



**Politechnika Krakowska**  
im. Tadeusza Kościuszki

# Prognoza wpływu drgań na budynki i ludzi w budynkach

dr hab. inż. Filip Pachla, prof. PK

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów  
e-mail: [filip.pachla@pk.edu.pl](mailto:filip.pachla@pk.edu.pl)

Dr hab. inż. Alicja Kowalska-Koczwara

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów  
e-mail: [alicja.kowalska@pk.edu.pl](mailto:alicja.kowalska@pk.edu.pl)

# Źródła drgań komunikacyjnych

## Źródła drgań komunikacyjnych:

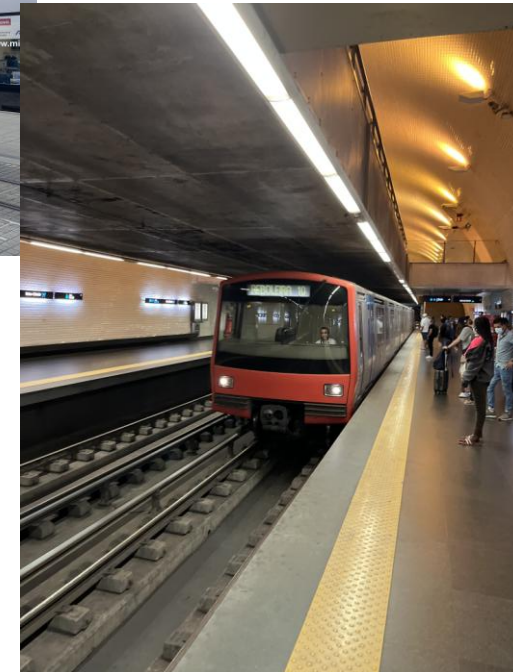
### 1 Powierzchniowe:

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



### 2 Podziemnymi:

- tunele drogowe
- tunele metra i **tunele kolejowe.**



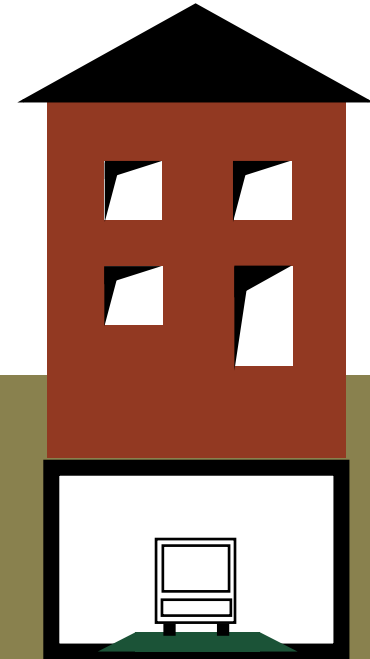
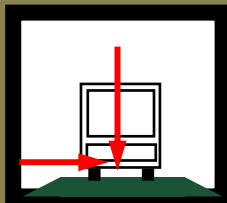
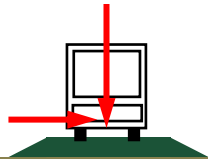
# Drgania parasejsmiczne

---

Źródło  
drgań

Droga propagacji

Obiekt  
odbierający  
drgania



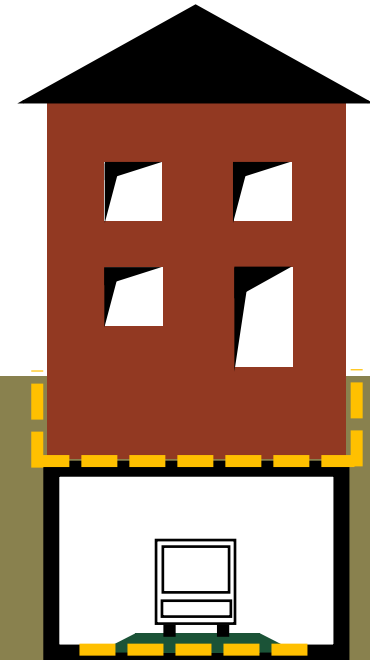
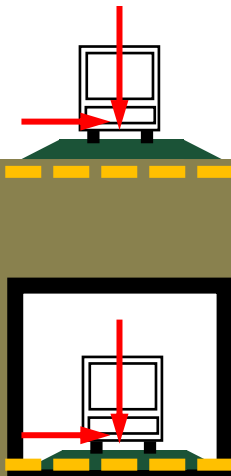
# Drgania parasejsmiczne

---

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

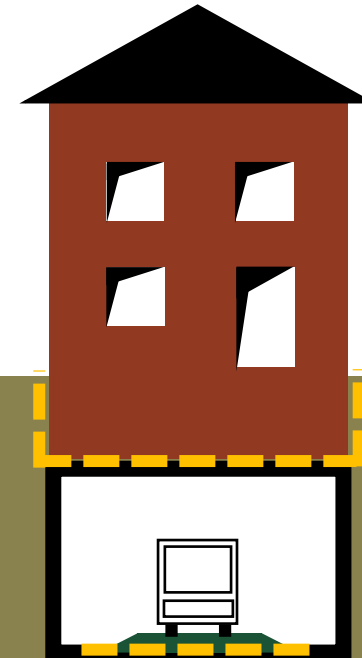
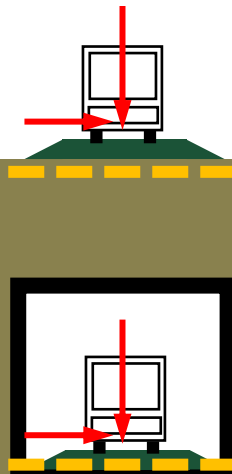
na drodze  
propagacji drgań

w obiekcie odbierającym  
drgania

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

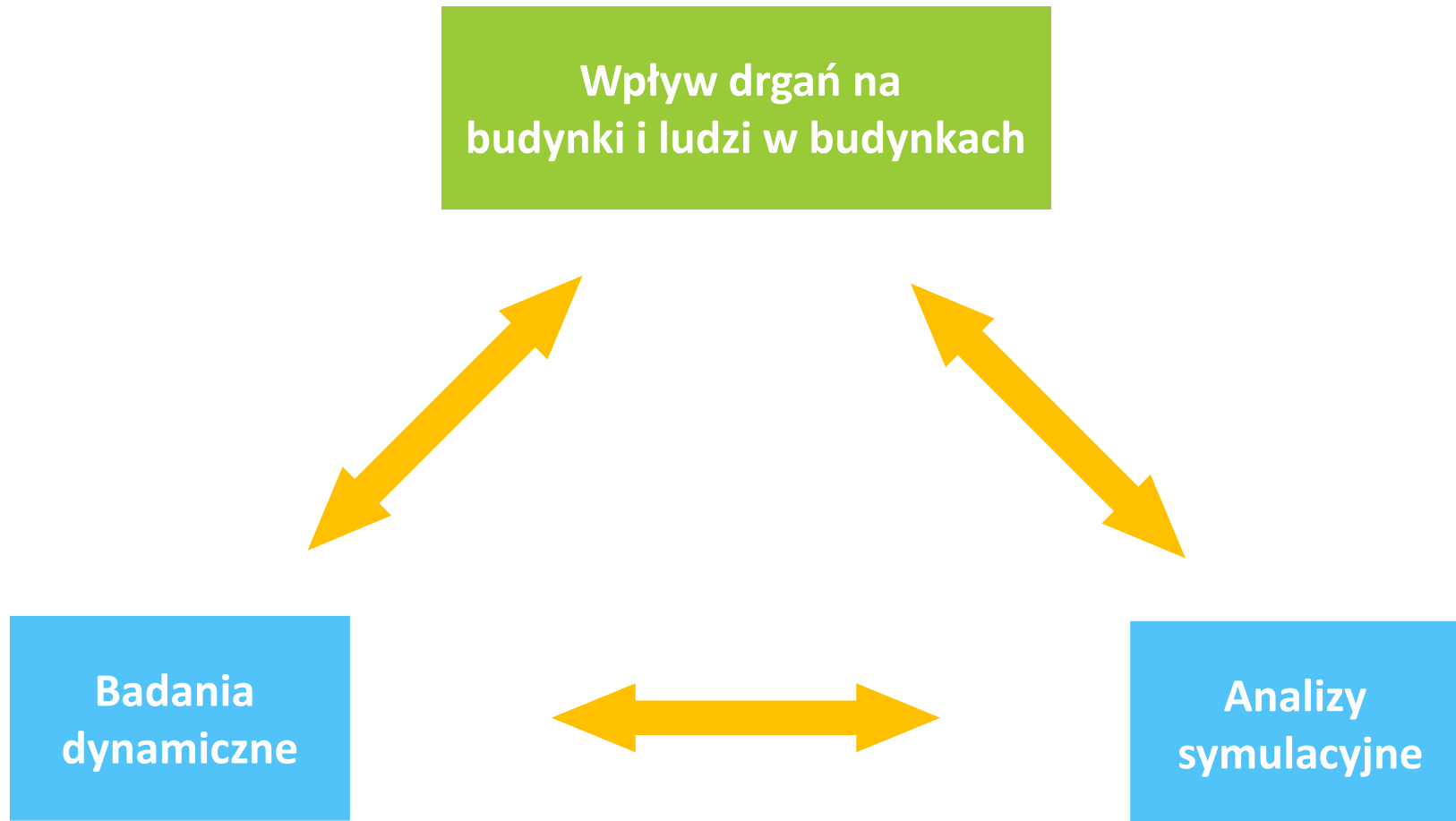
- odległość budynku od linii kolejowej,
- warunki gruntowo-wodne,

