



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Wpływ drgań na budynki i ludzi w budynkach w transporcie szynowym

dr hab. inż. Filip Pachla prof. PK

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów

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

dr inż. Piotr Stecz

Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli

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

prof. dr inż. Tadeusz Tatara

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów

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

Źródła drgań komunikacyjnych

Źródła drgań komunikacyjnych:

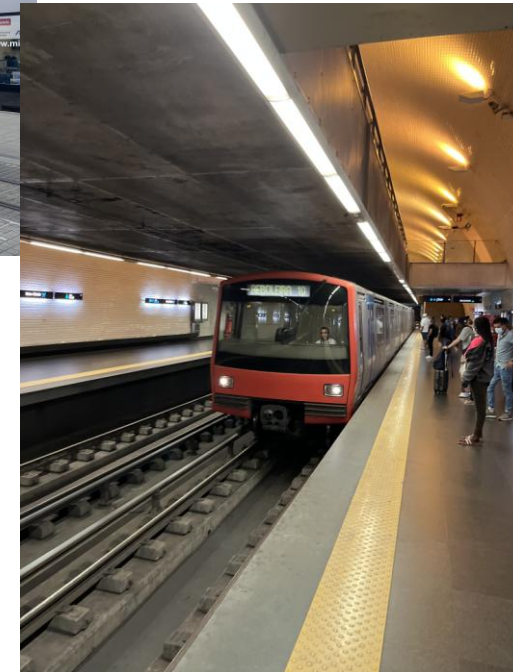
1 Powierzchniowe:

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



2 Podziemnymi:

- tunele drogowe
- tunele metra i tunele kolejowe.

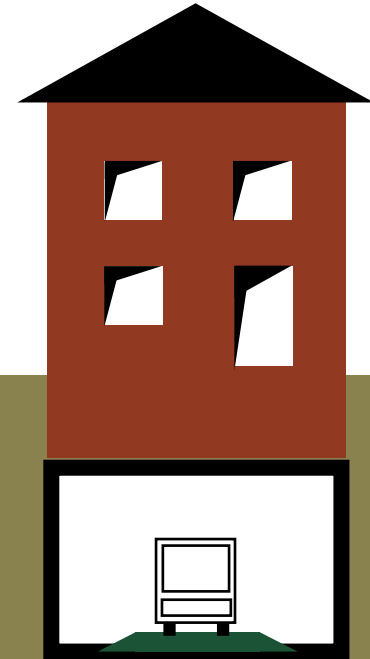
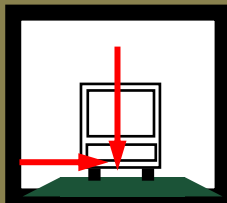
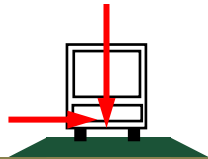


Drgania parasejsmiczne

Źródło
drgań

Droga propagacji

Obiekt
odbierający
drgania

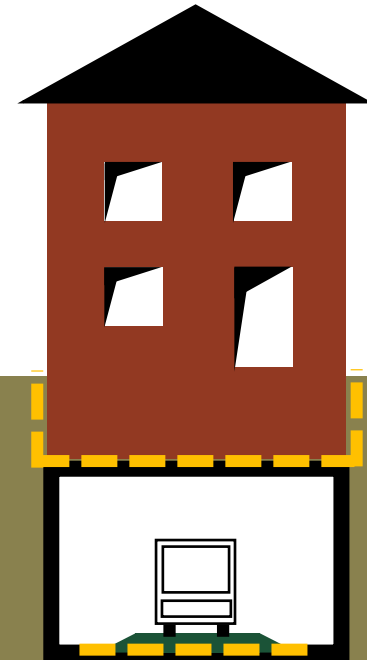
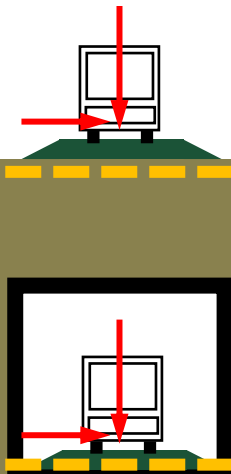


Drgania parasejsmiczne

Źródło
drgań

Droga propagacji

Obiekt
odbierający
drgania



Drgania parasejsmiczne

Źródło
drgań

Droga propagacji

Obiekt
odbierający
drgania

Czynniki istotnie wpływające na wartość parametrów drgań przekazywanych
na obiekty budowlane przy drganiach komunikacyjnych

w źródle
drgań

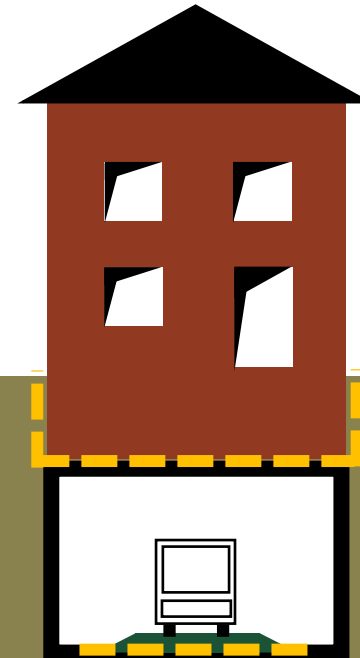
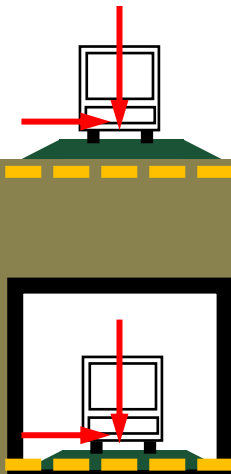
na drodze
propagacji drgań

w obiekcie odbierającym
drgania

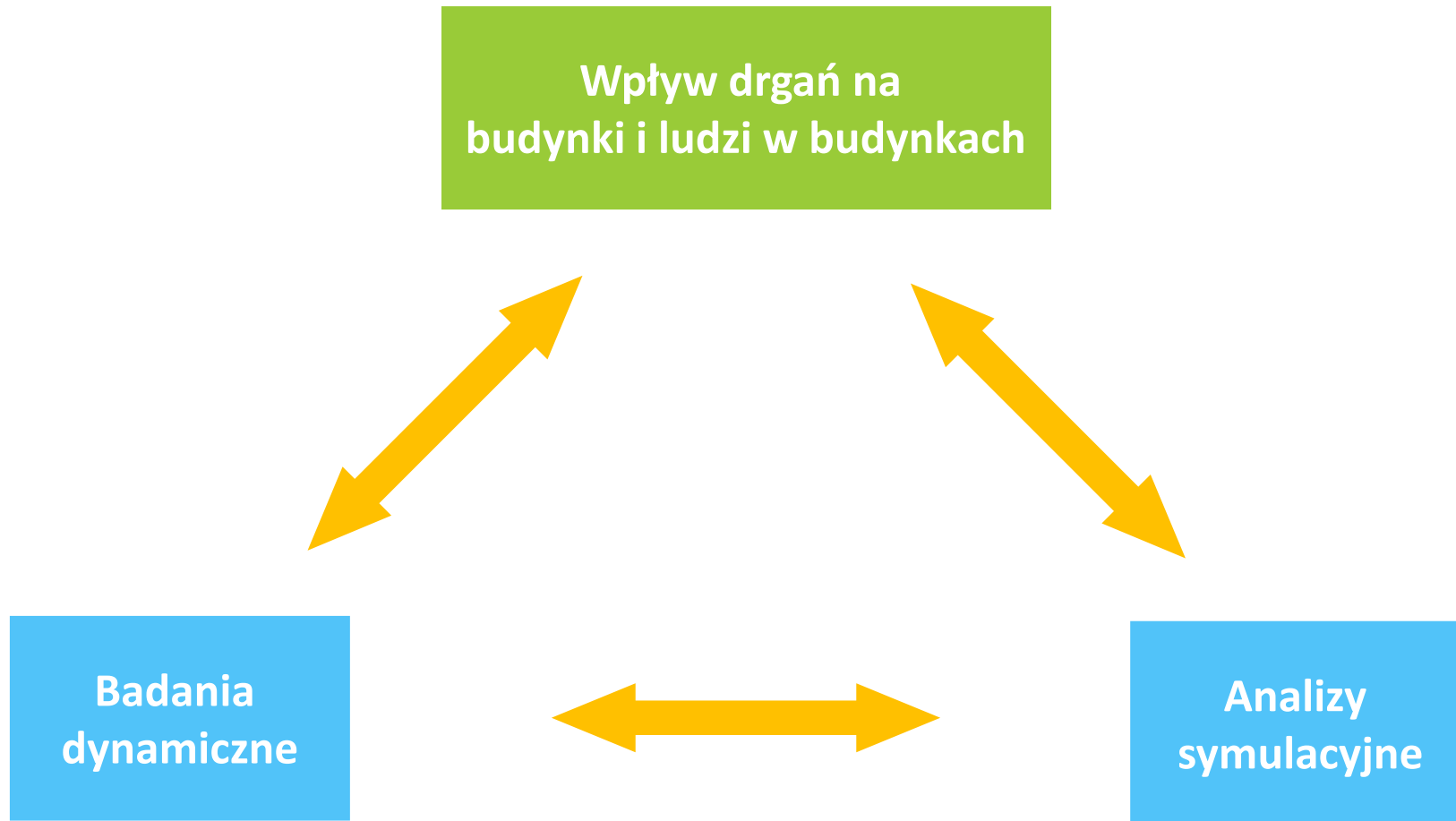
- typ pojazdu i jego obciążenie,
- prędkość pojazdu,
- konstrukcja drogi
- stan nawierzchni

