

Wpływ drgań na budynki i ludzi w budynkach w transporcie szynowym

Filip Pachla

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów; Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Krakowska

e-mail: filip.pachla@pk.edu.pl

Piotr Stecz

Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli; Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Krakowska

e-mail: piotr.stecz@pk.edu.pl

Tadeusz Tatara

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów; Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Krakowska

e-mail: tadeusz.tatara@pk.edu.pl



Wprowadzenie

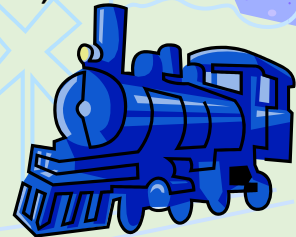
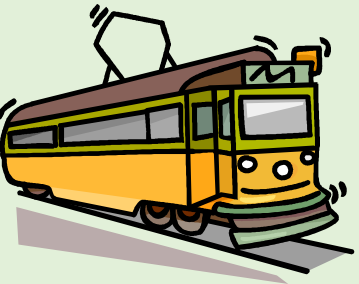
- Rozwój infrastruktury transportowej – bezkolizyjne przemieszczanie zarówno ludzi jak i mas towarowych.
- Budowa dróg o podwyższonych standardach, napowierzchniowych i podziemnych dróg kolejowych, w tym metra.
- Wiele z istniejących rozwiązań jest przestarzałych - nie odpowiadają dzisiejszym standardom – konieczność gruntownych prac remontowych - realia dnia dzisiejszego.
- Budowa tuneli drogowych i kolejowych – w Polsce połowa XIX w.
- Obecnie buduje się i planuje budowę coraz większej liczby tuneli; np. Warszawa, Łódź, Kraków.
- Wpływ emisji drgań na powierzchniową infrastrukturę budowlaną i ludzi przebywających w budynkach. Realizując (planując) nowe rozwiązań np. z wykorzystaniem technologii TBM przy drążeniu tuneli należy przewidzieć wpływ drgań na konstrukcję sąsiednich budynków i konieczność **monitorowania drgań** – również na **etapie eksploatacji tuneli**.
- Uregulowania prawne - Ustawa Prawo Ochrony Środowiska; Rozporządzenie Ministra Infrastruktury

Źródła drgań komunikacyjnych (parasejsmicznych) i ich transmisja na budynki oraz na ludzi i na urządzenia wrażliwe w budynku

Źródła drgań komunikacyjnych są wywołane przejazdami:

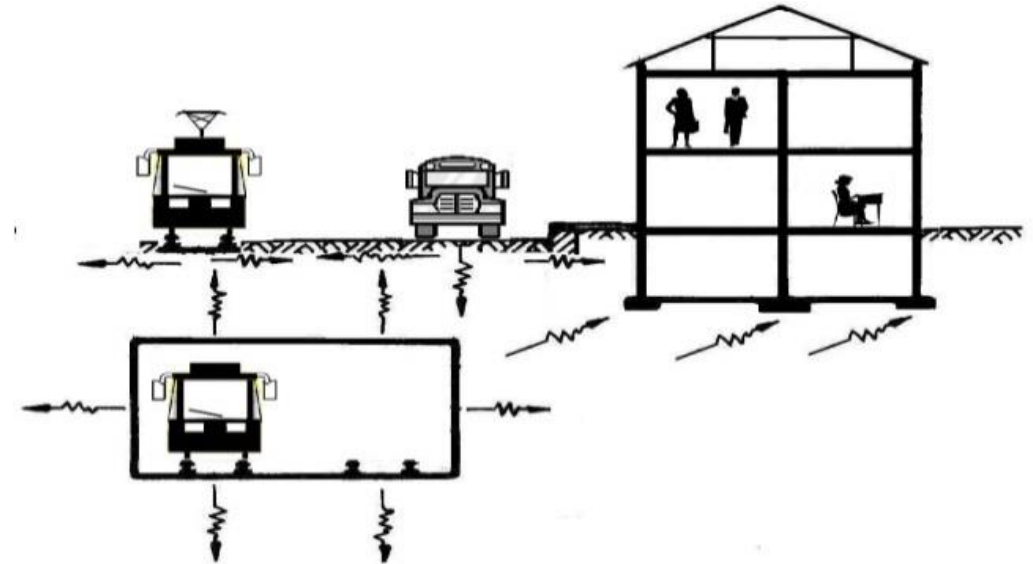
1. powierzchniowymi

- drogi, ulice i autostrady,
- linie tramwajowe,
- linie kolejowe



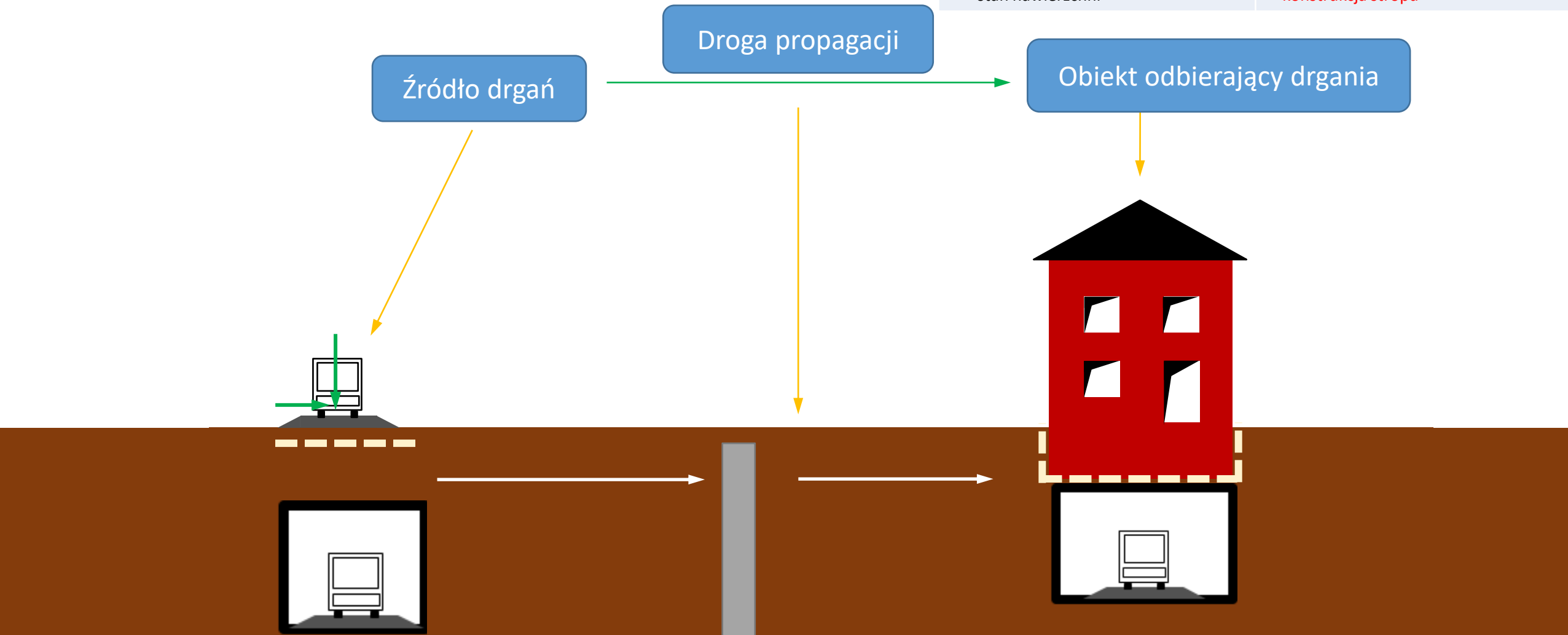
2. podziemnymi

- tunele drogowe,
- tunele metra i tunele kolejowe.

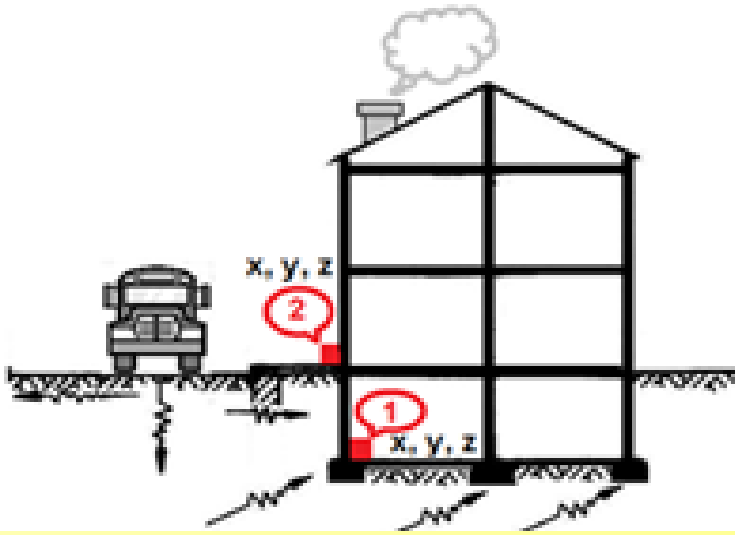


Czynniki istotnie wpływające na wartość parametrów drgań przekazywanych na obiekty budowlane: *drgania komunikacyjne*

w źródle drgań	na drodze propagacji drgań
• typ pojazdu (i jego obciążenie), • prędkość pojazdu, • konstrukcja drogi • stan nawierzchni	• odległość budynku od pasa ruchu, • warunki gruntowo-wodne, • konstrukcja budynku i jego stan, • konstrukcja stropu