- 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>• prognozowane oddziaływania na obiekt</li> <li>• warunki dotyczące nośności i użyteczności</li> </ul>	parametry projektowanego obiektu, który ma przenieść prognozowane oddziaływania bez naruszenia zadanych warunków
Diagnoza	<ul style="list-style-type: none"> <li>• obiekt i jego stan techniczny</li> <li>• oddziaływania na obiekt</li> <li>• kryteria diagnostyczne</li> </ul>	odpowiedź na pytanie: czy istnieje związek skutkowo-przyczynowy między stanem technicznym obiektu albo naruszeniem warunków użytkowania a występującymi oddziaływaniami



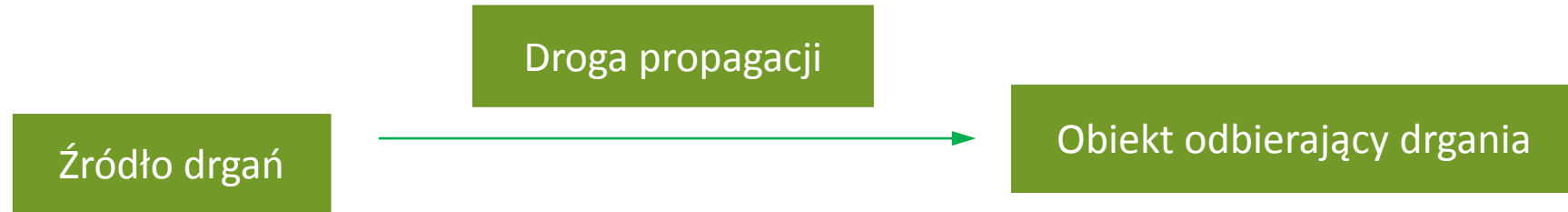
# Przypadki diagnostyczne i projektowe

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	<ul style="list-style-type: none"> <li>• prognozowane oddziaływania na obiekt</li> <li>• warunki dotyczące nośności i użyteczności</li> </ul>	parametry projektowanego obiektu, który ma przenieść prognozowane oddziaływania bez naruszenia zadanych warunków
Diagnoza	<ul style="list-style-type: none"> <li>• obiekt i jego stan techniczny</li> <li>• oddziaływania na obiekt</li> <li>• kryteria diagnostyczne</li> </ul>	odpowiedź na pytanie: czy istnieje związek skutkowo-przyczynowy między stanem technicznym obiektu albo naruszeniem warunków użytkowania a występującymi oddziaływaniami

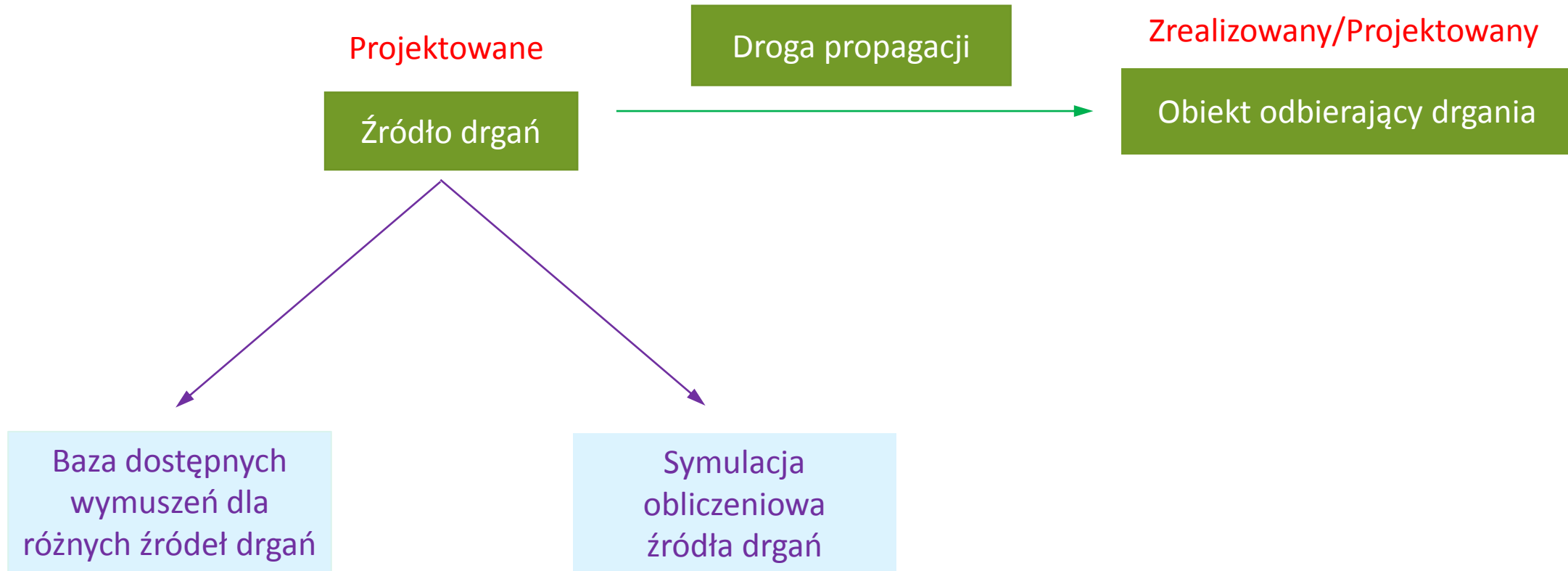
# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

---



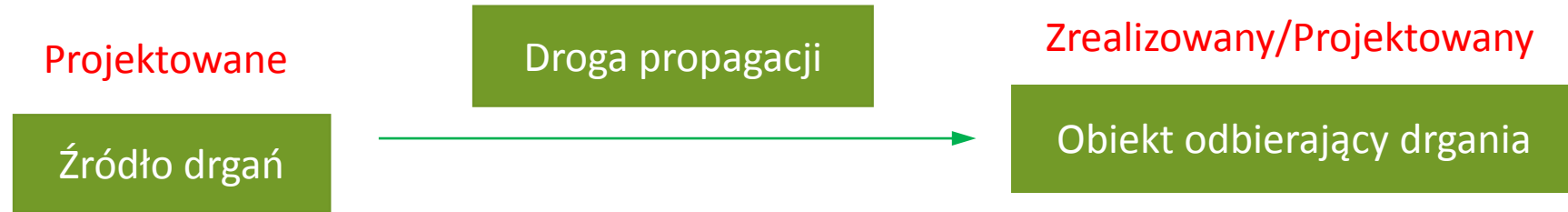
# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

---



# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

---



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”).



PN-B-02170:2016-12

Wpływ drgań na ludzi w budynku poprzez symulacje obliczeniowe.

