

Autoreferat

1. Imię i nazwisko.

Piotr Bońkowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2018 **Doktor**, Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa i Architektury, dyscyplina: budownictwo, tytuł rozprawy doktorskiej: *Rotational effects for slender building structures under seismic excitations (Efekty rotacyjne smukłych konstrukcji budowlanych obciążonych sejsmicznie)*.

Promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Zembaty

Promotor pomocniczy: dr inż. Maciej Yan Minch

Rozprawa doktorska została wyróżniona przez Radę Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej

2015 **Magister inżynier**, Politechnika Wrocławska, kierunek: Budownictwo, specjalność: Konstrukcje Budowlane, tytuł pracy magisterskiej: *Kształtowanie konstrukcji budowlanych na terenach szkód górniczych w obrębie LGOM*.

Promotor: dr inż. Maciej Yan Minch

2014 **Inżynier**, Politechnika Wrocławska, kierunek: Budownictwo, specjalność: Inżynieria Budowlana, tytuł pracy inżynierskiej: *Projekt żelbetowej wieży przesiewaczy kruszywa*.

Promotor: dr inż. Maciej Yan Minch

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

2018-obecnie **Adiunkt:** Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Mechaniki, Konstrukcji Budowlanych i Inżynierskich

2016-2018 **Studia Doktoranckie:** Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa i Architektury, kierunek: Budownictwo

2015-2018 **Asystent:** Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Mechaniki, Konstrukcji Budowlanych i Inżynierskich

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Moje zainteresowania naukowe, którym poświęciłem się w okresie całej swojej kariery zawodowej obejmują zagadnienia wykorzystania pomiarów rotacji i analizy wpływów rotacji na konstrukcje inżynierskie. Z tego obszaru zgłaszam w niniejszym postępowaniu habilitacyjnym następujące dwa różne osiągnięcia:

- a) **Pierwsze osiągnięcie naukowe** dotyczące wykorzystania pomiarów dynamicznych rotacji do monitorowania zmian sztywności uszkodzonych belek żelbetowych, zostało zawarte w monografii naukowej:

[A] Bońkowski P. (2023). *Application of Rotation Rate Sensors for Structural Health Monitoring of Reinforced Concrete Beams*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2023 r., ISBN 978-83-66903-36-4.

- b) **Drugie osiągnięcie naukowe** stanowi cykl pięciu publikacji dotyczący wpływów statycznych i dynamicznych rotacji podłoża na odpowiedź sejsmiczną smukłych konstrukcji budowlanych:

[B] Bońkowski P.A., Kuś J. & Zembaty Z., (2021). Seismic rocking effects on a mine tower under induced and natural earthquakes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 21, 65. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00221-7>.

[C] Bońkowski P., Zembaty Z., Minch M.Y., (2020). Effect of soil compliance on seismic response of slender towers under rocking excitations, in: Köber D. et al. (eds.), *Seismic*

Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures III. Springer, ISBN 978-3-030-33532-8, pp 3-10. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33532-8_1.

[D] Bońkowski P.A., Zembaty Z., Minch M.Y., (2019). Seismic effects on leaning slender structures and tall buildings. *Engineering Structures*, vol. 198, 109518. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109518>.

[E] Bońkowski P.A., Zembaty Z., Minch M.Y., (2019). Engineering analysis of strong ground rocking and its effect on tall structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 116, 358-370. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.026>.

[F] Bońkowski P.A., Zembaty Z., Minch M.Y., (2018). Time history response analysis of a slender tower under translational-rocking seismic excitations. *Engineering Structures*, vol. 155, 387-393. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.042>.

Osiągnięcia te zostały szczegółowo omówione poniżej.

a) **Monografia naukowa: Bońkowski P. (2023). *Application of Rotation Rate Sensors for Structural Health Monitoring of Reinforced Concrete Beams*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2023 r., ISBN 978-83-66903-36-4.**

Monografia dotyczy wykorzystania dynamicznych pomiarów rotacji do monitorowania zmian sztywności uszkodzonych belek żelbetowych.

Monitorowanie stanu konstrukcji, znane także jako SHM (z ang. *Structural Health Monitoring*), jest jednym z głównych obszarów inżynierii lądowej. Głównym zadaniem SHMu jest zbieranie informacji o stanie konstrukcji w celu umożliwienia jej właścicielowi/zarządcy podjęcia odpowiednich decyzji dotyczących np. wymaganych prac naprawczych i/lub wzmacniających. Takie decyzje mogą być wymagane po jej przeciążeniu, na przykład ruchem pojazdów po moście, huraganowym wietrze, wyjątkowym opadzie śniegu, lub po trzęsieniu ziemi. Pod tym względem szczególnie istotnym zagadnieniem SHMu jest wykrywanie uszkodzeń zanim dojdzie do katastrofy.