Rola badań dynamicznych



Pomiary dynamiczne dostarczają informacji o:

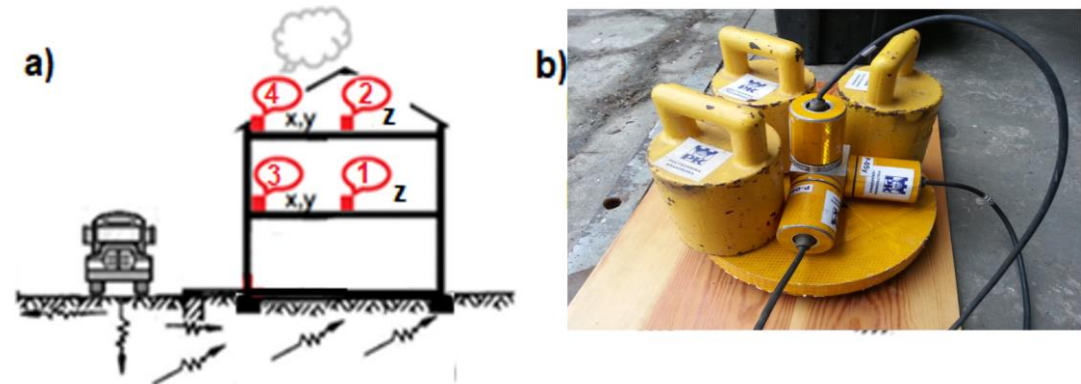
- parametrach drgań charakteryzujących wymuszenie kinematyczne budynku,
- wartościach parametrów drgań przydatnych w diagnozie wpływu drgań na ludzi w budynkach i na urządzenia wrażliwe na drgania.

Pomiary powinny być realizowane przez laboratoria akredytowane !!!

Lokalizacja punktów do pomiaru wymuszenia kinematycznego:
1 – na fundamencie lub **2** – w sztywnym węźle konstrukcji w poziomie terenu
Trzy składowe.



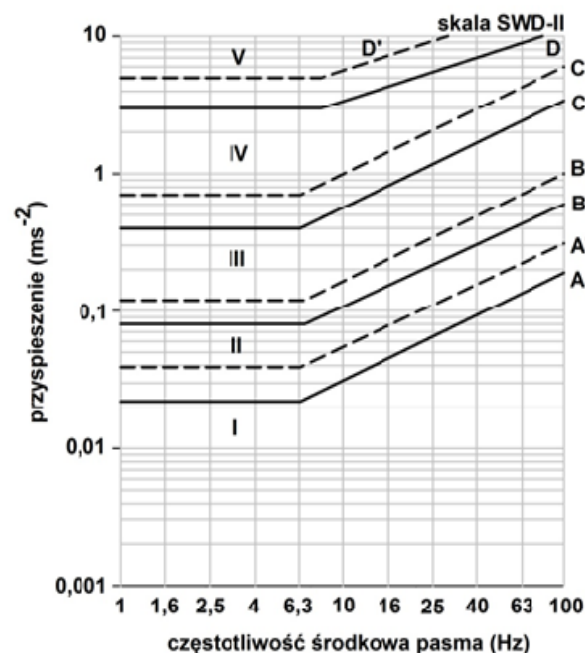
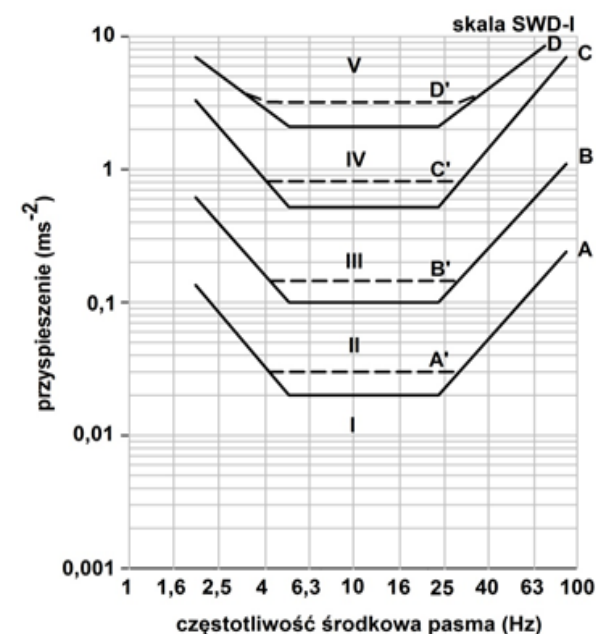
Czujniki w punkcie pomiarowym na ścianie przy fundamencie



a) rozmieszczenie punktów pomiarowych,
b) punkt pomiarowy na stropie – wpływ drgań na ludzi

