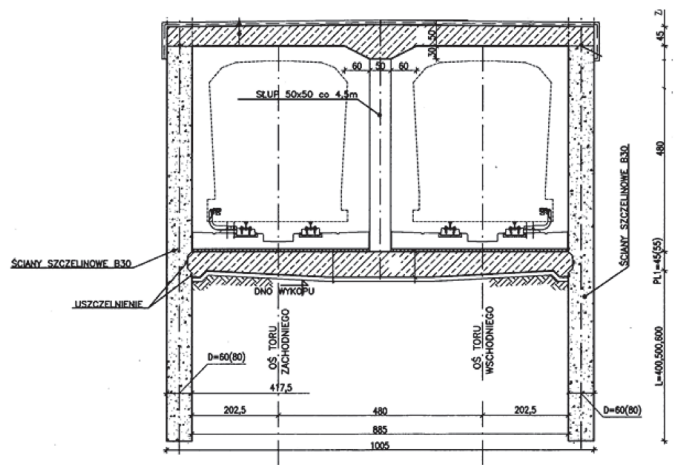
Rys. 9. Rozważany odcinek I linii metra

W większości budynków reprezentatywnych prognozowany poziom wpływu drgań na ludzi był zbyt wysoki (znaczące przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi), dlatego zaprojektowano w tunelu (rys. 10) na odcinkach, gdzie usytuowane są te budynki, nową nawierzchnię bezpodsypaną z zastosowaniem bloków w otulinie systemu EBS Edilon oraz tam, gdzie to było konieczne, także mat wibroizolacyjnych.

Procedurę prognozowania drgań i projektowania wibroizolacji można przedstawić na przykładzie jednego z budynków (rys. 11):

- pomiary tła dynamicznego – pomierzono drgania od przejazdów pojazdów samochodowych w ulicy, przy której znajduje się budynek, które to przejazdy były jedynym źródłem drgań istniejącym przed budową tuneli metra. Wyniki analizy wpływu tych drgań na budynek przedstawiono na rysunku 12, a przykładowe (w odniesieniu do przypadku składowej pionowej drgań na piętrze budynku) wyniki analiz ich wpływu na ludzi w budynku K57 zamieszczono na rysunku 13 (słupki żółte). Z rysunku 12 wynika, że pomierzone drgania są nieodczuwalne dla konstrukcji budynku K57. Natomiast z analiz wpływu tych drgań na ludzi (rys. 13) widać, że są to drgania znacznie przekraczające próg odczuwalności drgań przez ludzi;

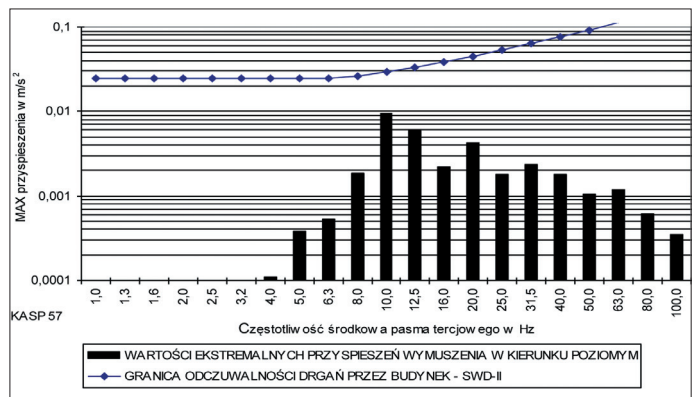
⁴ Wszystkie opisywane w niniejszej pracy pomiary drgań wykonało Laboratorium Badania Odształtań i Drgań Budowli w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej (posiadające obecnie akredytację nr AB846 wydaną przez Polskie Centrum Akredytacji).



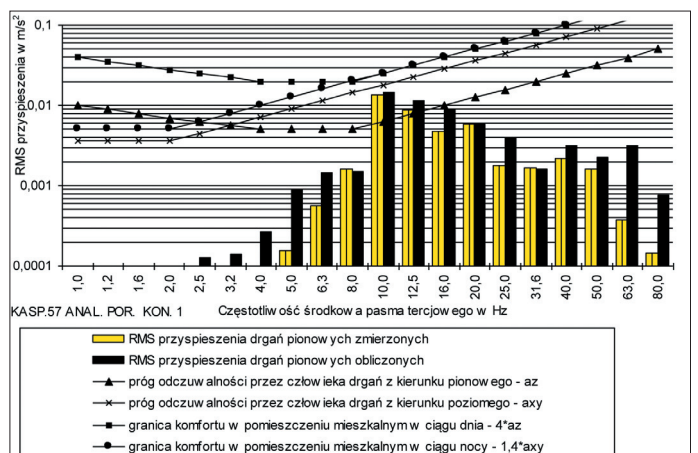
Rys. 10. Przekrój tunelu metra warszawskiego na odcinku bielańskim (wg projektu Biura Projektów „Metroprojekt” Sp. z o.o.)