- odległość budynku od pasa ruchu,
- warunki gruntowo-wodne,

- konstrukcja budynku
- stan techniczny budynku,
- konstrukcja stropu



Diagnostyka dynamiczna



Diagnostyka oddziaływań dynamicznych na środowisko obejmuje wpływ drgań



na konstrukcję budynków
w sąsiedztwie źródła drgań
PN-B-02170:2016



na ludzi przebywających
w tych budynkach
PN-B-02171:2017



na wrażliwe
urządzenia
PN-B-02170:2016

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)

Nazwa zadania	Dane	Wyznaczane
Projektowanie	• prognozowane oddziaływania na obiekt • warunki dotyczące nośności i użyteczności	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)

Eksplloatowane

Źródło drgań

Droga propagacji

Zrealizowane

Obiekt odbierający drgania

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-02170:2016-12

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)...

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

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

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.

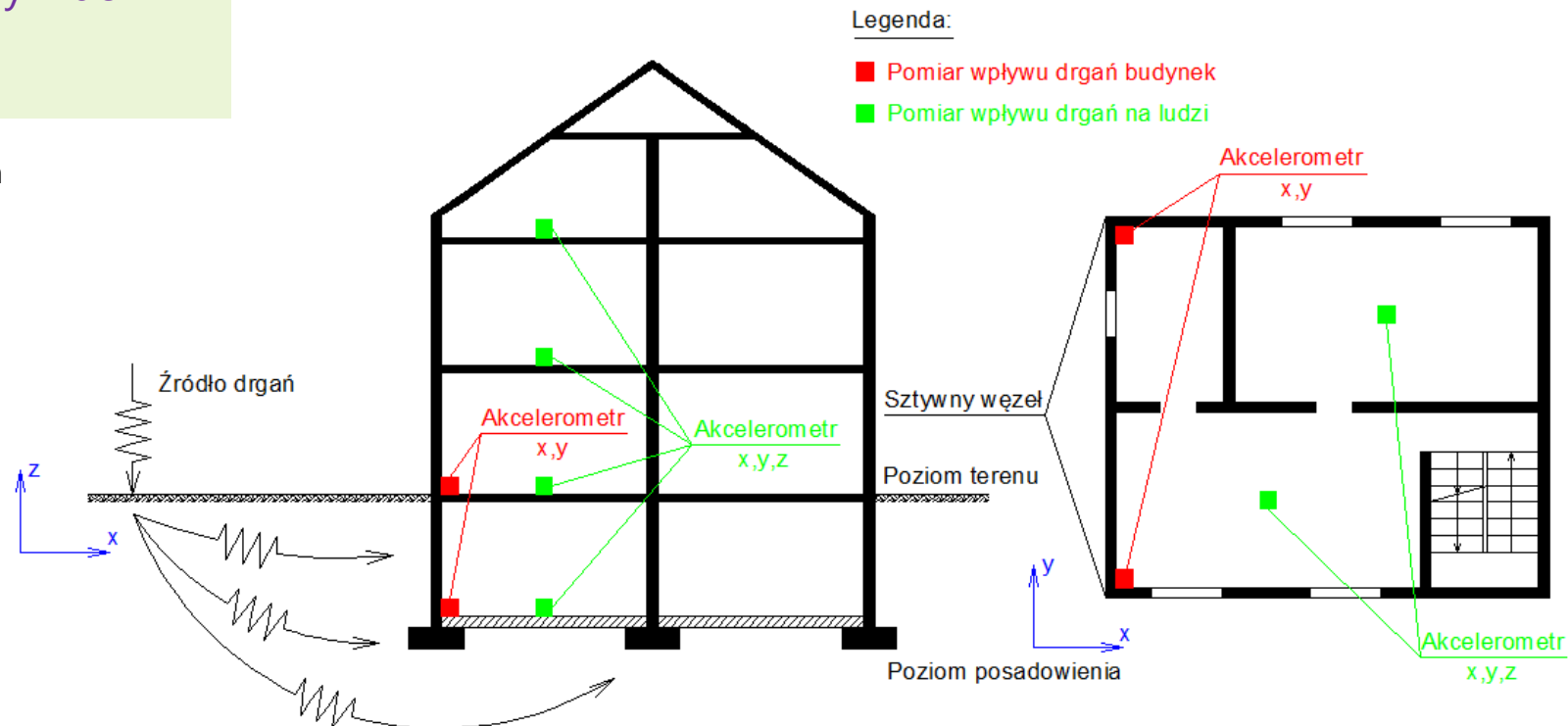
Pomiary powinny być realizowane przez laboratoria akredytowane



Czujniki w punkcie pomiarowym wpływu drgań na budynek



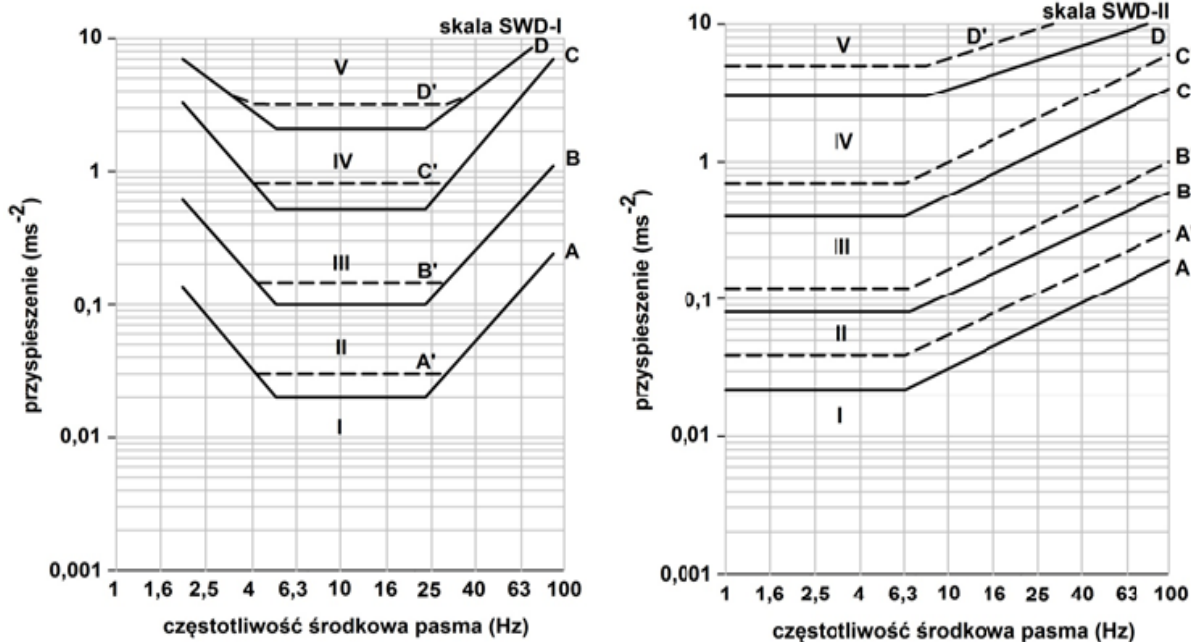
Czujniki w punkcie pomiarowym na stropie