Przybliżona ocena wpływu drgań na budynki na podstawie skal: SWD-I i SWD-II

PN-B-2170:2016



- *strefa I* - drgania pomijalne
- *strefa II* - drgania nieszkodliwe
- *strefa III* - drgania szkodliwe,
- *strefa IV* - drgania o dużej szkodliwości,
- *strefa V* - drgania powodują awarię budynku,

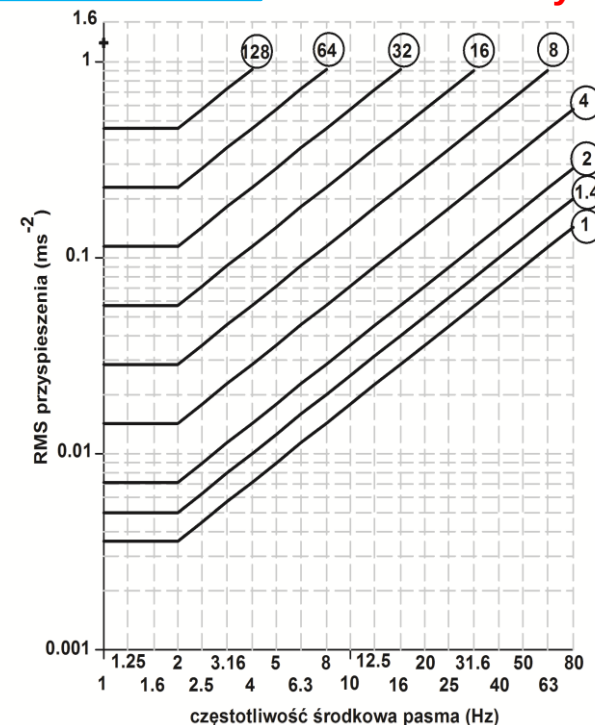
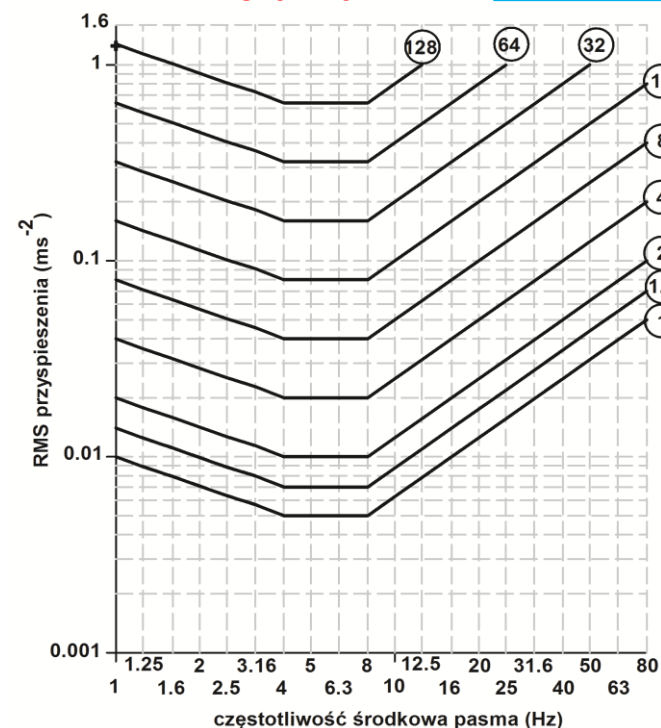
Kryteria oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

Linia progu odczuwalności drgań oraz linie odpowiadające n -krotnie wyższym poziomom wartości skutecznych przyspieszenia drgań przy narażeniu człowieka na drgania

PN-B-02171:2017-06

w kierunku z

w kierunku x i y



Progi odczuwalności drgań przez ludzi wg PN-B-02171:2017-06 w kierunku zgodnym z kierunkiem kręgosłupa (z) oraz prostopadłym do osi kręgosłupa (x, y). Stosownie do warunków odbierania drgań linie przesuwają się w kierunku pionowym mnożąc rzędne przez: 1.4, 2, 4, 8, 32, 64, 128