Rys. 11. Widok analizowanego budynku

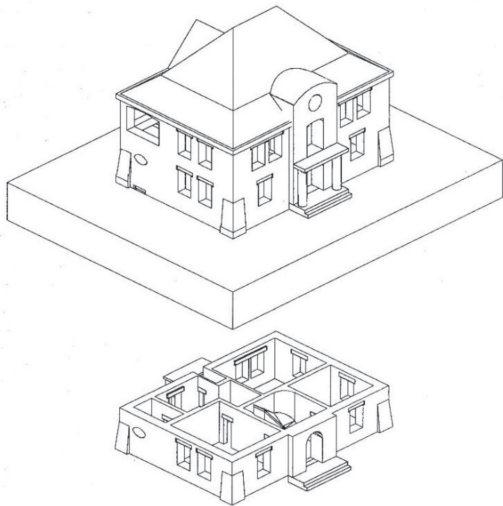


Rys. 12. Wpływ drgań na budynek K 57 w przypadku przejazdu samochodu ciężarowego



Rys. 13. Analiza porównawcza wpływu na ludzi drgań pionowych na I piętrze budynku K57 w przypadku przejazdu samochodu ciężarowego (pomiar nr 4) – wg badań in situ i symulacji numerycznej

b) sporządzono model obliczeniowy budynku MES (rysunek 14), który został zweryfikowany przez porównanie wyników otrzymanych z pomiarów tła dynamicznego z rezultatami obliczeń symulacyjnych wykonanych dla tego samego przejazdu samochodu (rysunek 13); o poprawności modelu świadczy fakt, że wartości uzyskane z obliczeń symulacyjnych nieznacznie przewyższają wartości otrzymane w wyniku pomiarów in situ;



Rys. 14. Wizualizacja modelu obliczeniowego budynku K 57 (całość i pojedyncza kondygnacja)

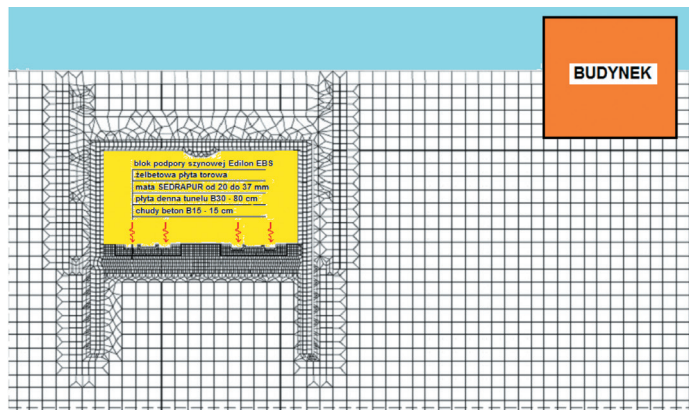
c) na podstawie obliczeń symulacyjnych określono prognozowane przebiegi drgań fundamentów budynku (wymuszenie kinematyczne), posługując się modelem propagacji drgań przedstawionym na rysunku 15;

d) wykonano obliczenia symulacyjne wpływu prognozowanych drgań wywołanych przejazdami metra na analizowany budynek, przyjmując dotychczas stosowaną w metrze warszawskim konstrukcję nawierzchni szynowej. Wyniki oceny wpływu tych drgań na konstrukcję budynku przedstawia rysunek 16, a najbardziej niekorzystne rezultaty analiz wpływu drgań metra na ludzi przebywających na parterze budynku K57 zamieszczono na rysunkach 17 i 18;