Ocena wpływu drgań na budynki i ludzi w budynkach

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

PN-B-2170:2016

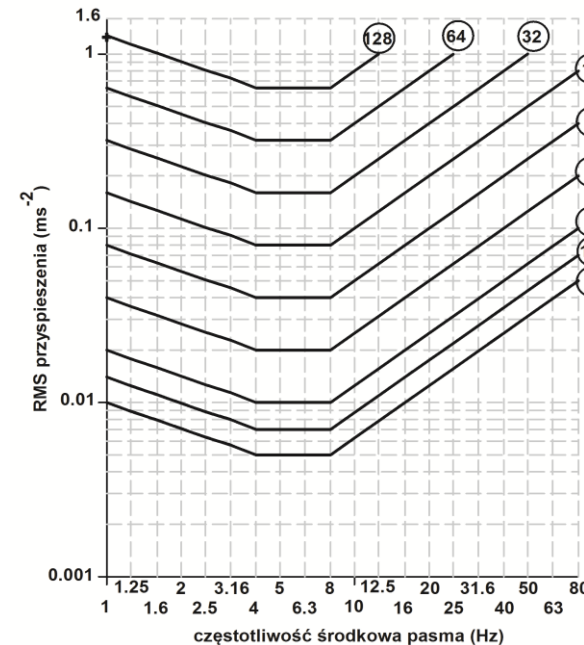


- strefa I - drgania pomijalne
- strefa II - drgania nieszkodliwe
- strefa III - drgania szkodliwe
- strefa IV - drgania o dużej szkodliwości
- strefa V - drgania powodują awarię budynku

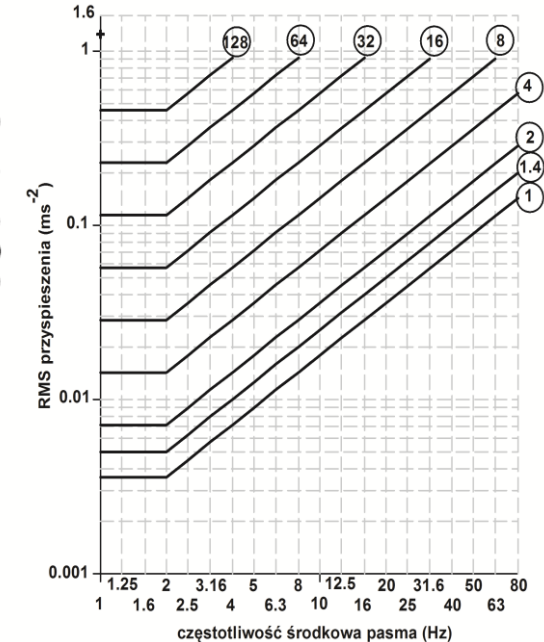
Kryteria oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

PN-B-02171:2017-06

kierunek „z”



kierunek „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

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 A (Diagnoza)

Procedura obliczeniowa (symulacje komputerowe)

1. Wybór programu obliczeniowego Metody Elementów Skończonych (MES) lub innej metody obliczeniowej.



Obróbka zarejestrowanych sygnałów i przygotowanie danych wejściowych do programu Diana FEA.



Przygotowywanie i analiza modeli MES obiektów budowlanych wraz z obróbką wyników.

2. Dostęp do dokumentacji projektowej obiektu (architektura i konstrukcja) + weryfikacja (wizja lokalna).
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.

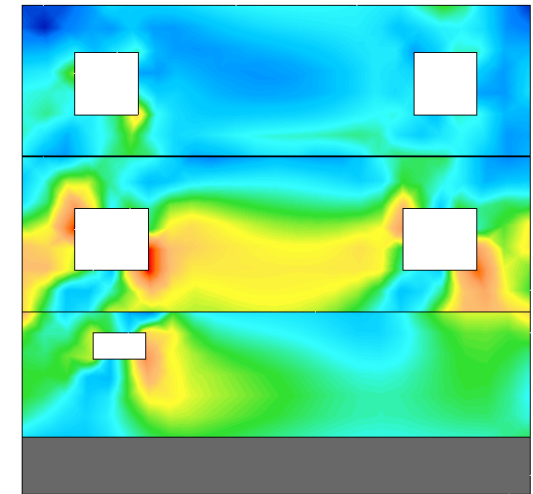
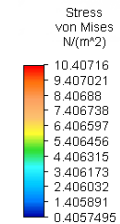
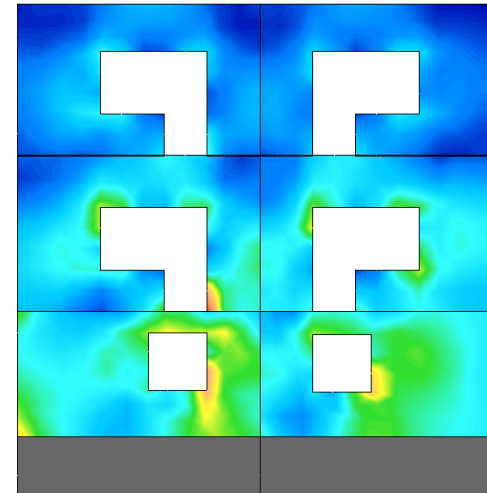
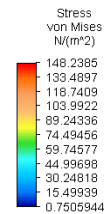
Inwentaryzacja lub dokumentacja projektowa

- Dokumentacja architektoniczna.
- Dokumentacja konstrukcyjna.
- Dokumentacja geotechniczna w miejscu posadowienia obiektu.

Przypadek A (Diagnoza)

5. Modele konstytutywne – opis materiałów

- Metoda uproszczona liniowo-sprężysta
- Analiza nieliniowa konstrukcji
 - Nieliniowość materiałowa
 - Nieliniowość geometryczna

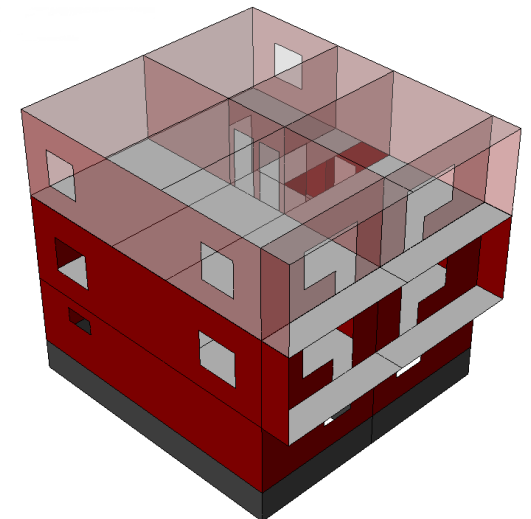
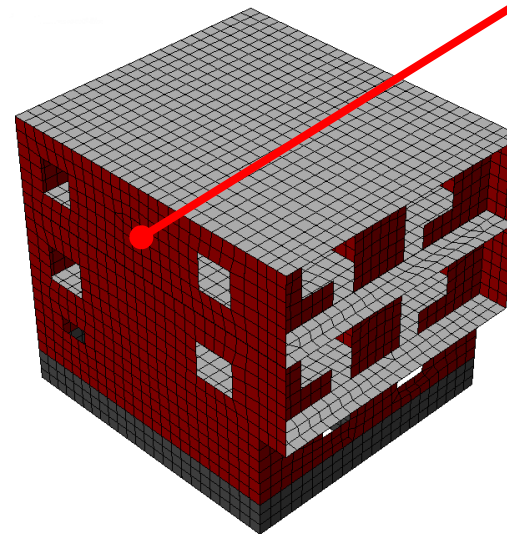
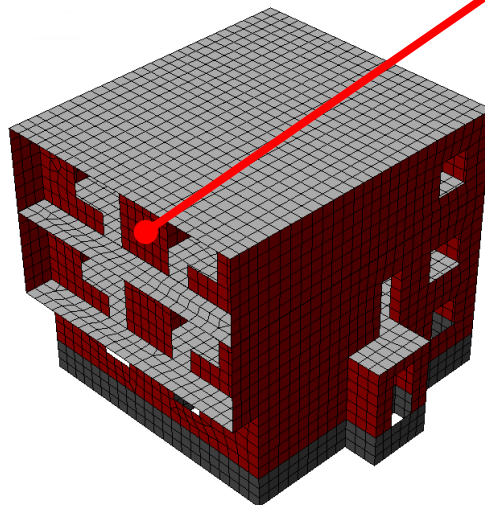


6. Kryteria odporności dynamicznej

- Naprężeniowe
- Warunki SGN

Legenda:

-  Mur ceglany
-  Stropy żelbetowe
-  Ściany fundamentowe



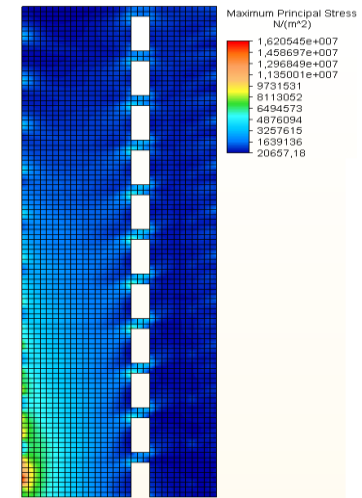
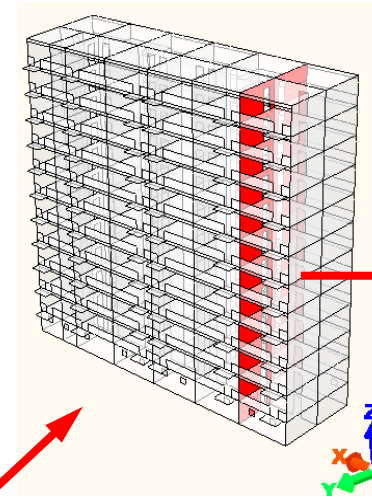
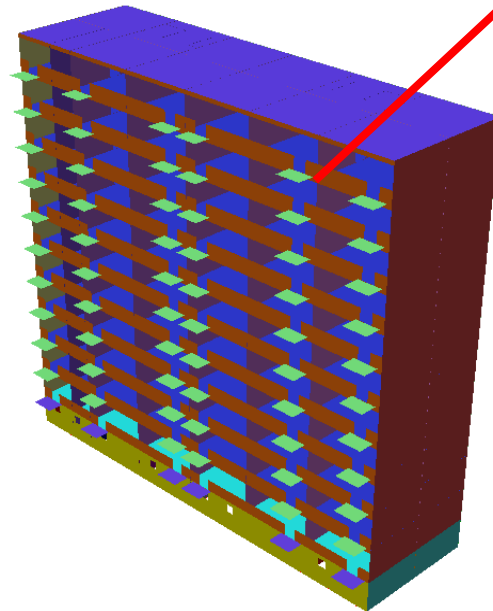
Przypadek A (Diagnoza)

Modele konstytutywne – opis materiałów

- Metoda uproszczona liniowo-sprężysta
- Analiza nieliniowa konstrukcji.
 - Nieliniowość materiałowa
 - Nieliniowość geometryczna

Kryteria odporności dynamicznej

- Naprężeniowe
- Warunki SGN

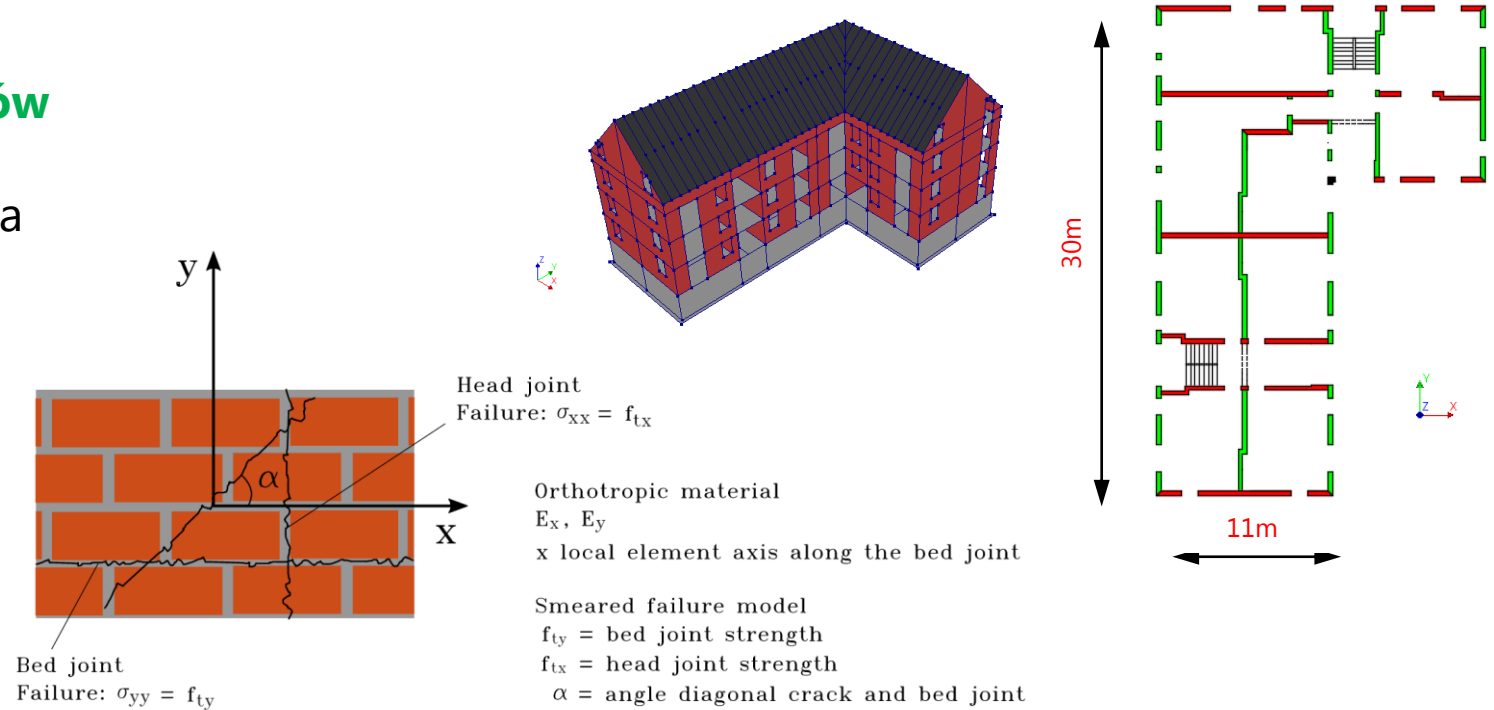


- *Kryterium nośności ściany usztywniającej*
- *Kryterium nośności złącza pionowego*
- *Kryterium nośności złącza poziomego*
- *Kryterium nośności nadproża z uwagi na siłę ścinającą*
- *Kryterium powstania naprężeń rozciągających w złączu poziomym i ścianie konstrukcyjnej*

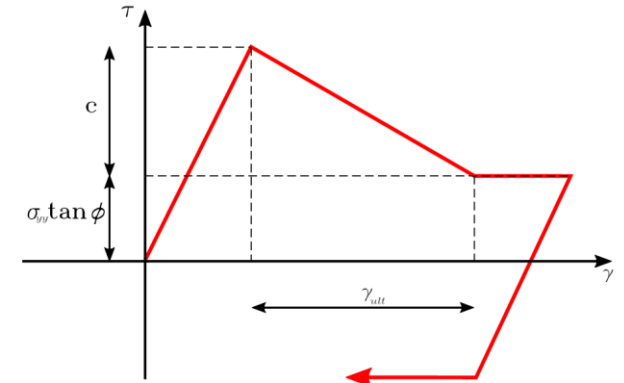
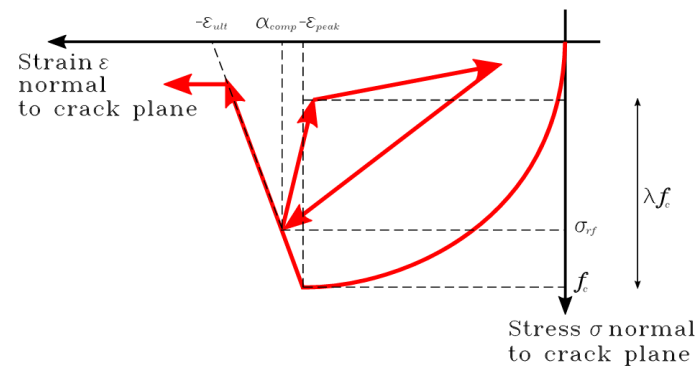
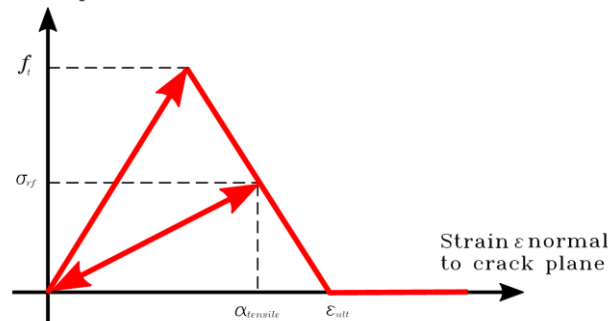
Przypadek A (Diagnoza)

Modele konstytutywne – opis materiałów

- Metoda uproszczona liniowo-sprężysta
- Analiza nieliniowa konstrukcji
 - Nieliniowość materiałowa
 - Nieliniowość geometryczna