Pod względem wykrywania uszkodzeń, konstrukcje żelbetowe stanowią szczególne wyzwanie. Problemy klasycznej detekcji uszkodzeń w konstrukcjach stalowych, lub kompozytowych polegają zazwyczaj na lokalizacji pojedynczego, lub ewentualnie maksymalnie kilku uszkodzeń w postaci utraty sztywności na niewielkim obszarze (w stosunku do wielkości elementu). W przypadku konstrukcji żelbetowych, uszkodzenia mają inny charakter. W wyniku obciążenia konstrukcji następuje jej zarysowanie, które powoduje spadek sztywności zarysowanego elementu na znacznym obszarze. Wielkość spadku sztywności jest w tym wypadku ściśle powiązana z siłami wewnętrznymi, jakie wystąpiły na danym obszarze

konstrukcji. Dla małych obciążeń rysy są niewielkie, często niewidoczne, lecz w miarę wzrostu obciążeń rysy powiększają się i zwiększa się ich liczba. Powoduje to zwiększenie się obszaru konstrukcji o zredukowanej sztywności. Istotnymi utrudnieniami monitorowania stanu konstrukcji żelbetowych jest także nieliniowa praca uszkodzonych elementów żelbetowych, czy brak ścisłej definicji uszkodzenia dla tego typu konstrukcji. Dla typowych konstrukcji żelbetowych normy projektowe pozwalają na określony stopień zarysowania, ponieważ zakłada się, że w okresie życia konstrukcji negatywny wpływ rys będzie ograniczony. W związku z powyższymi trudnościami, metodologia monitorowania uszkodzeń konstrukcji żelbetowych często opiera się na poszukiwaniu uśrednionego, na danym obszarze, zlinearyzowanego spadku sztywności. Analizując literaturę dotyczącą szacowania spadków sztywności uszkodzonych belek żelbetowych w wyniku ich uszkodzeń, można spotkać prace dotyczące wykorzystania akcelerometrów (np. [1]), lub pomiarów odkształceń (np. przy pomocy włókien światłowodowych [2]). Obydwie grupy metod zmagają się z problemami, które opisałem w monografii [A].

W ostatnich latach zauważono znaczący rozwój dynamicznych czujników rotacji. Czujniki te są coraz mniejsze, dokładniejsze i tańsze. Biorąc pod uwagę, że obroty osi prętów bezpośrednio odzwierciedlają giętne odkształcenia konstrukcji to pojawia się okazja zaproponowania prostszych i bardziej efektywnych metod SHM przy zastosowaniu czujników rotacyjnych i obserwacje rotacyjnych postaci drgań konstrukcji (pierwsze pochodne przestrzenne translacyjnych postaci drgań) które są bardziej wrażliwe na uszkodzenia niż tradycyjne poprzeczne postaci drgań. Dzięki tym czynnikom, dynamiczne czujniki rotacji mogą stanowić ciekawą alternatywę do sprawiających tyle trudności, obecnie wykorzystywanych metod monitorowania konstrukcji żelbetowych.

W monografii [A], będącej moim pierwszym osiągnięciem naukowym, przeanalizowałem eksperymentalnie możliwość wykorzystania czujników prędkości rotacji typu MEMS w monitorowaniu stanu uszkodzonych belek żelbetowych wskazując na znaczące korzyści z ich zastosowania do monitorowania tych konstrukcji. Układ i zakres monografii przedstawiam poniżej.

Rozdział 1 monografii stanowi wprowadzenie do omawianej tematyki oraz przedstawiono zakres pracy. Zdefiniowano także cel pracy jakim jest eksperymentalna weryfikacja możliwości i ewentualne korzyści z wykorzystania pomiarów prędkości rotacji w monitorowaniu belkowych elementów żelbetowych.

W przypadku, gdy wpływ odkształceń postaciowych jest pomijalnie mały, rotacja osi konstrukcji może być obliczona jako pierwsza pochodna przestrzenna giętych postaci

translacyjnych. W rozdziale 2 opisano prace dotyczące wykorzystania pochodnych przestrzennych postaci drgań, to jest rotacji i krzywizny osi, w monitorowaniu stanu konstrukcji. Wykonany przegląd literaturowy pozwolił stwierdzić, że pochodne postaci drgań są chętnie wykorzystywane w monitorowaniu stanu konstrukcji a ich zastosowanie pozwala na dokładniejszą lokalizację uszkodzeń. Zasadniczą częścią tych prac stanowią jednak badania z wykorzystaniem drugiej pochodnej postaci drgań (postać krzywiznowa) oraz prace dotyczące lokalizowania pojedynczych uszkodzeń. Z uwagi na trudności w bezpośrednim pomiarze rotacji i krzywizny postaci drgań, postacie te są często obliczane numerycznie z interpolowanych postaci translacyjnych. W takim wypadku, interpolacja może zmniejszać dokładność uzyskanych wyników.