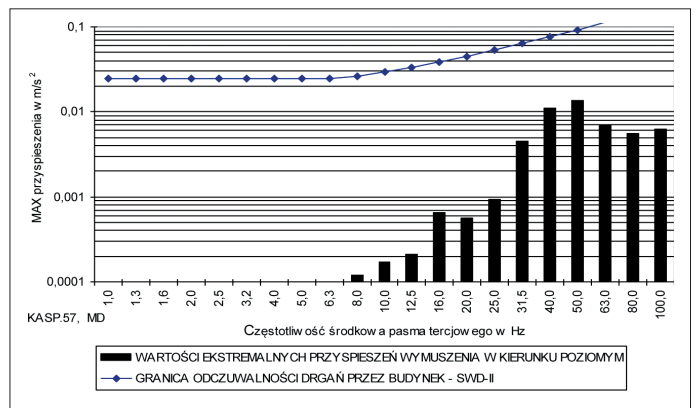
Z rysunku 16 wynika, że prognozowany wpływ drgań na konstrukcję budynku będzie nieodczuwalny dla tego budynku. Natomiast prognozowany wpływ drgań na ludzi w budynku (rysunki 17 i 18) jest bardzo wysoki nie tylko powyżej progu odczuwalności drgań przez ludzi, ale znacznie powyżej granic komfortu należnego ludziom zarówno w okresie dnia, jak i nocy;

e) wobec wyników prognozy przedstawionych powyżej konieczne było podjęcie prac nad zaprojektowaniem⁵ nawierzchni szynowej z zastosowaniem wibroizolacji w postaci wspomnianych bloków EBS Edilon i mat wibroizolacyjnych (rysunek 19);

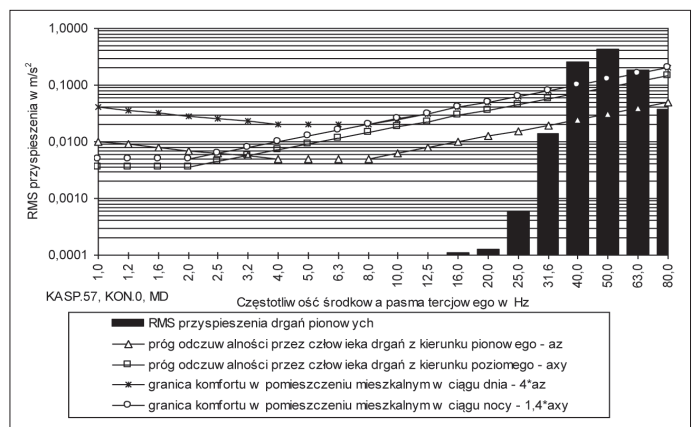
⁵ Projekt nawierzchni wykonało Biuro Projektów METROPROJEKT Sp. z o.o. na podstawie obliczeń wibroizolacji przeprowadzonych w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej



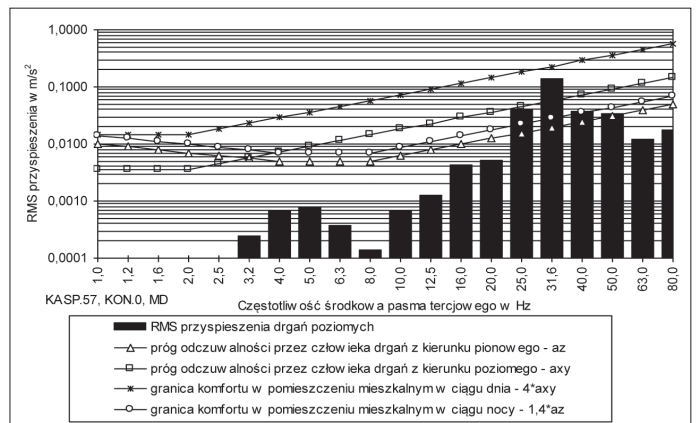
Rys. 15. Model do analizy propagacji drgań



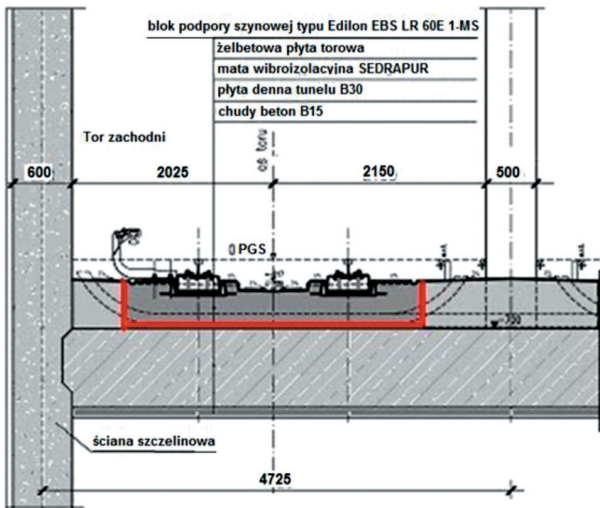
Rys. 16. Prognozowany wpływ drgań wywołanych przejazdami metra na budynek K57 (przy braku wibroizolacji)