Przypadki diagnostyczne i projektowe

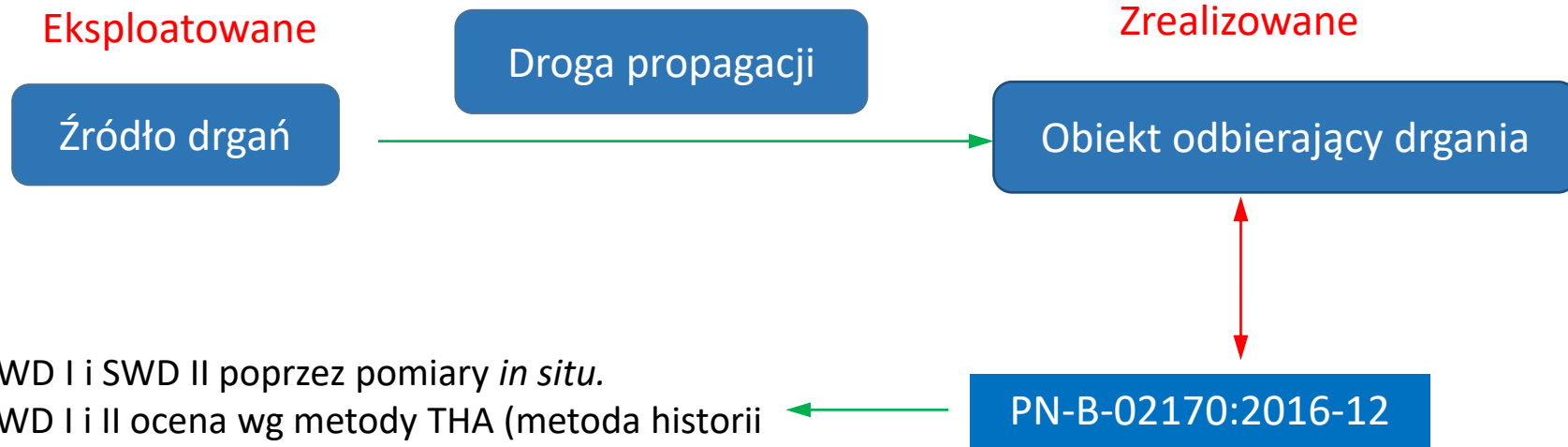
Oznaczenie sytuacji	Stan		Określenie sytuacji
	Źródła drgań	Obiektu odbierającego drgania	
A	Eksploatowane	Zrealizowany	Diagnoza
B	Projektowane	Zrealizowany	Diagnoza z prognozą
C	Eksploatowane	Projektowany	Projektowanie
D	Projektowane	Projektowany	Projektowanie z prognozą
E	Wystąpiło uprzednio (nie jest możliwe działanie ponowne)	Zrealizowany (obecnie w stanie uszkodzenia)	Diagnoza z prognozą (a posteriori)

KAWECKI J., Tataro T., PROCEDURY UWZGLĘDNIENIA WPŁYWU DRGAŃ KOMUNIKACYJNYCH NA EKSPLOATOWANE BUDYNKI, Mat. XVII Konferencji Naukowo-Technicznej: Warsztat Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego, Cedzyna, 2022

Różnice między zadaniem projektowania i diagnozy

Nazwa zadania	Dane	Wyznaczane
Projektowanie	• prognozowane oddziaływania na obiekt • warunki dotyczące nośności i użytkowości	parametry projektowanego obiektu, który ma przenieść prognozowane oddziaływania bez naruszenia zadanych warunków
Diagnoza	• obiekt i jego stan techniczny • oddziaływania na obiekt • kryteria diagnostyczne	odpowiedź na pytanie: czy istnieje związek skutkowo-przyczynowy między stanem technicznym obiektu albo naruszeniem warunków użytkowania a występującymi oddziaływaniami

Przypadek A (Diagnoza)



Wpływ drgań na budynki SWD I i SWD II poprzez pomiary *in situ*.

Dla budynków innych niż SWD I i II ocena wg metody THA (metoda historii obciążenia – punkt 4.3 normy PN-B-02170:2016-12 „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki”).

Wpływ drgań na ludzi w budynku poprzez pomiary *in situ*.

PN-B-02171:2017-06

Z zapisu p. 4.3 normy wynika, że jeśli wymuszenie kinematyczne opisane jest zmianą prędkości albo przyspieszenia w czasie trwania drgań, czyli wibrogramem, to należy je przyłożyć do elementów opisujących fundament budynku i wykonać analizę drgań budynku w czasie (metoda THA)...

$$\underline{\mathbf{M}}_{ii} \ddot{\mathbf{u}}_i^{(r)} + \underline{\mathbf{C}}_{ii} \dot{\mathbf{u}}_i^{(r)} + \underline{\mathbf{K}}_{ii} \mathbf{u}_i^{(r)} = -\mathbf{M}_{ii} \phi_i^{(j)} \underline{\ddot{\alpha}}^{(j)}$$