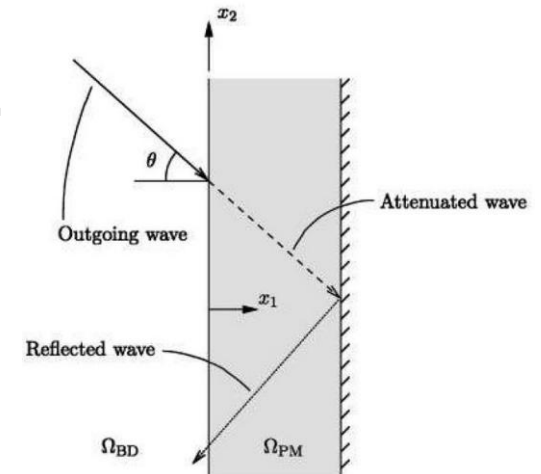
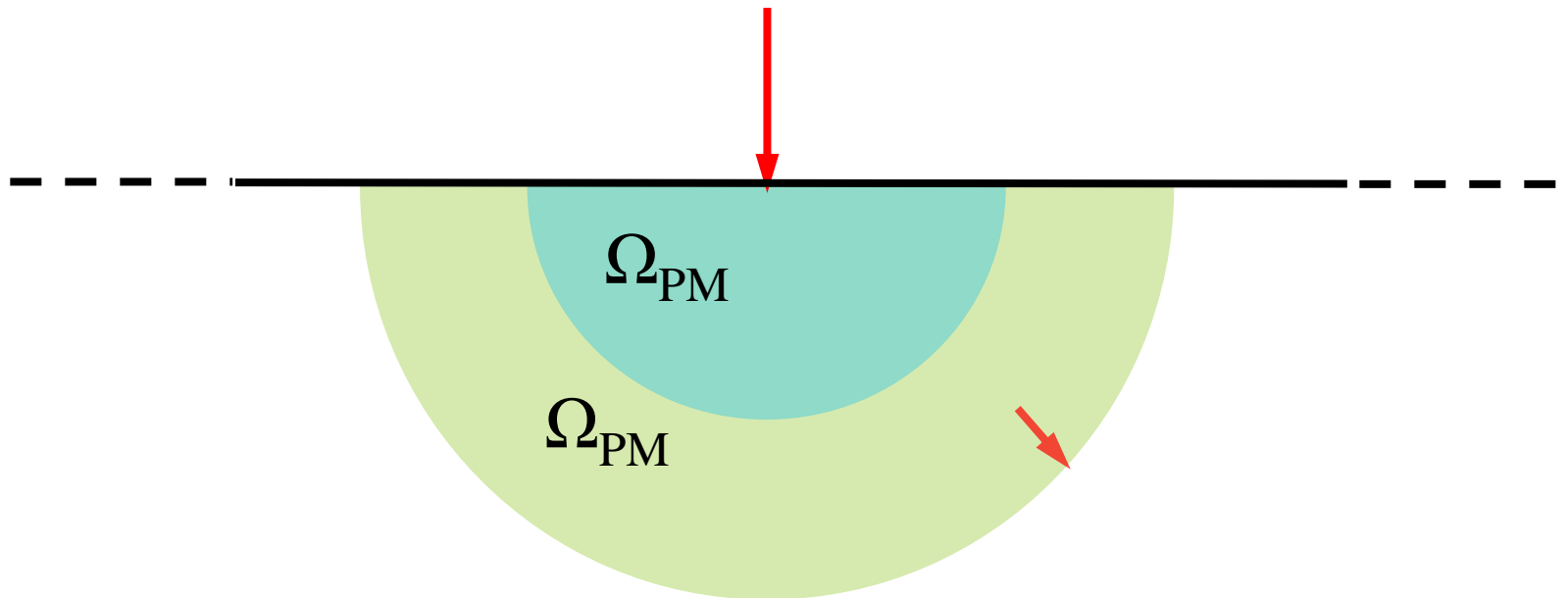
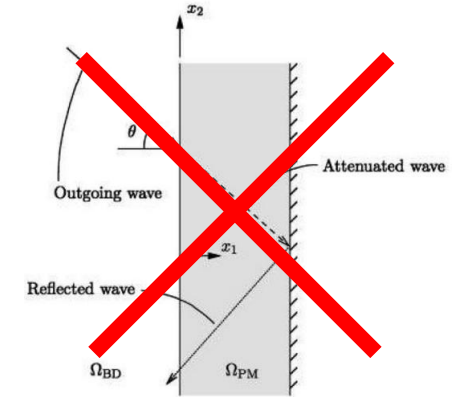
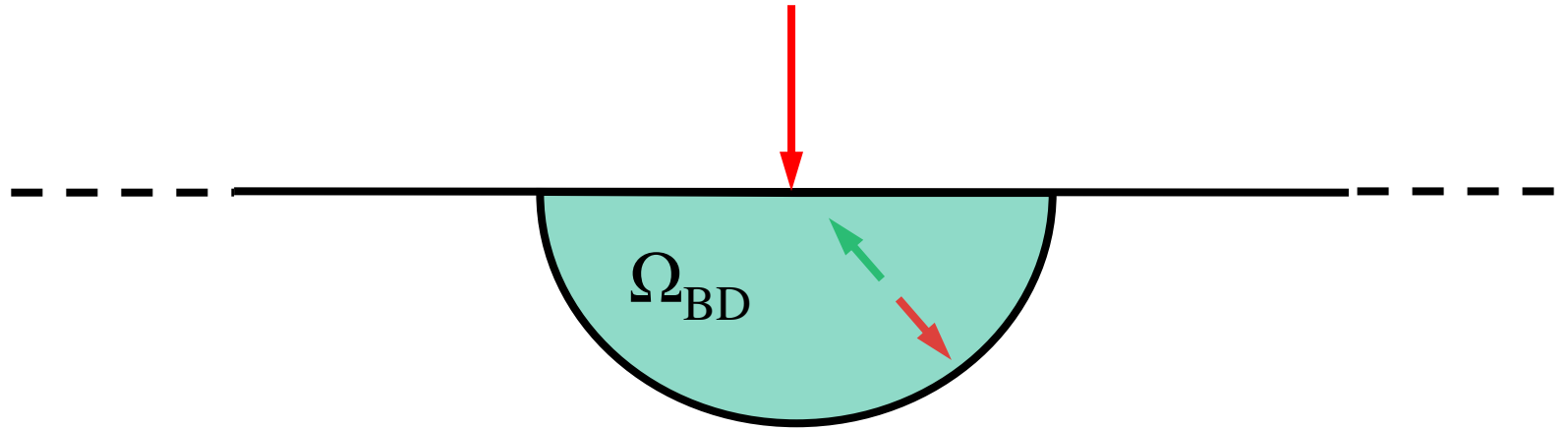