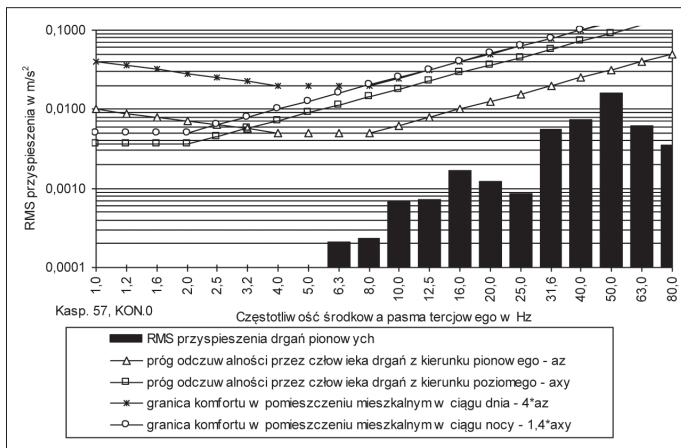
Rys. 17. Prognozowany wpływ drgań pionowych na ludzi przebywających na parterze budynku K57 podczas przejazdu metra (przy braku wibroizolacji)



Rys. 18. Prognozowany wpływ drgań poziomych na ludzi przebywających na parterze budynku K57 podczas przejazdu metra (przy braku wibroizolacji)



Rys. 19. Przekrój połowy tunelu z zaznaczoną matą wibroizolacyjną [9]

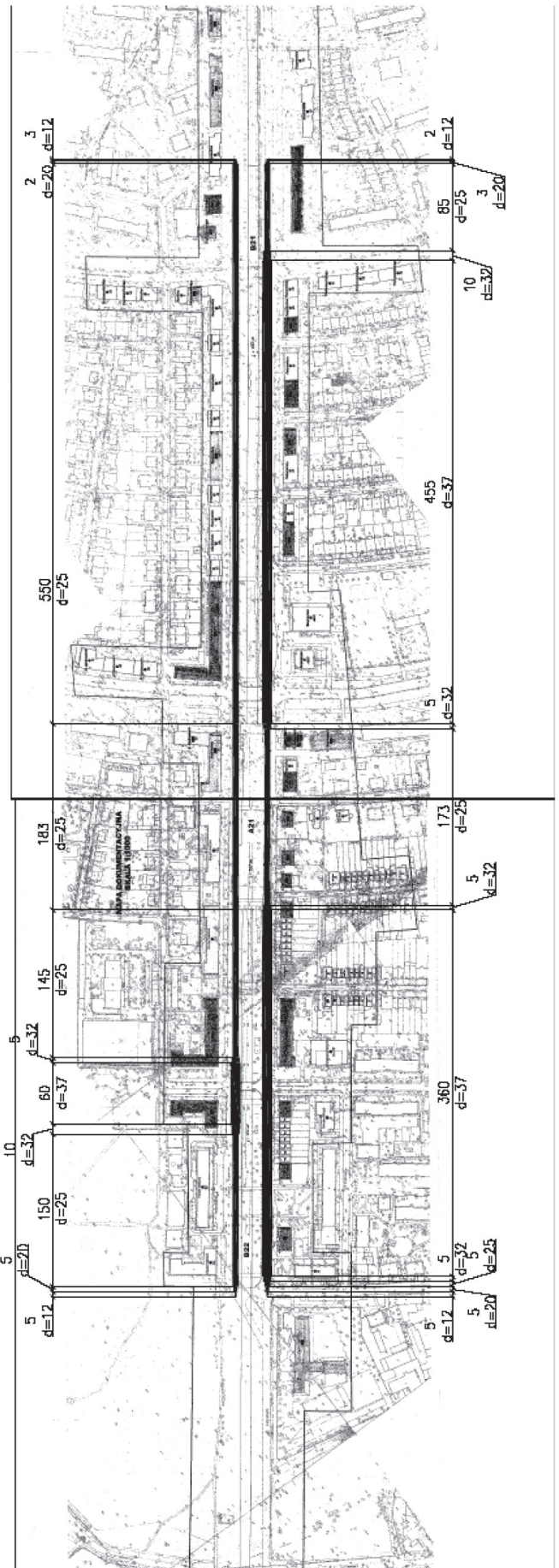


Rys. 20. Prognozowany wpływ drgań pionowych na ludzi przebywających na parterze budynku K57 podczas przejazdu metra (grubość maty 25 mm)