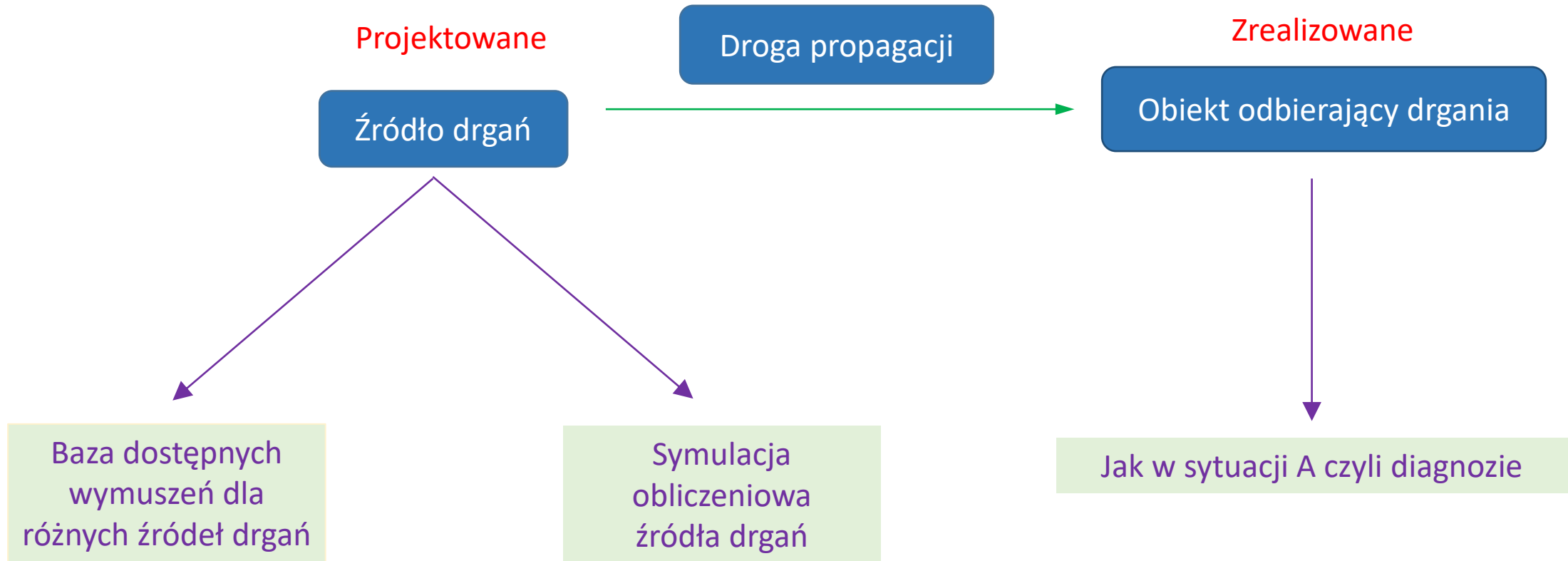
$$\mathbf{C} = a\mathbf{M} + b\mathbf{K}$$

Przypadek A (Diagnoza)

Procedura obliczeniowa (symulacje komputerowe)

1. Wybór programu obliczeniowego Metody Elementów Skończonych (MES) lub innej metody obliczeniowej.
2. Dostęp do dokumentacji projektowej obiektu (architektura i konstrukcja) + weryfikacja w naturze.
3. Przy braku dostępnej dokumentacji konieczna inwentaryzacja architektoniczno-konstrukcyjna.
4. Przy braku możliwości zweryfikowania przyjętych rozwiązań – przyjęcie rozwiązań powszechnie stosowanych z uwagi na rodzaj konstrukcji i okres budowy.
5. Dobór modelu konstytutywnego do opisu materiałów składowych modelu oraz dobór parametrów opisujących te modele.
6. Dobór kryteriów odporności dynamicznej.
7. Kalibracja modelu z wykorzystaniem wyników badań *in situ*.
8. Obliczenia zasadnicze dla zarejestrowanych zjawisk.
9. Sprawdzenie kryteriów odporności dynamicznej.

Przypadek B (Diagnoza z prognozą)



Przypadek B (Diagnoza z prognozą)

Procedura obliczeniowa w odniesieniu do obiektu (symulacje komputerowe) – jak w sytuacji A (diagnoza)



Procedura obliczeniowa w odniesieniu do wpływ drgań na ludzi oraz urządzenia wrażliwe w budynku (symulacje komputerowe)

- Wykorzystujemy model MES budynku służący ocenie wpływu drgań na konstrukcję.
- Dobieramy punkty (zgodnie z normą PN-B-02171:2017-06), dla których określimy symulacyjnie wpływ drgań na ludzi.
- Punkty należy dobrać w taki sposób, aby możliwa była weryfikacja po zrealizowaniu źródła drgań.
- Obliczenia przeprowadzamy w dziedzinie czasu rozwiązując równanie ruchu metodą bezpośredniego całkowania.
- Wyznaczone obliczeniowo przebiegi przyspieszeń drgań w modelu MES poddajemy ocenie zgodnie z wymaganiami normy PN-B-02171:2017-06.
- Po pozytywnej weryfikacji (dostrojeniu modelu obliczeniowego), służy on do dalszych obliczeń, mających na celu dobór odpowiednich rozwiązań wibroizolacyjnych dla projektowanego odcinka np. metra. Parametrem krytycznym powinien być tutaj komfort ludzi w budynku, a nie odczuwalność drgań przez konstrukcję.