PN-B-02171:2017-06

**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)...

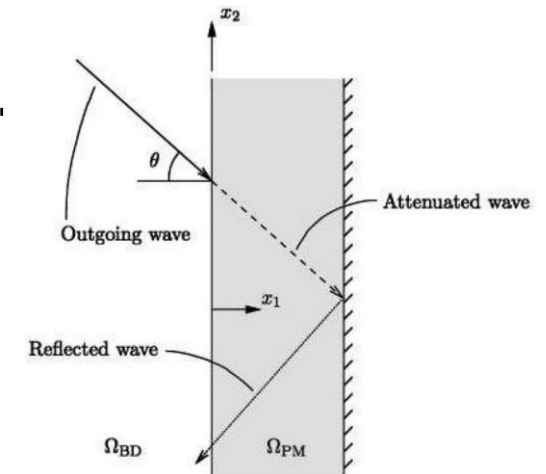
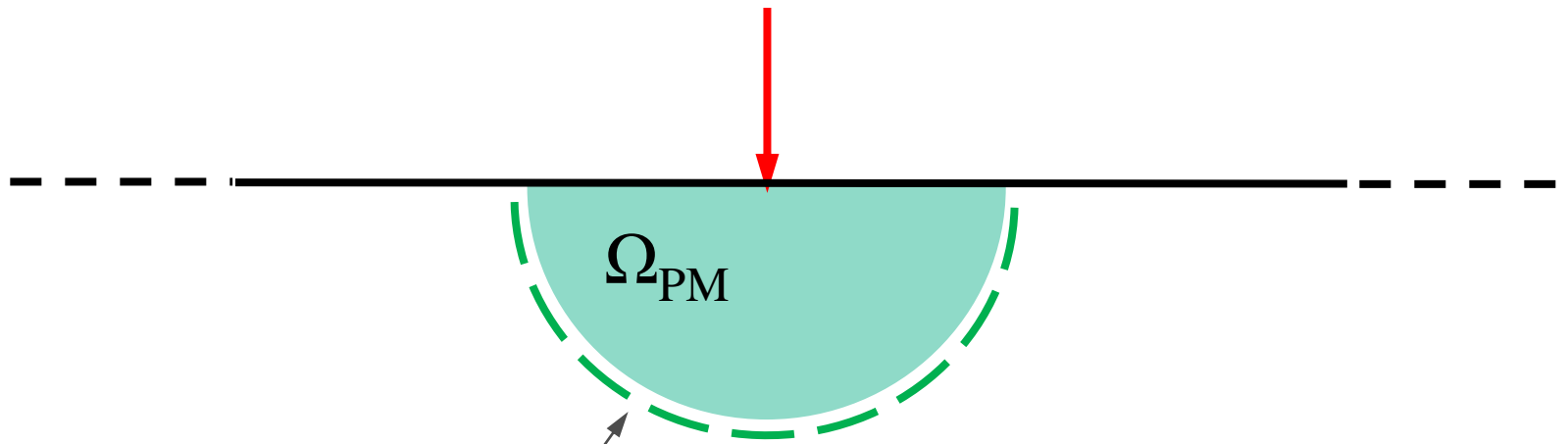
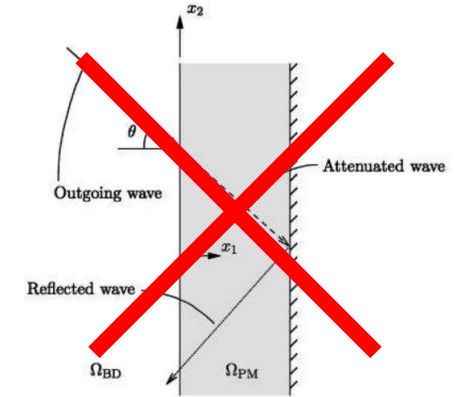
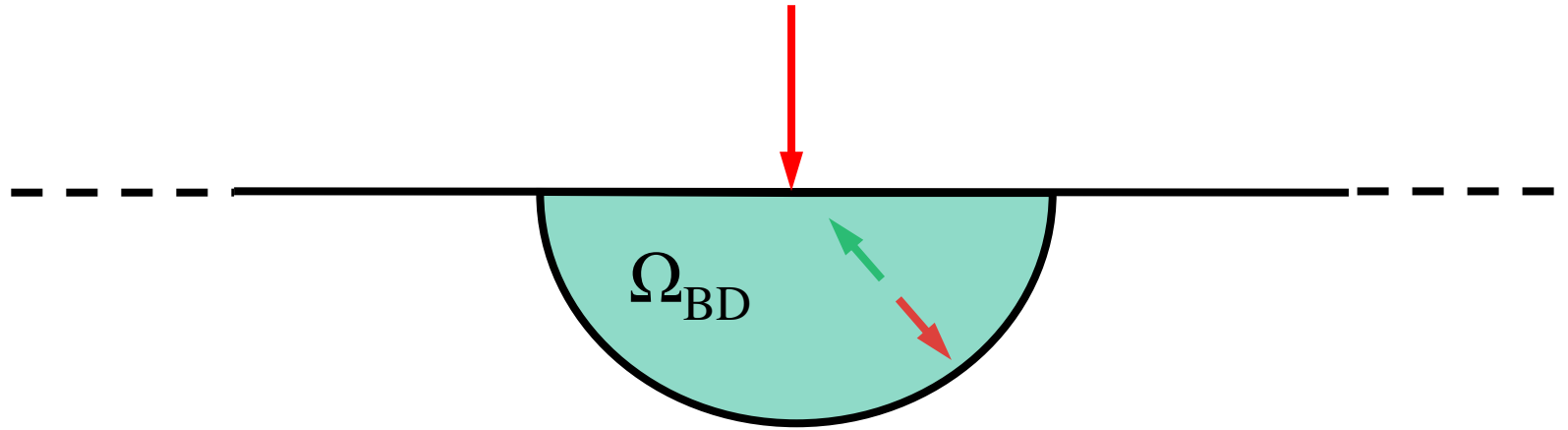
# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