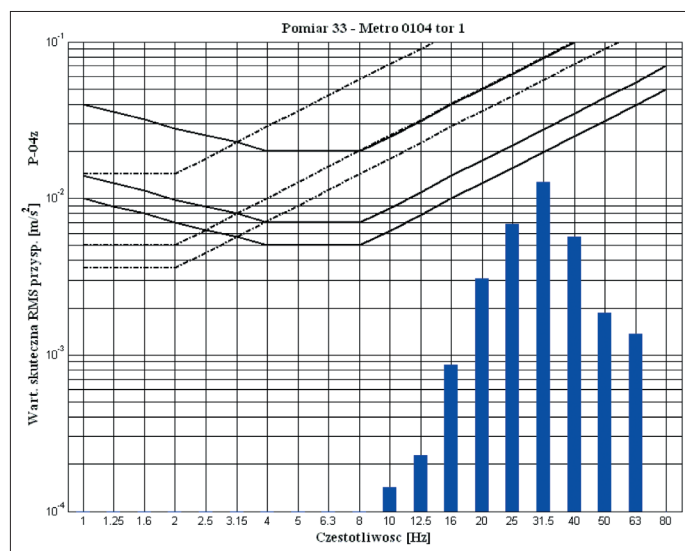
f) przeprowadzono kolejne obliczenia symulacyjne prognozowanego wpływu drgań na ludzi w budynkach dla mat o różnych parametrach, w tym o różnych grubościach, tak aby uzyskać zmniejszenie poziomu drgań stropów w budynku poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi. Efekt ten uzyskano przy zastosowaniu maty o grubości 25 milimetrów. Przykładowy wynik prognozy przedstawiono na rysunku 20.

Tak wykonana prognoza w odniesieniu do poszczególnych budynków pozwoliła na ustalenie, gdzie jest konieczne zastosowanie mat wibroizolacyjnych i jakie grubości tych mat są konieczne w poszczególnych miejscach. W efekcie tych obliczeń rozmieszczono w tunelach metra maty wibroizolacyjne SEDRAPUR o grubościach 25 i 37 milimetrów (zależnie od wyników obliczeń), a w strefach przejściowych także 12, 20 i 32 milimetry (rysunek 21).

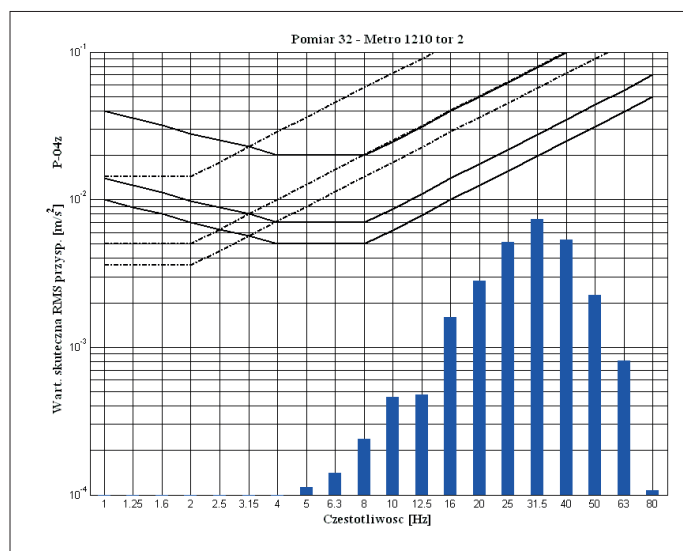
Po uruchomieniu metra we wszystkich 36 budynkach reprezentatywnych wykonano pomiary porealizacyjne. Przykładowe wyniki tych pomiarów w rozważanym wyżej budynku przedstawiono na rysunkach 22 i 23 odpowiednio



Rys. 21. Rozmieszczenie mat wibroizolacyjnych o różnych grubościach w tunelach w białańskim odcinku I linii metra w Warszawie (podano długości poszczególnych odcinków w metrach oraz grubości maty d w milimetrach)



Rys. 22. Wyniki pomiarów porealizacyjnych – wpływ drgań pionowych na ludzi przebywających na parterze budynku K57 podczas przejazdu metra



Rys. 22. Wyniki pomiarów porealizacyjnych – wpływ drgań pionowych na ludzi przebywających na parterze budynku K57 podczas przejazdu pociągu metra po torze dalszym od budynku

podczas przejazdu pociągu metra po torze bliższym oraz dalszym od budynku. Jest to najniekorzystniejszy wynik analizy wpływu na ludzi w tym budynku drgań pionowych stropu wywołanych przejazdami metra. We wszystkich budynkach pomiary porealizacyjne potwierdziły uzyskanie obniżenia poziomu drgań stropów w budynkach poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi.