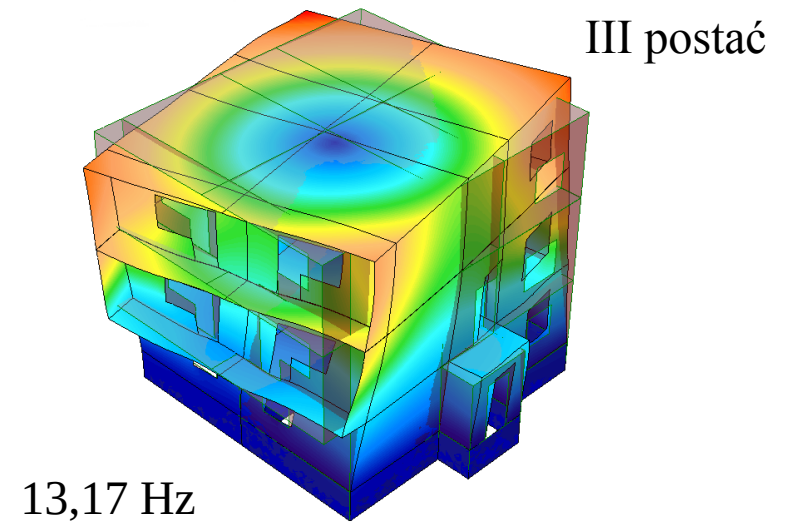
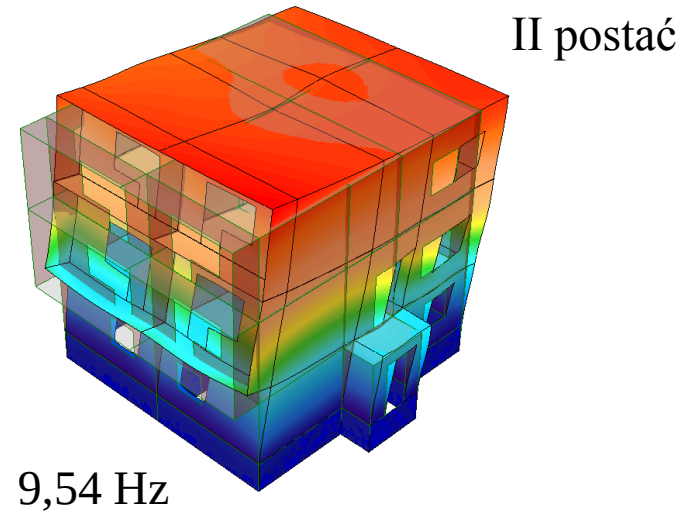
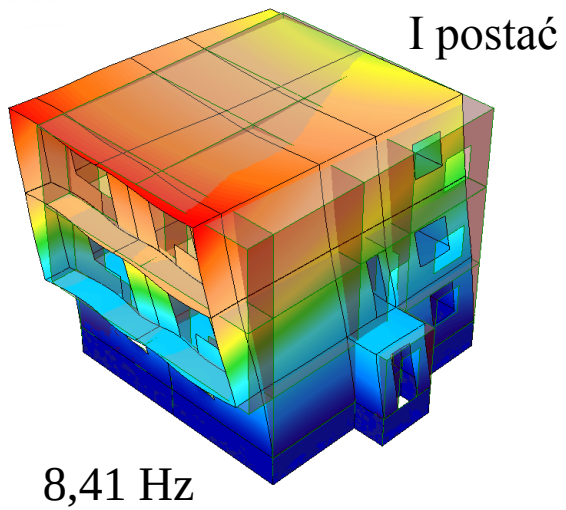


Stress σ normal
to crack plane



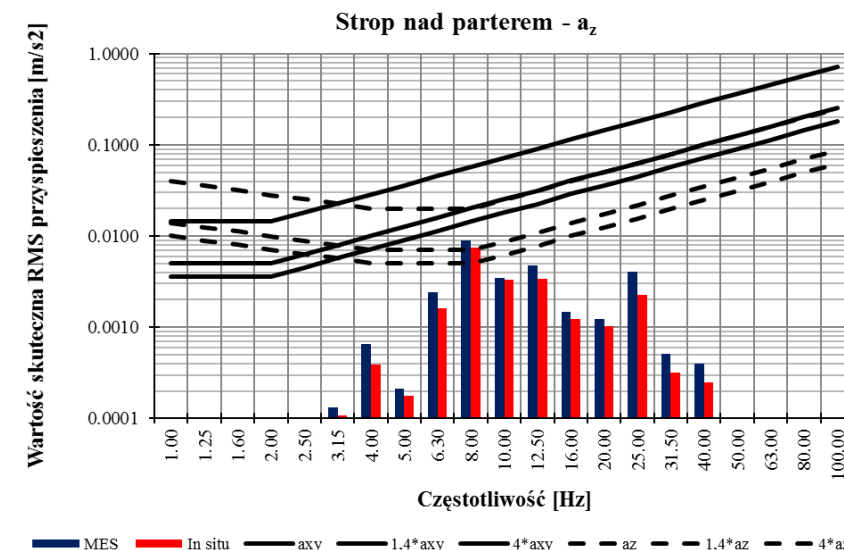
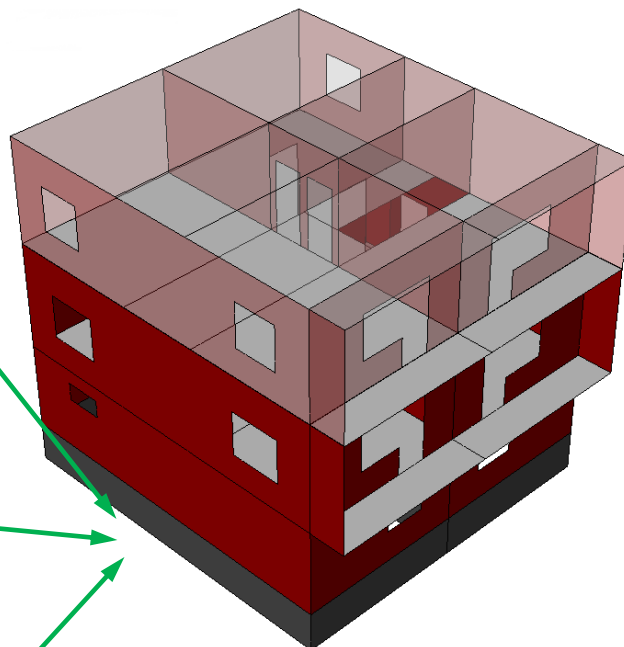
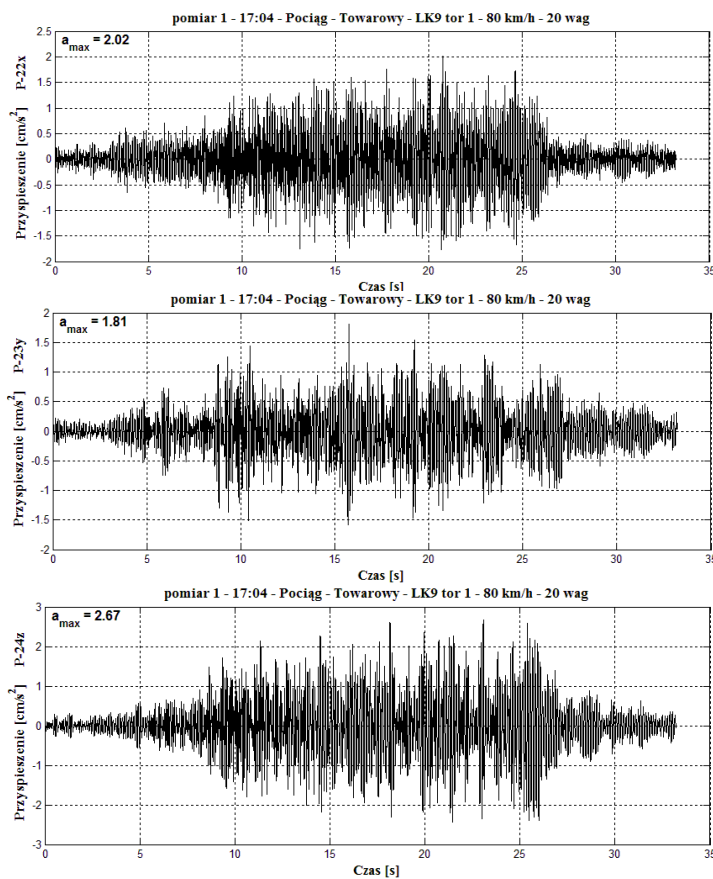
7. Kalibracja modelu obliczeniowego

- W zakresie częstotliwości i postaci drgań własnych
- W zakresie analizy RMS



Przypadek A (Diagnoza)