## Dobór modelu obliczeniowego



# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

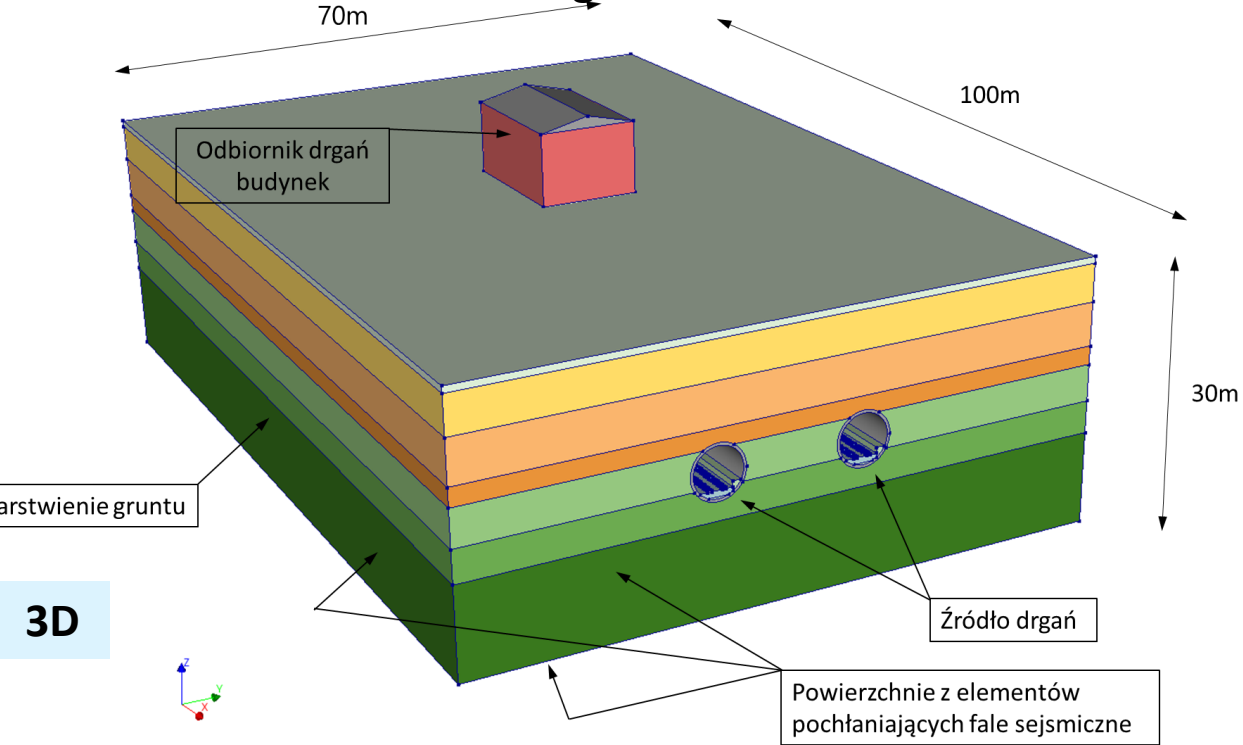
## Dobór modelu obliczeniowego



Elementy tłumiące

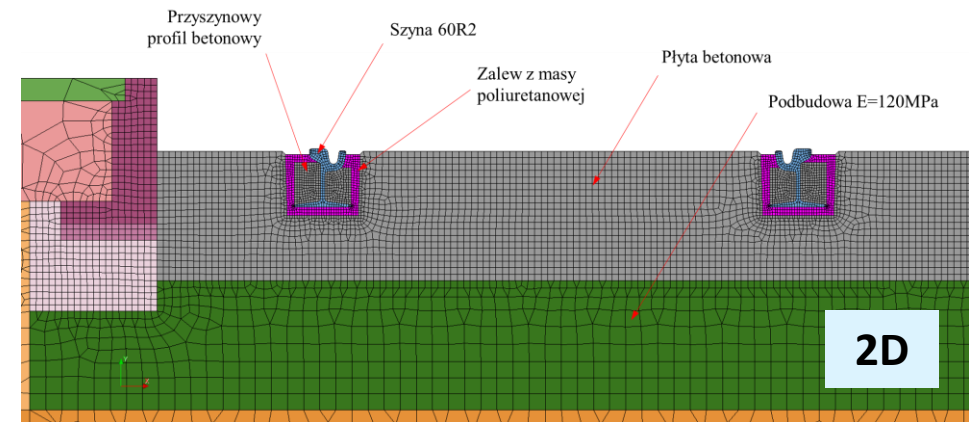
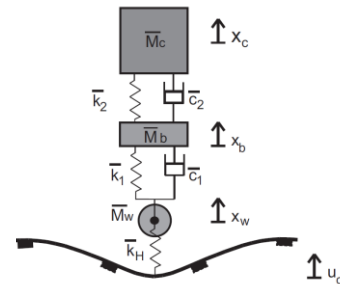
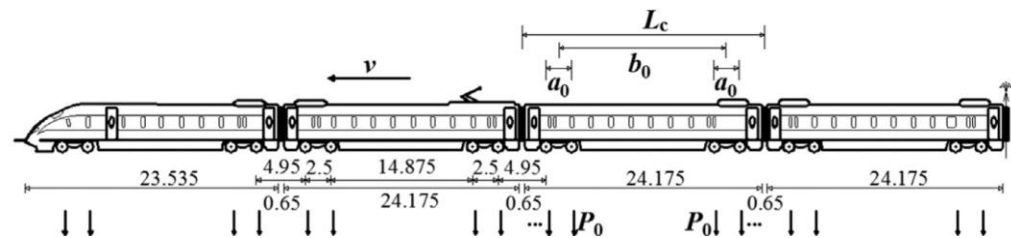
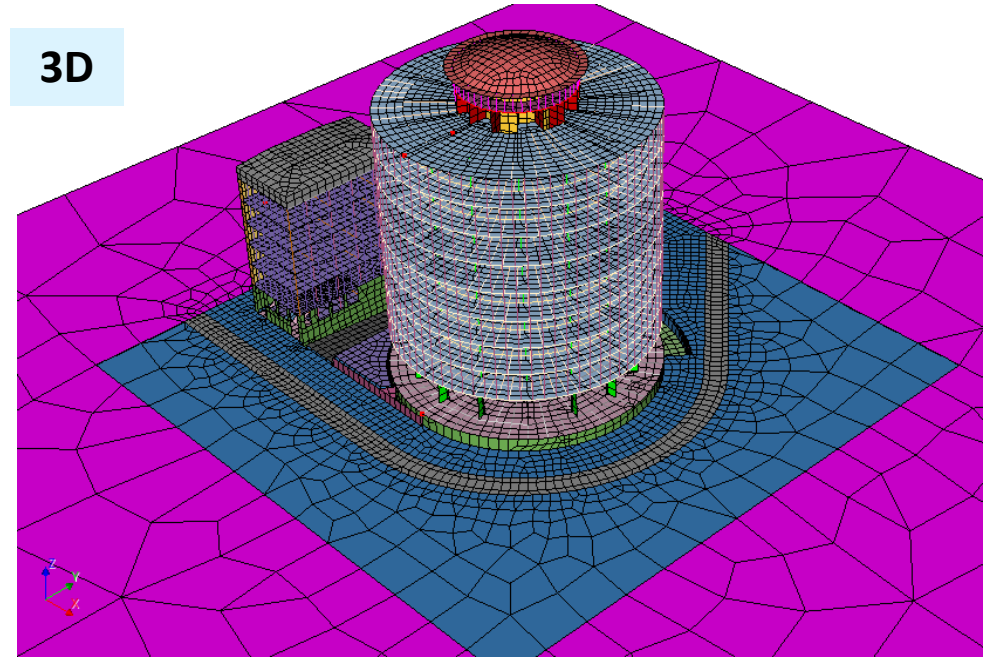
# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

## Dobór modelu obliczeniowego



3D

3D



2D

# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

Projektowane

Źródło drgań

Droga propagacji

Zrealizowany/Projektowany

Obiekt odbierający drgania

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”).

PN-B-02170:2016-12

Wpływ drgań na ludzi w budynku poprzez analizy symulacyjne.

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 B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

---

## 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/symulowanych zjawisk.
9. Sprawdzenie kryteriów odporności dynamicznej i kryteriów komfortu drgań.

# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

---

## Procedura obliczeniowa (symulacje komputerowe)

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



**Obróbka zarejestrowanych sygnałów i przygotowanie danych wejściowych do programów MES.**



**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.

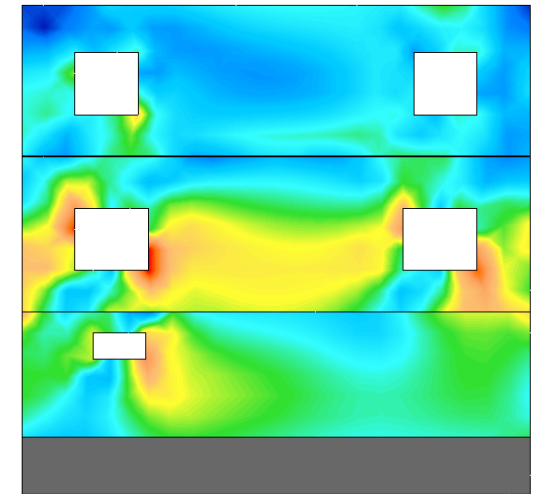
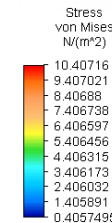
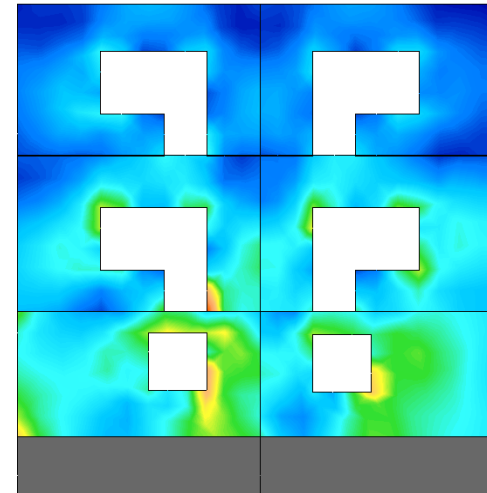
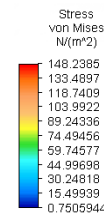
## **Inwentaryzacja lub dokumentacja projektowa**

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

# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

## 5. Modele konstytutywne – opis materiałów




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

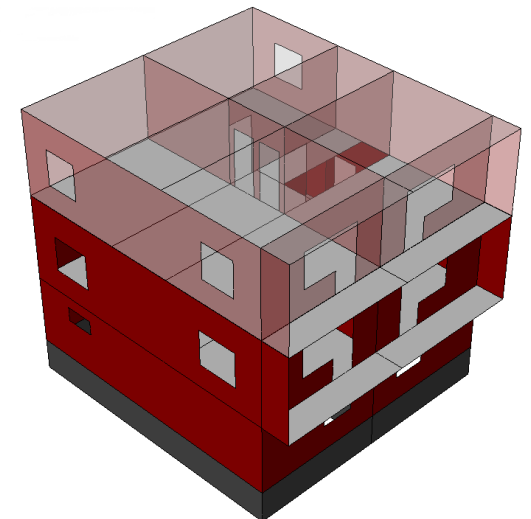
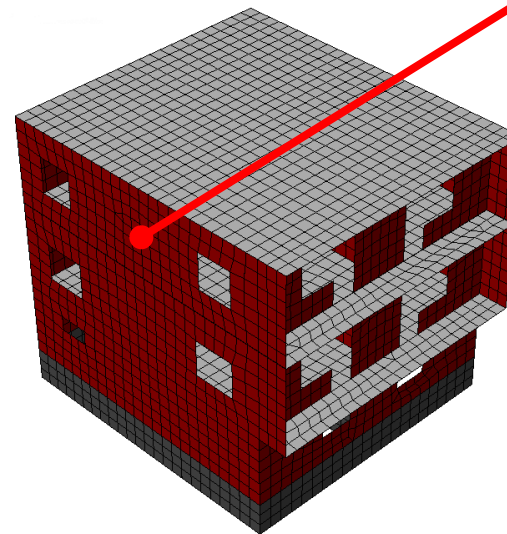
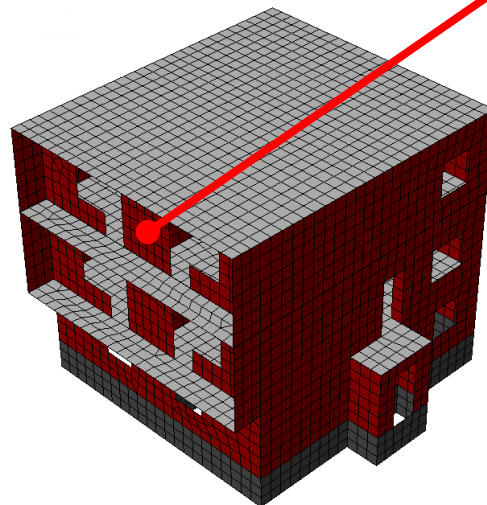