Podsumowanie

Przykłady wielu historycznych miast, w których funkcjonuje komunikacja podziemna, świadczą o tym, że metro nie stanowi zagrożenia dla zabytków oraz zabytkowego charakteru tych miast.

Metro jest „ekologicznym” środkiem transportu. Jedyne zanieczyszczenie, jakie emituje na zewnątrz, stanowią drgania generowane przejazdami pociągów.

Istnieją uregulowania prawne i warunki techniczne wymagające od wykonawców zabezpieczenia obiektów budowlanych i ludzi w budynkach przed drganiami, a także odpowiednie normy, ustalające kryteria w tym zakresie.

Istnieją środki techniczne, pozwalające zabezpieczyć zabudowę miejską przed drganiami. Prawidłowe zaprojektowanie wibroizolacji pozwala, jak wykazano wyżej, wyeliminować problem nadmiernego wpływu drgań metra na budynki i na ludzi w budynkach nawet w przypadku metra płytkiego, tak jak to ma miejsce w Warszawie.

Dodatkowo okolicznością sprzyjającą ograniczeniu wpływu drgań na zabudowę w śródmieściu Krakowa może być fakt, że projekt wykonania pierwszej linii metra przewiduje, że byłoby ono bardziej zagłębione niż w Warszawie. Można zatem przyjąć, że w przypadku budowy metra w Krakowie problem drgań może zostać z powodzeniem rozwiązany, a krakowskie zabytki ani mieszkańcy Krakowa nie ucierpią z tego powodu.

Literatura

1. Breccolotti M., Materazzi A.L., *Ambient vibration analysis and mitigation in the site of Villa Ruffo in Rome*. Proceedings of the 6th International Conference on Structural Dynamics EURO-DYN 2005, C. Soize & G.I. Schuëller (eds.) © 2005 Millpress, Rotterdam, vol. 3.
2. Rcker W.F., Said S., *Einwirkung von U-Bahnerschütterungen auf Gebäude; Anregung, Ausbreitung und Abschirmung*. Erschütterungsausbreitung und Erschütterungs-reduzierung / Wave Propagation and Reduction of Vibrations, Chou and Schmid (eds.), Berg-Verlag, Bochum 1994.
3. Ciesielski R., Stypuła K., *Zabezpieczenie budynków przed wpływami parasejsmicznymi generowanymi komunikacją podziemną (metro)*, IV Konferencja naukowo-techniczna REW-INŻ'98, Kraków 1998, Materiały t. II.
4. Ciesielski R., Stypuła K., *Dynamiczne oddziaływanie metra w Warszawie na budynki*, „Budownictwo Górnicze i Tunelowe”, 2004 nr 2.
5. Kawecki J., Kozioł K., Stypuła K., *Wpływ konstrukcji obudowy tunelu metra na prognozowany odbiór drgań przez ludzi przebywających w pobliskim budynku./Influence of Metro Tunnel Structure on Prognosed Vibrations received by People Staying in Nearly Building./* Czasopismo Techniczne (2010), issue 11. Budownictwo z. 3-B., Politechnika Krakowska, Kraków 2010.
6. Kawecki J., Kozioł K. and Stypuła K., *The Design of Rail Tracks including the Influence of Vibration on People in Buildings*. Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology, B.H.V. Topping, (Editor), Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland 2012. Paper 176.
7. Kawecki J., Stypuła K., *Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne*, Wydawnictwo PK, Kraków 2013.
8. Stypuła K., *Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływ na budynki*. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria inżynieria lądowa nr 72, Kraków 2001.
9. Stypuła K., *Doświadczenia metra warszawskiego. Problemy dynamiczne w projektowaniu oraz podczas budowy i eksploatacji*, Materiały Konferencji naukowo-technicznej „Problemy podziemnej komunikacji miejskiej w Krakowie”, Kraków 2002.
10. Stypuła K., Kozioł K., Szczepański M., Pęski S., Miros G., *Rozwiązania nawierzchni torowych I linii metra w Warszawie*. „Inżynieria i Budownictwo”, 2009 nr 8.