Obecnie dostępnych jest szereg różnych czujników do pomiarów dynamicznych rotacji. Są to kontaktowe czujniki mechaniczne, światłowodowe FOG, laserowe, MEMS, elektrochemiczne, piezoelektryczne, dostępne są także czujniki bezkontaktowe. W związku z tym rozwojem technik pomiarów rotacji, zaczęło pojawiać się coraz więcej prac z obszaru wykorzystania bezpośrednich pomiarów rotacji w monitorowaniu konstrukcji. W rozdziale 3 wykonano przegląd prac obejmujących badania eksperymentalne nad wykorzystaniem pomiarów rotacji w analizie modalnej i monitorowaniu konstrukcji. Oprócz prac dotyczących wykorzystania dynamicznych pomiarów rotacji uwzględniono także wybrane prace dotyczące wykorzystania statycznych pomiarów rotacji za pomocą inklinometrów. Na podstawie wykonanego przeglądu stwierdzono, że względem metod opartych jedynie na pomiarach translacji konstrukcji, bezpośredni pomiar rotacji pozwala na zwiększenie dokładności otrzymanych przemieszczeń, rotacji i krzywizn konstrukcji. Tym samym, badania pokazują, że bezpośredni pomiar rotacji pozwala na lepszą detekcję uszkodzeń w stosunku do metod opartych na pomiarach translacji. Badania te dotyczą jednak eksperymentów z wykorzystaniem stosunkowo małych elementów wykonanych z plexi lub stali w których charakter uszkodzeń jest zdecydowanie mniej skomplikowany niż w belkach żelbetowych.

Z uwagi na przedstawione wcześniej, specyficzne właściwości konstrukcji żelbetowych, wykrywanie ich uszkodzeń jest szczególnie wymagające. Na przestrzeni lat zaproponowano szereg metod wykorzystujących pomiary drgań do monitorowania stanu tego typu konstrukcji. W tego typu metodach wykorzystuje się podstawowe informacje dotyczące właściwości modalnych konstrukcji, takich jak częstotliwości drgań, tłumienie i postacie drgań do wykrywania, lub w niektórych metodach nawet do lokalizowania i szacowania wielkości uszkodzeń. W rozdziale 4 opisano prace dotyczące wykrywania uszkodzeń w konstrukcjach żelbetowych za pomocą pomiarów drgań. Przegląd literaturowy został podzielony na dwie

części. W części pierwszej przedstawiono metody, których celem jest wykrycie uszkodzenia i jego ewentualna lokalizacja. W części tej przedstawiono także podstawowe badania dotyczące wpływu uszkodzenia na podstawowe charakterystyki modalne. W części drugiej opisano prace będące najbliższej badanej przeze mnie metody, to jest dotyczące szacowania rozkładów sztywności w uszkodzonych konstrukcjach żelbetowych. W tym wypadku najczęściej wymagane jest otrzymanie postaci krzywiznowych konstrukcji. Z tego powodu, metody te posiadają te same mankamenty co metody opisane w rozdziale 2. W tym ujęciu wykorzystanie czujników rotacji może stanowić alternatywę do istniejących metod, która ma szansę poprawić dokładność identyfikacji uszkodzeń w konstrukcjach żelbetowych.

W celu wstępnej weryfikacji zastosowania czujników prędkości rotacji w szacowaniu spadków sztywności uszkodzonych belek żelbetowych, zastosowaną metodologię sprawdzono dla zbliżonego zagadnienia lokalizowania dodatkowej masy w konstrukcji. Zmiana masy, podobnie jak uszkodzenie, powoduje zmianę charakterystyk modalnych konstrukcji. Z uwagi na możliwość dokładnego zważenia zamocowanej masy, a także na możliwość taniej analizy wielu układów rozkładów dodatkowych mas, zagadnienie lokalizacji dodatkowej masy jest niekiedy stosowane jako tańsza metoda weryfikacji metody monitorowania konstrukcji. W rozdziale 5 wykonano przegląd wybranych publikacji dotyczących identyfikacji dodatkowych mas w konstrukcji. W trakcie wykonywania analizy literaturowej, stwierdziłem, że obecnie brak jest badań nad wykorzystaniem zmierzonych rotacji w lokalizowaniu dodatkowych mas w konstrukcji. W związku z tym, w rozdziale 7 postanowiono przeanalizować ten problem pod kątem zastosowania pomiarów prędkości rotacji.