## 6. Kryteria odporności dynamicznej

- Naprężeniowe
- Warunki SGN

Legenda:

-  Mur ceglany
-  Stropy żelbetowe
-  Ściany fundamentowe



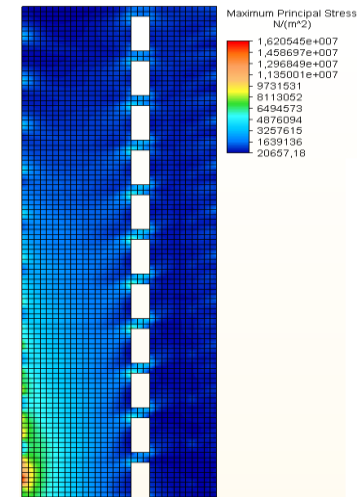
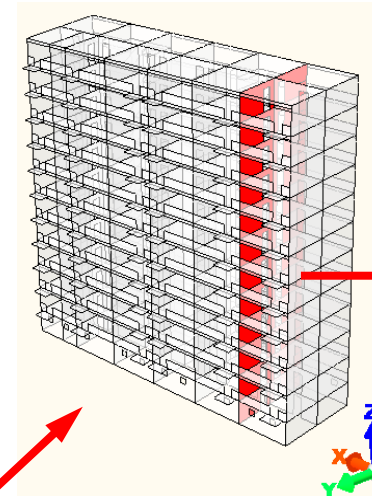
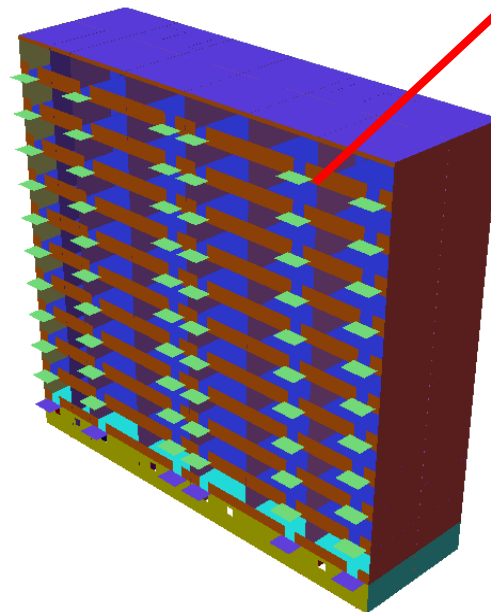
# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

## Modele konstytutywne – opis materiałów

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

## Kryteria odporności dynamicznej

- Naprężeniowe
- Warunki SGN

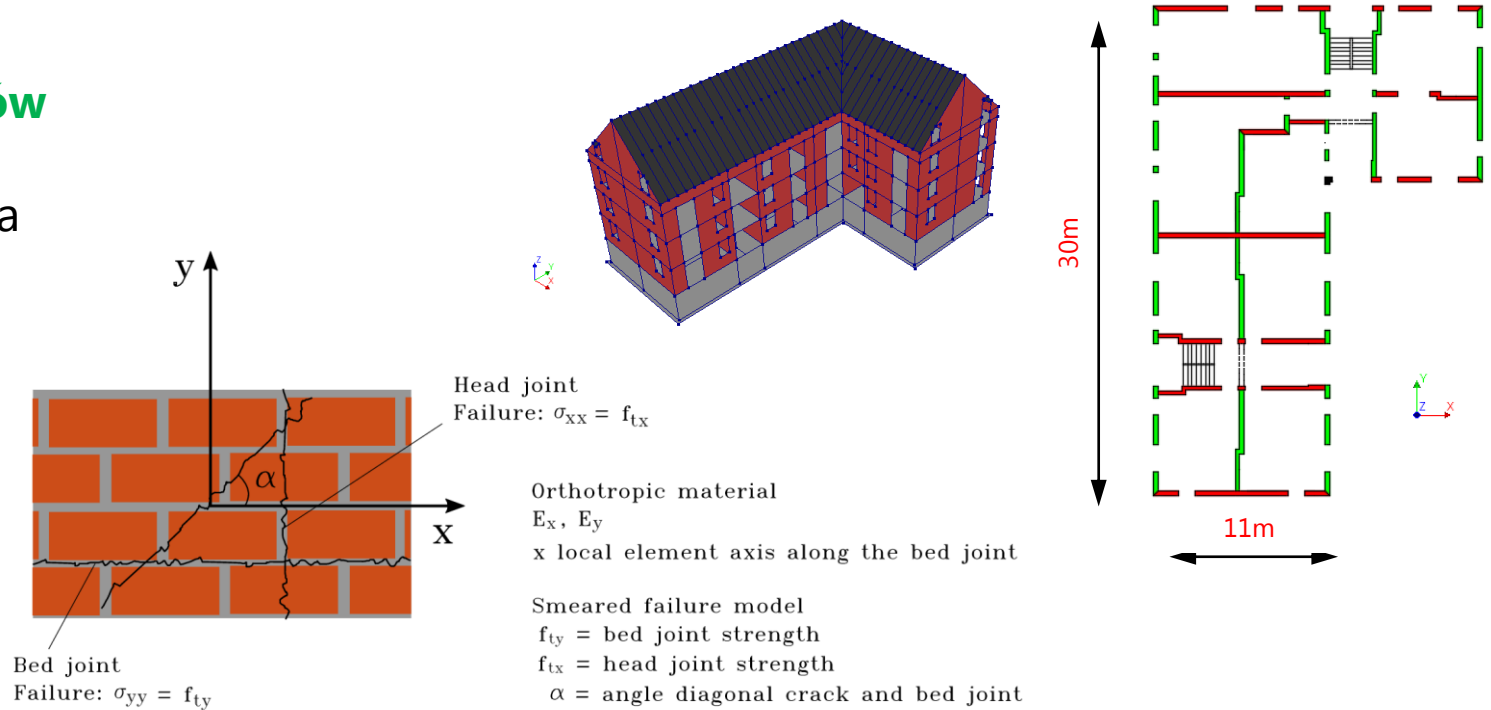


- *Kryterium nośności ściany usztywniającej*
- *Kryterium nośności złącza pionowego*
- *Kryterium nośności złącza poziomego*
- *Kryterium nośności nadproża z uwagi na siłę ścinającą*
- *Kryterium powstania naprężeń rozciągających w złączu poziomym i ścianie konstrukcyjnej*