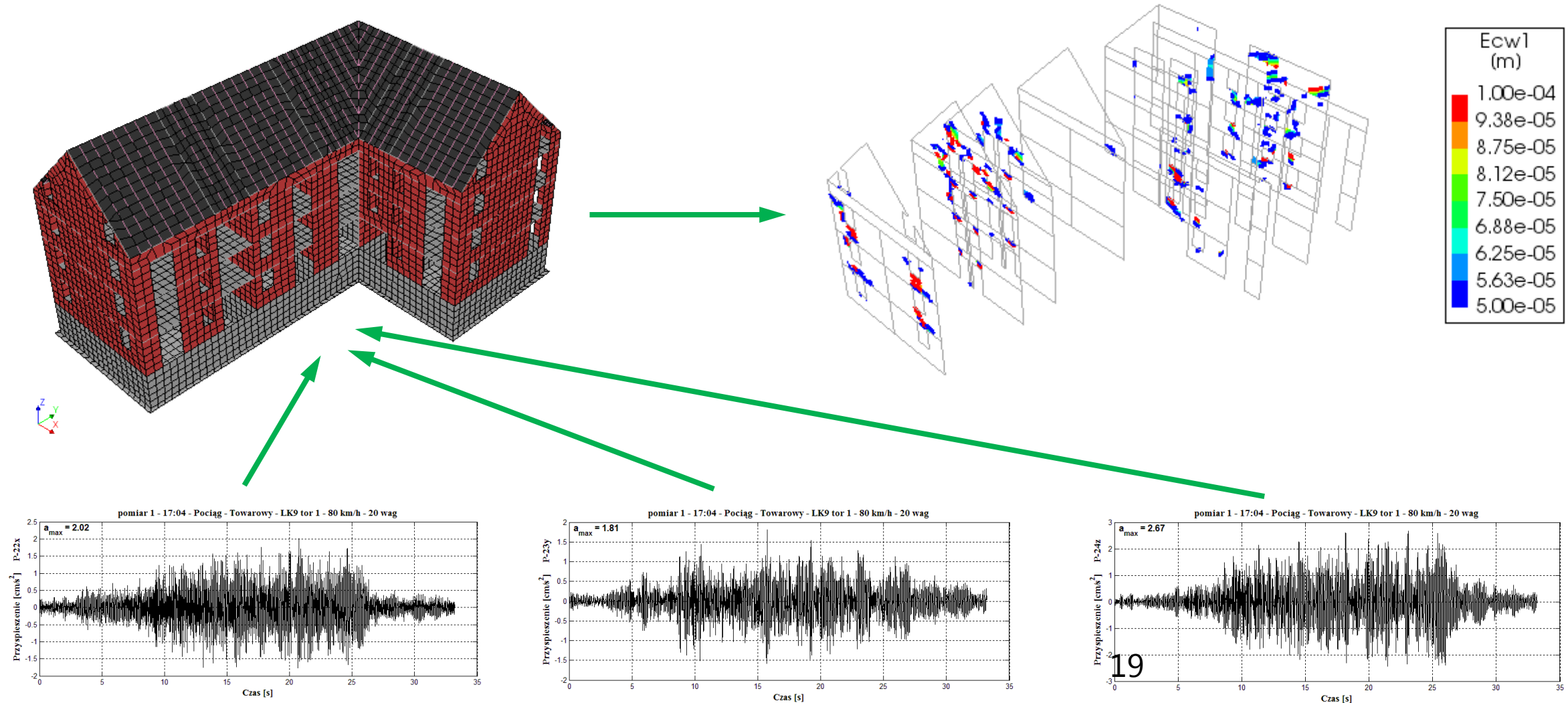
- W zakresie częstotliwości i postaci drgań własnych
- W zakresie analizy RMS



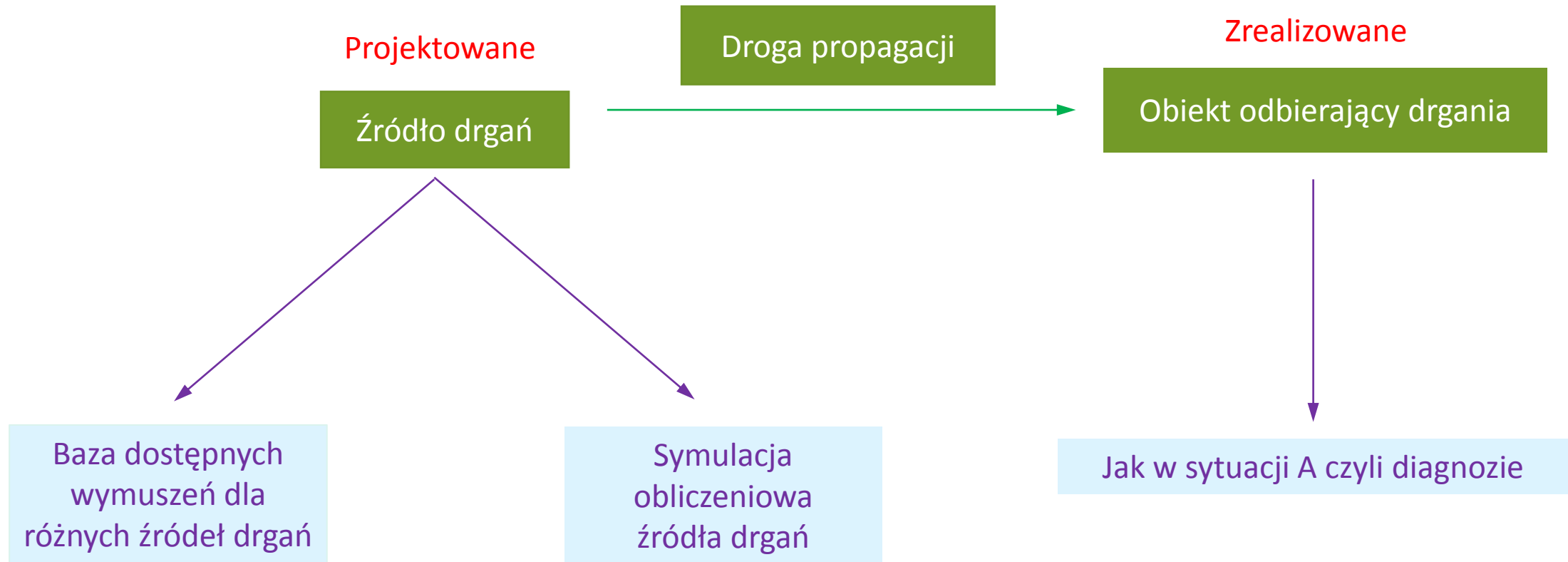
Podstawowym zagadnieniem jest ochrona budynków w sąsiedztwie powstającej infrastruktury komunikacyjnej w trakcie jej eksploatacji czyli po uruchomieniu projektowanej linii kolejowej (np. metra, tramwaju). Na tym etapie przeprowadza się pomiary drgań wytypowanych reprezentatywnych budynków w celu uzyskania informacji o poziomie istniejącego tła dynamicznego, a przede wszystkim zebrane dane pomiarowe służą **do poprawnej weryfikacji modeli obliczeniowych MES badanych budynków.**

Przypadek A (Diagnoza)

8 i 9. Obliczenia zasadnicze dla zarejestrowanych zjawisk. Sprawdzenie kryteriów odporności dynamicznej.