Przypadek B (Diagnoza z prognozą)

Procedura obliczeniowa w odniesieniu do wpływ drgań na ludzi oraz urządzenia wrażliwe w budynku (symulacje komputerowe)

Wpływ drgań na ludzi

- Dokonujemy oceny zgodnie z normą PN-B-02171:2017-06

Wpływ drgań na urządzenia wrażliwe

- Kontrolujemy parametry i warunki stawiane przez producenta urządzenia

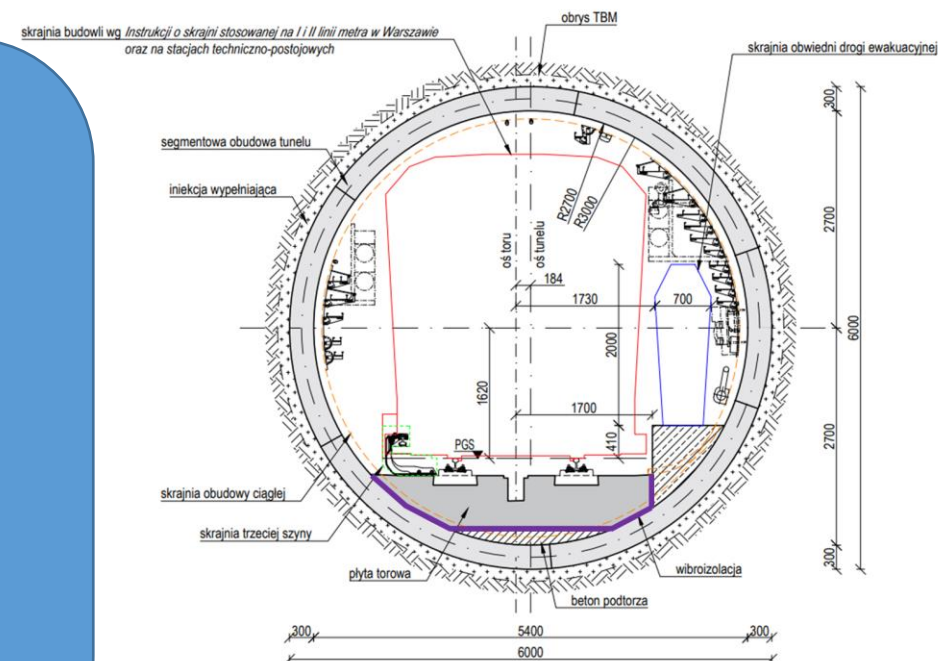
W razie konieczności dobór rozwiązań minimalizujących drgania w:

➤ Źródle

- Wibroizolacja
- Odpowiednie sterowanie ruchem kolejowym
- Stan techniczny pojazdów i infrastruktury

➤ Odbiorniku (budynku)

- Zmiana charakterystyki dynamicznej – np. zmiany konstrukcyjne stropów
- Wprowadzenie wibroizolacji w budynku



Podstawowy dokument regulujący zagadnienia ochrony środowiska - Ustawa Prawo ochrony środowiska; Obwieszczenie Marszałka Sejmu RP z dnia 29 września 2021 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy, Dz. U. 2021, poz. 1973.

- **art. 3 punkt 13** - przez ochronę środowiska rozumie się podjęcie lub zaniechanie działań, umożliwiające zachowanie lub przywracanie równowagi przyrodniczej; ochrona ta polega w szczególności na:
 - a) racjonalnym kształtowaniu środowiska i gospodarowaniu zasobami środowiska zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju,
 - b) przeciwdziałaniu zanieczyszczeniom,
 - c) przywracaniu elementów przyrodniczych do stanu właściwego.
- **art. 3 punkt 11**
 - a) oddziaływanie na środowisko to również oddziaływanie na zdrowie ludzi.
 - b) ilekroć w Ustawie jest mowa o **emisji** - to wprowadzane bezpośrednio lub pośrednio, w wyniku działalności człowieka, do powietrza, wody, gleby lub ziemi:
 - substancje,
 - energie, takie jak ciepło, hałas, **wibracje** lub pola elektromagnetyczne.
 - c) o **zanieczyszczeniu** - rozumie się przez to emisję, która może być szkodliwa dla zdrowia ludzi lub stanu środowiska, może powodować szkodę w dobrach materialnych, może pogarszać walory estetyczne środowiska lub może kolidować z innymi, uzasadnionymi sposobami korzystania ze środowiska;

wibracje (drgania) = energia = emisja zanieczyszczeń do środowiska

Wszystkie zapisy i wymagania w Ustawie **Prawo ochrony środowiska** odnoszące się do emisji zanieczyszczeń dotyczą także emisji drgań (to samo zresztą ma zastosowanie do hałasu). Artykuły **Ustawy**, które wiążą się z ochroną przed drganiami:

Art. 6

1. Kto podejmuje działalność mogącą negatywnie oddziaływać na środowisko, jest obowiązany do zapobiegania temu oddziaływaniu.
2. Kto podejmuje działalność, której negatywne oddziaływanie na środowisko nie jest jeszcze w pełni rozpoznane, jest obowiązany, kierując się przezornością, podjąć wszelkie możliwe środki zapobiegawcze.

Art. 7

1. Kto powoduje zanieczyszczenie środowiska, ponosi koszty usunięcia skutków tego zanieczyszczenia.
2. Kto może spowodować zanieczyszczenie środowiska, ponosi koszty zapobiegania temu zanieczyszczeniu.

Art. 137

Przeciwdziałanie zanieczyszczeniom polega na zapobieganiu lub ograniczaniu wprowadzania do środowiska substancji lub energii.

Art. 139

Przestrzeganie wymagań ochrony środowiska związanych z eksploatacją dróg, linii kolejowych, linii tramwajowych, lotnisk oraz portów zapewniają zarządzający tymi obiektami.

Art. 139 zobowiązuje zarządców dróg, linii kolejowych, linii tramwajowych, lotnisk oraz portów do przestrzegania wymagań ochrony środowiska związanych z eksploatacją tych obiektów. W świetle artykułu 139 oraz art. 7 **Ustawy**, jeżeli wpłynie skarga na nadmierne drgania np. drogowe w danym budynku, to zarządzający drogą ma obowiązek dokonać, na swój koszt, sprawdzenia jaki jest wpływ drgań drogowych na ten budynek i na ludzi w tym budynku. A jeżeli nadmierny wpływ drgań zostanie potwierdzony, powinien na swój koszt naprawić ewentualne uszkodzenia budynku i podjąć działania zmierzające do rozwiązania sytuacji (ochrony budynku przed nadmiernym wpływem drgań).

Wymagania dotyczące konieczności uwzględniania wpływu drgań w projektowaniu budynków zawarte są także w **Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 02 lutego 2022 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2022, poz. 248 z późn. zmianami)**.

§ 325. Odpowiednie usytuowanie budynków

1. Budynki mieszkalne, budynki zamieszkania zbiorowego i budynki użyteczności publicznej należy sytuować w miejscach najmniej narażonych na występowanie hałasu i **drgań**, a jeżeli one występują i ich poziomy będą powodować w pomieszczeniach tych budynków przekroczenie dopuszczalnego poziomu hałasu i drgań, określonych w **Polskich Normach** dotyczących dopuszczalnych wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach oraz oceny wpływu **drgań** na budynki i na ludzi w budynkach, należy stosować skuteczne zabezpieczenia.

W przypadkach, w których bierze się pod uwagę oba wpływy tj. na konstrukcję budynku i na ludzi w tym budynku, jak to ma miejsce podczas monitorowania długotrwałych efektów dynamicznych np. drgań transportowych - **decydować będzie zawsze wpływ na ludzi w budynku** zgodnie z normą PN-B-02171:2017, Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach. System taki zaimplementowano w Metrze Warszawskim i od 2003 roku do dnia dzisiejszego **nie zanotowano ani jednego przekroczenia wpływu drgań na konstrukcję**. Odnotowano przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi w budynkach (*Stecz P., Wpływ działania na budynki długotrwałych obciążeń dynamicznych generowanych przejazdami pociągów metra. Rozprawa doktorska, Kraków 2014*).

Na podstawie obserwacji wielu tysięcy wyników pomiarów można stwierdzić, że jak do tej pory nie wystąpiła sytuacja by wartość wskaźnika WODB była powyżej 1, a wpływ drgań na ludzi nie zostałby przekroczony. Wystąpienie takiego wyniku może wskazywać na wystąpienie anomalii spowodowanych najczęściej złym usytuowaniem czujnika, odparzonym tynkiem lub usytuowaniem czujnika dla oceny komfortu na ludzi bezpośrednio na gruncie itp.

Reasumując **podstawowym parametrem ocen środowiskowych dotyczących drgań transportowych** (inwestycji infrastruktury transportowej) powinna być bezwzględnie **ocena wpływu tych drgań na ludzi** w budynkach wykonana zgodnie z normą PN-B-02171:2017. Pomiary wpływu drgań na konstrukcję budynku nie powinny być wówczas wyłączną podstawą do takiej oceny.