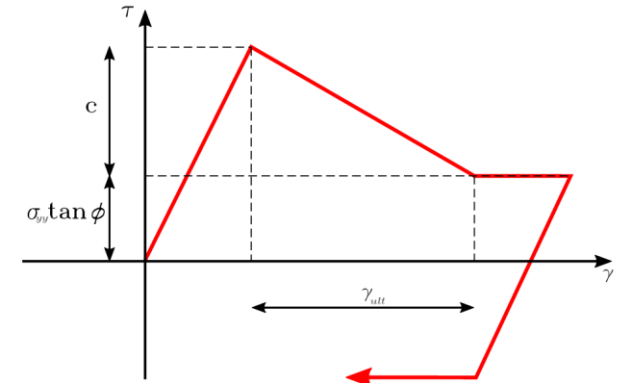
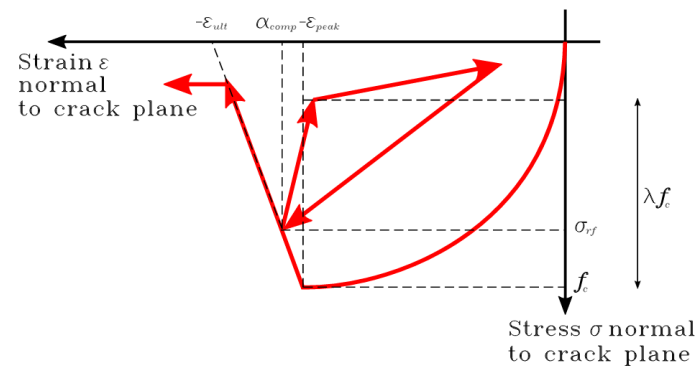
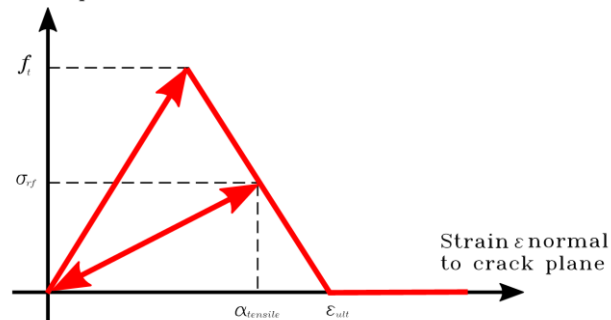
# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

## Modele konstytutywne – opis materiałów

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

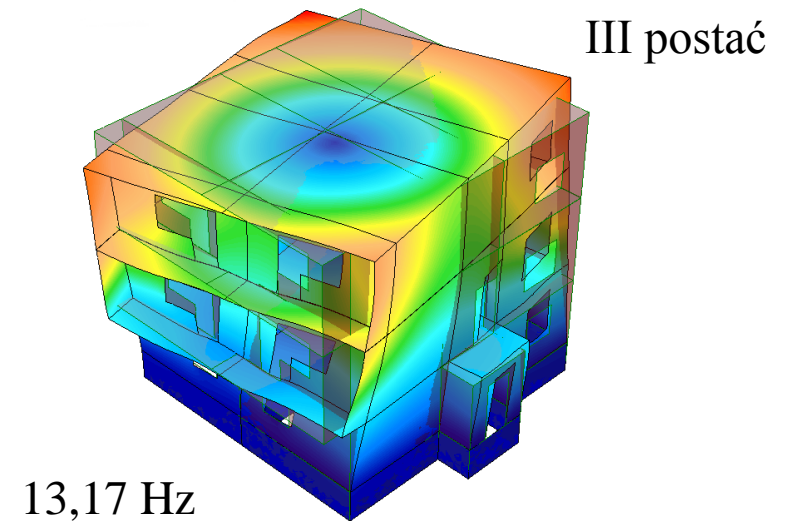
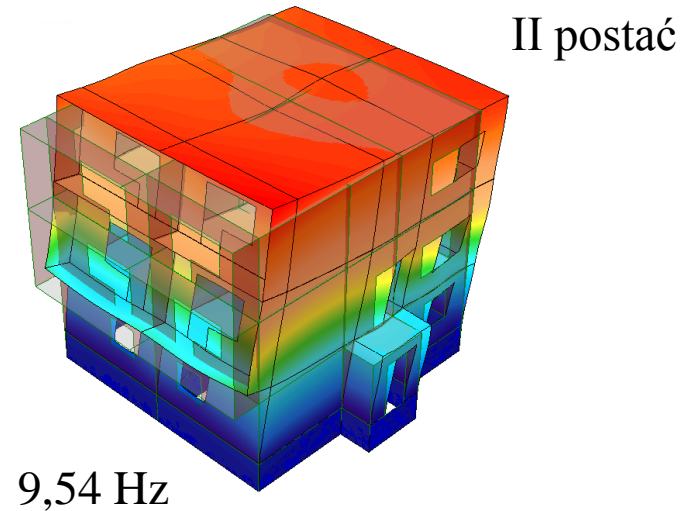
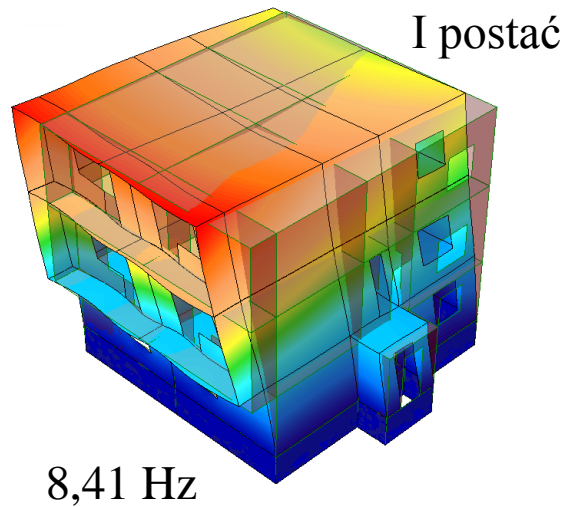


Stress  $\sigma$  normal  
to crack plane



## 7. Kalibracja modelu obliczeniowego

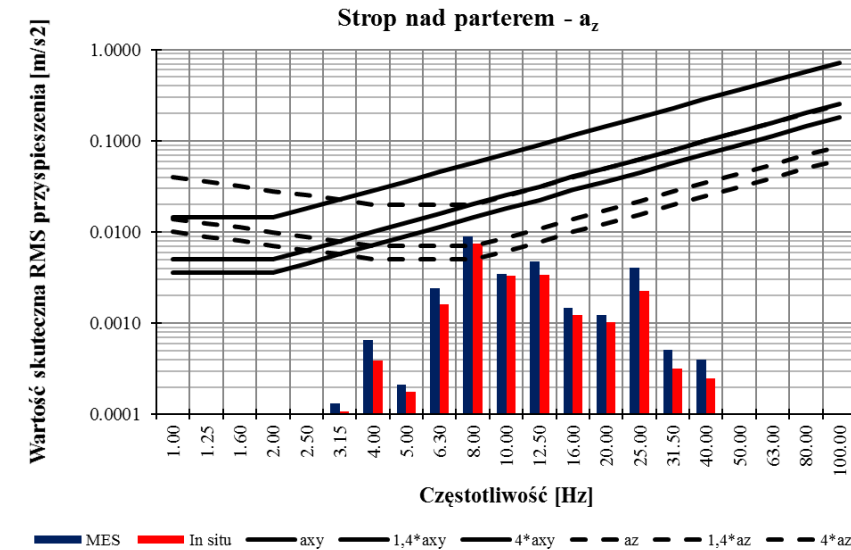
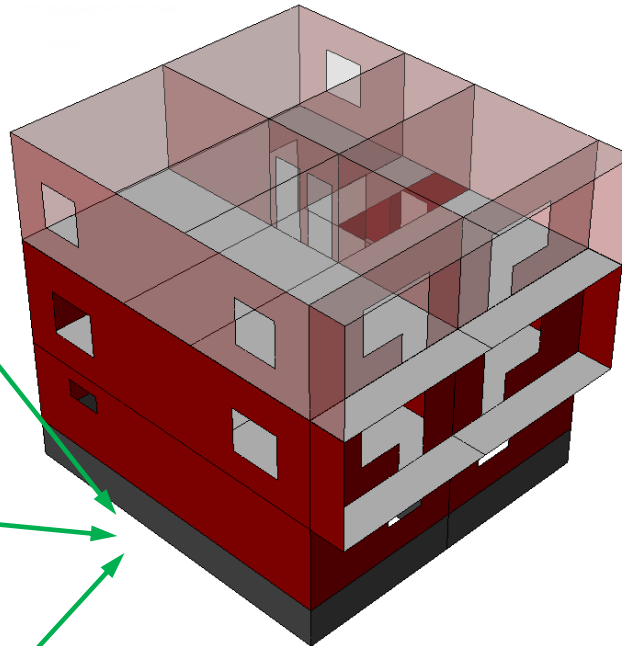
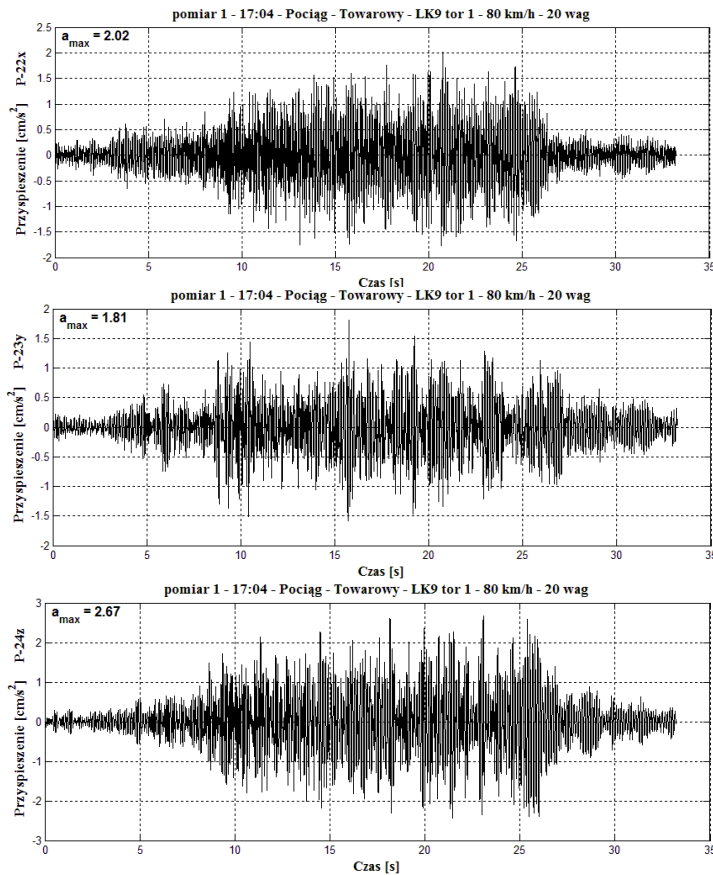
- W zakresie częstotliwości i postaci drgań własnych
- W zakresie analizy RMS





# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

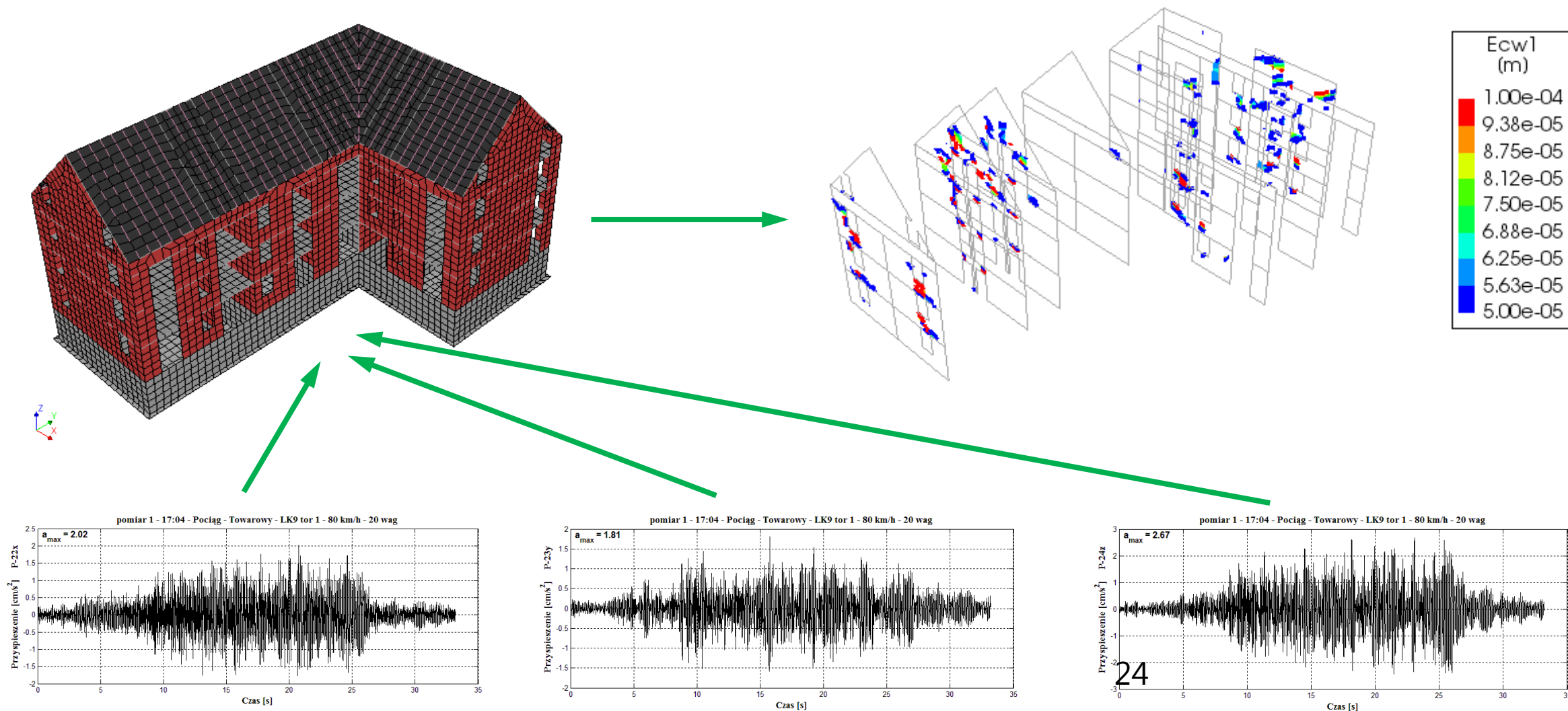
- W zakresie częstotliwości i postaci drgań własnych
- W zakresie analizy RMS



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 B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

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





# Przypadek B i D (Diagnoza z prognozą/Projektowanie z prognozą)

## 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

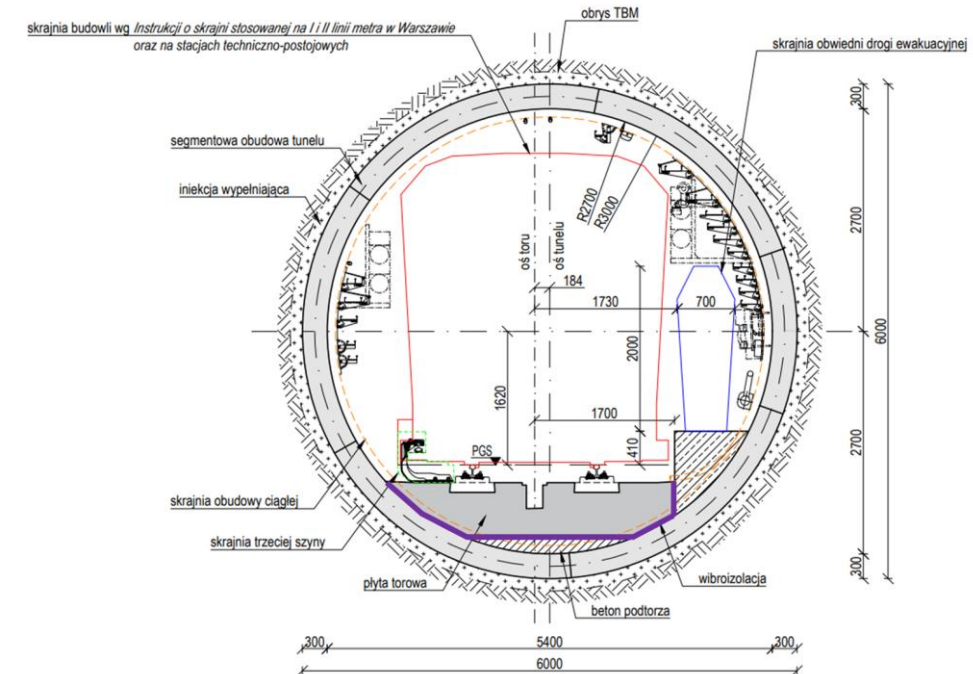
## W razie konieczności dobór rozwiązań minimalizujących drgania w:

### ➤ Źródle

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

### ➤ Odbiorniku (budynku)

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





**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](mailto:filip.pachla@pk.edu.pl)