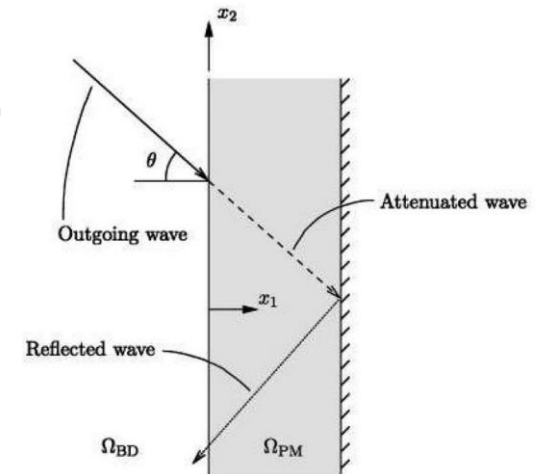
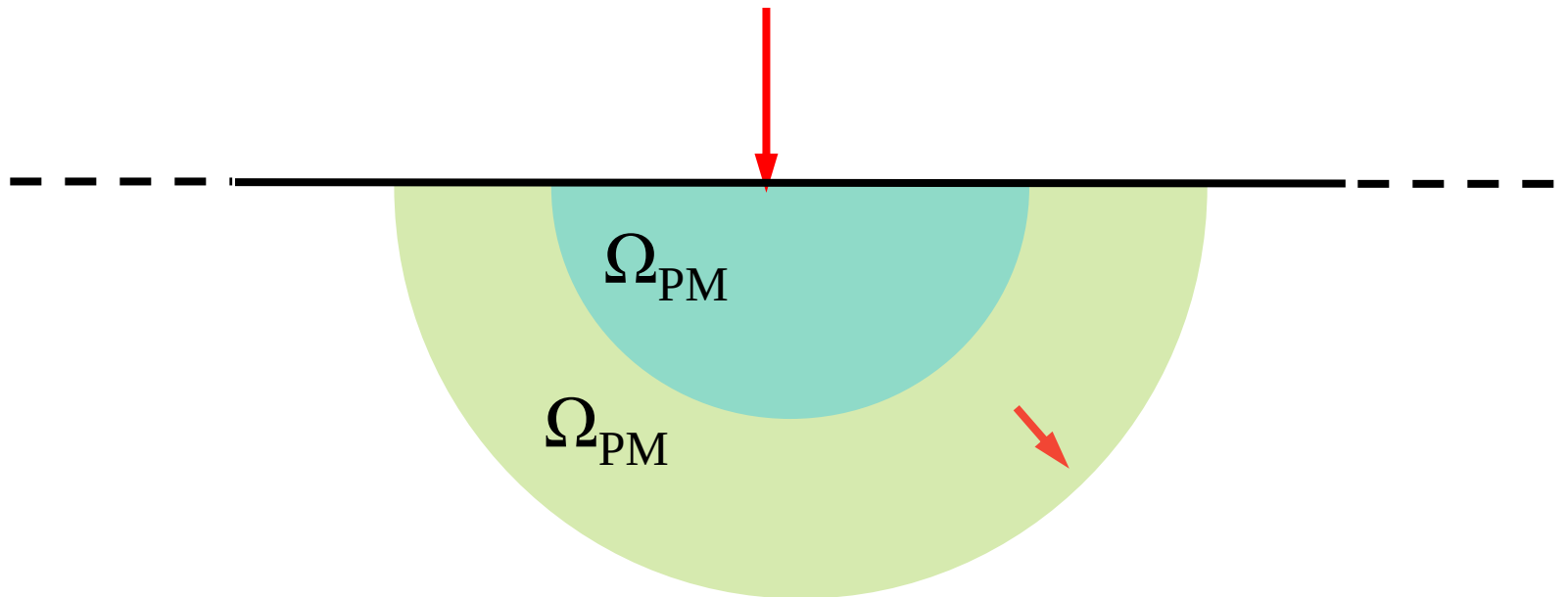
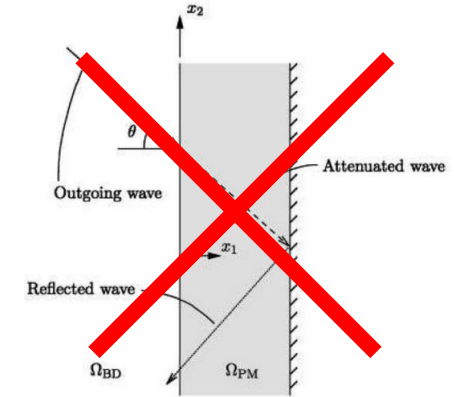
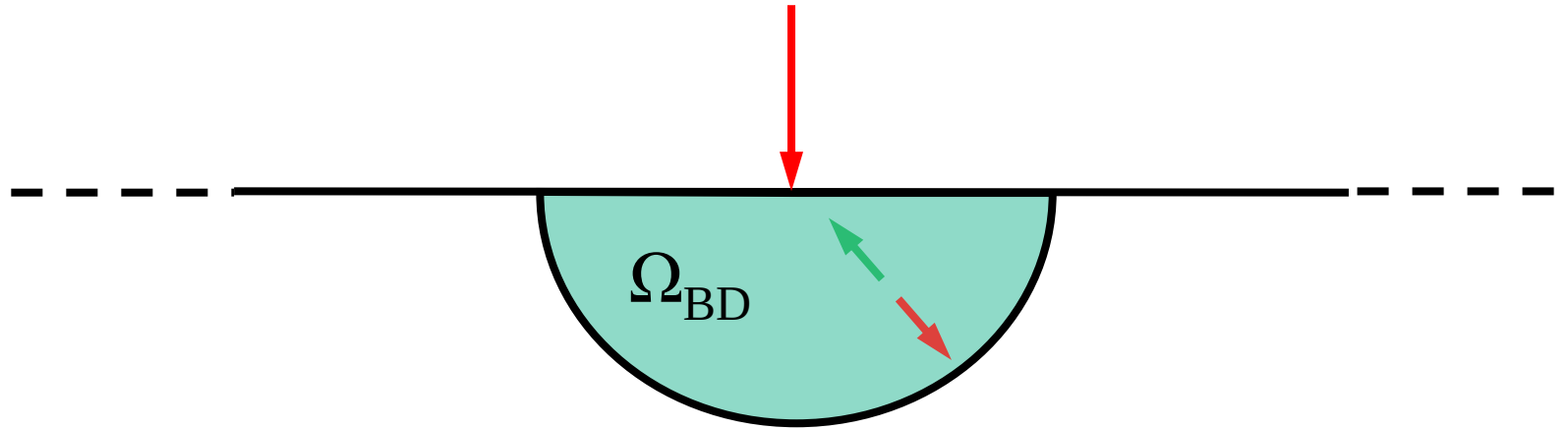


Przypadek B (Diagnoza z prognozą)



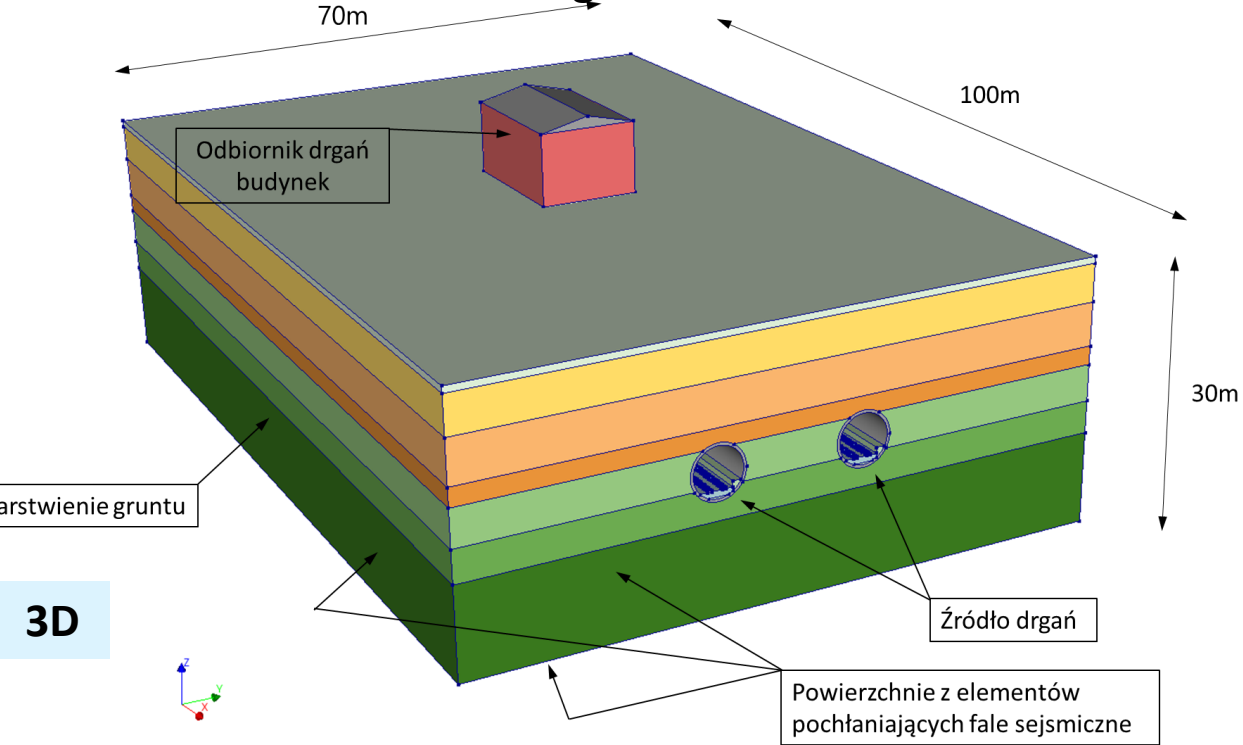
Przypadek B (Diagnoza z prognozą)

Dobór modelu obliczeniowego



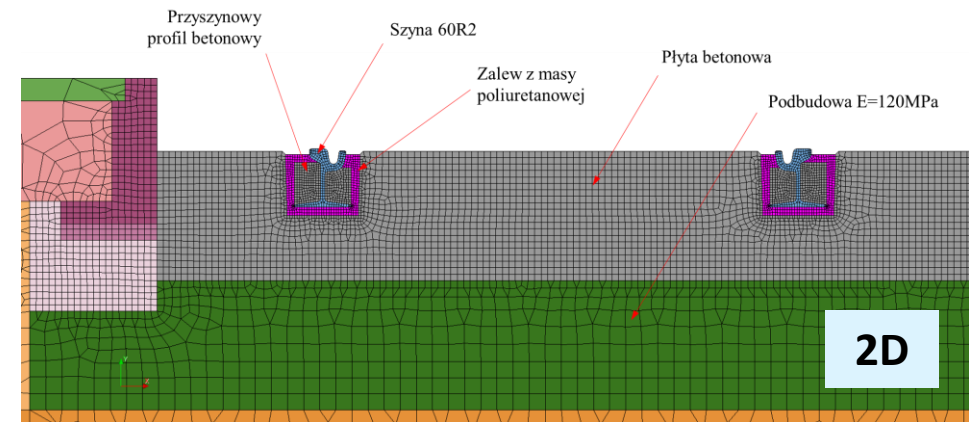
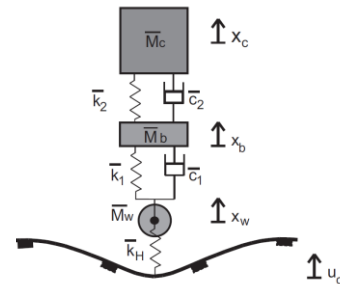
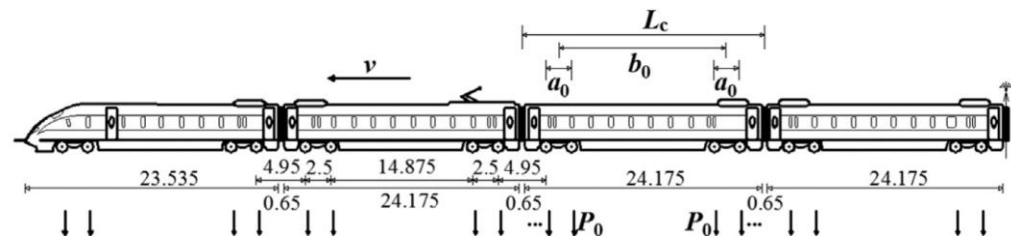
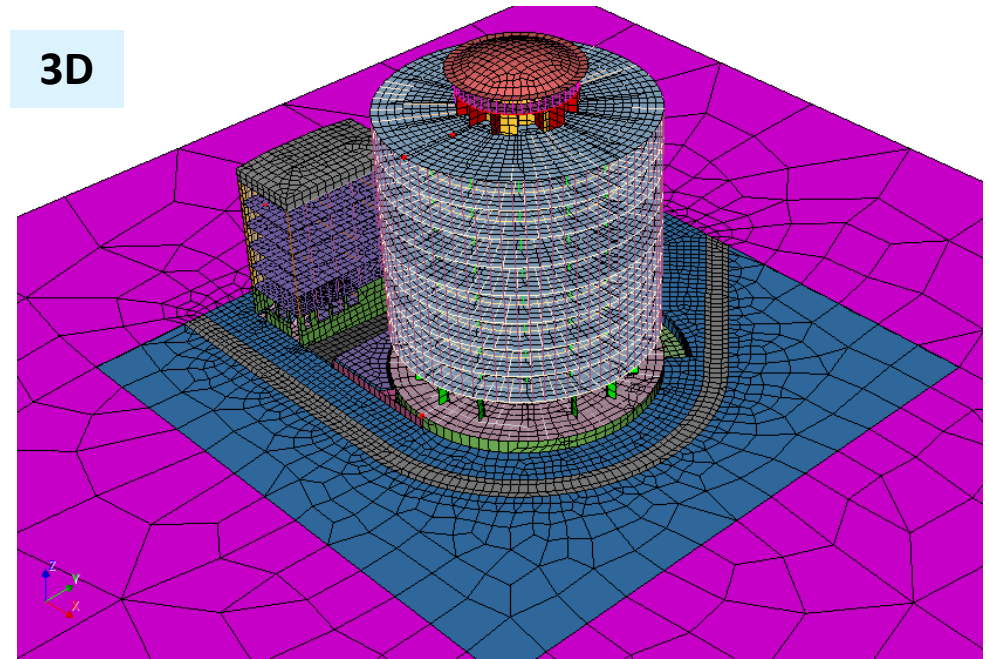
Przypadek B (Diagnoza z prognozą)

Dobór modelu obliczeniowego



3D

3D



2D

Przypadek A i B (Rozwiązanie wibroizolacyjne)

Wpływ drgań na ludzi

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

Wpływ drgań na budynki i urządzenia wrażliwe

- Sprawdzamy kryteria odporności dynamicznej
- Kontrolujemy parametry i warunki stawiane przez producenta urządzenia

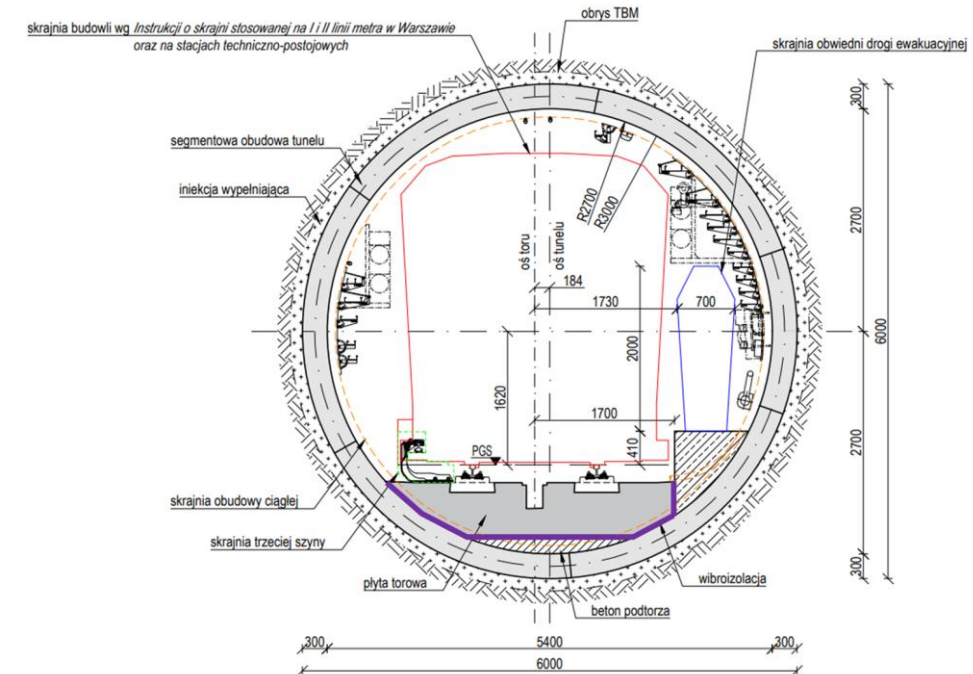
W razie konieczności dobór rozwiązań minimalizujących drgania w:

➤ Źródle

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

➤ Odbiorniku (budynku)

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



Wymagania środowiskowe – aspekty prawne

Sytuacja prawna w odniesieniu do drgań

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) = emisja zanieczyszczeń do środowiska

Wymagania środowiskowe – aspekty prawne

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.

Wymagania środowiskowe – aspekty prawne

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 poziom 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.

§ 326. Izolacja akustyczna

1. Poziom hałasu oraz **drgań** przenikających do pomieszczeń w budynkach mieszkalnych, budynkach zamieszkania zbiorowego i budynkach użyteczności publicznej, z wyłączeniem budynków, dla których jest konieczne spełnienie szczególnych wymagań ochrony przed hałasem, nie może przekraczać wartości dopuszczalnych, określonych w Polskich Normach dotyczących ochrony przed hałasem pomieszczeń w budynkach oraz oceny wpływu **drgań** na ludzi w budynkach, wyznaczonych zgodnie z Polskimi Normami dotyczącymi metody pomiaru poziomu dźwięku A w pomieszczeniach oraz oceny wpływu **drgań** na ludzi w budynkach.

Z powyższych zapisów wynika, że istnieje prawny obowiązek ograniczenia emisji drgań do środowiska, rozumianej jako zanieczyszczenie.



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Dziękuję za uwagę

dr hab. inż. Filip Pachla prof. PK

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów

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