W rozdziale 6 opisano metody wykorzystane przeze mnie w szacowaniu spadków sztywności uszkodzonych belek żelbetowych. W swoich badaniach wykorzystałem metodę aktualizacji modelu numerycznego (*model updating method*). Metoda ta charakteryzuje się największą uniwersalnością. Polega ona na takiej zmianie parametrów modelu numerycznego aby uzyskać jak najlepsze dopasowanie charakterystyk modalnych modelu numerycznego i charakterystyk modalnych rzeczywistej konstrukcji. Zagadnienie to sprowadza się do minimalizacji funkcji celu, która w ujęciu ogólnym, może przyjąć następującą formę:

$$\begin{aligned}
 \min_{\Delta \mathbf{m}, \Delta \mathbf{k}} J(\Delta \mathbf{m}, \Delta \mathbf{k}) &= \sum_i \sum_j w_i \left(\phi_{ij}^{ref} - \phi_{ij}^{FEM}(\Delta \mathbf{m}, \Delta \mathbf{k}) \right)^2 \\
 &+ \sum_k w_k \left(\lambda_k^{ref} - \lambda_k^{FEM}(\Delta \mathbf{m}, \Delta \mathbf{k}) \right)^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie i, k są numerami porównywanych postaci drgań; j porównywanym stopniem swobody; w_i, w_k są wagami związanymi z i -tą postacią drgań i k -tą wartością własną; $\Delta m, \Delta k$ są macierzami modyfikującymi pierwotną macierz masy i sztywności. Dostępnych jest szereg metod optymalizacji funkcji. W swoich badaniach powyższe zagadnienie rozwiązałem korzystając z algorytmów genetycznych. Wybór ten był podyktowany uniwersalnością i łatwością implementacji. W drugiej części tego rozdziału opisałem kolejne kroki wykonane podczas eksperymentalnej analizy modalnej konstrukcji. Wszystkie powyższe zagadnienia zostały rozwiązane z wykorzystaniem autorskich programów napisanych w środowisku MATLAB.

W celu wstępnej weryfikacji zaproponowanej metody, w rozdziale 7 wykonałem numeryczną i eksperymentalną analizę wykorzystania pomiarów rotacji w identyfikacji dodatkowych mas w elementach belkowych. W analizie numerycznej przeanalizowałem dwa układy konstrukcyjne: belkę wolnopodpartą i belkę wspornikową. Zbadałem wpływ takich czynników jak układ dodatkowych mas w konstrukcji, ilość dostępnych informacji na dokładność lokalizacji dodatkowych mas, czy wielkość szumu pomiarowego. W przypadku belki wolnopodpartej zauważyłem, że niezależnie od rozkładu dodatkowych mas i szumu pomiarowego, jednoczesne uwzględnienie postaci translacyjnych i rotacyjnych może poprawić dokładność identyfikacji mas. W skrajnym przypadku wynik jest zbliżony do identyfikacji masy bez wykorzystania postaci rotacyjnych. W przypadku belki wspornikowej przeanalizowałem wpływ ilości uwzględnionych w optymalizacji postaci drgań na dokładność identyfikacji mas. W tym wypadku wykazałem, że korzystny wpływ uwzględnienia postaci rotacyjnych jest szczególnie widoczny gdy dostępna jest jedynie pierwsza lub dwie pierwsze postaci drgań własnych.

W przeprowadzonych przeze mnie badaniach eksperymentalnych wykonałem poszukiwanie dodatkowych mas zamocowanych na belce stalowej IPE 100 o długości 6 m. W tym wypadku wybór elementu do badań podyktowany był możliwością stosunkowo prostej modyfikacji masy znacznie lżejszego elementu badawczego w porównaniu do analitycznej belki żelbetowej. Identyfikacje dodatkowych mas przeprowadziłem dla dwóch układów statycznych: belki wolnopodpartej i podwieszanej na elastycznych linach symulujących układ *free-free*. Wyniki moich badań pokazują, że dla obu układów konstrukcyjnych, uwzględnienie postaci rotacyjnej może poprawić dokładność identyfikacji masy. Poprawa ta jest widoczna w przypadku wykorzystania jedynie pierwszej postaci drgań. W wykonanych przeze mnie analizach redukcja błędu identyfikacji masy dochodziła do 40% (wykorzystanie jedynie postaci rotacyjnej

dla układu *free-free*) i 60% (wykorzystanie zarówno postaci rotacyjnej i translacyjnej dla układu *free-free*).

W rozdziale 8 opisałem właściwe badania będące celem monografii tj. wykorzystania pomiarów prędkości rotacji w rekonstrukcji sztywności uszkodzonych belek żelbetowych. W ramach analiz przebadano trzy żelbetowe belki o długości 6 m wykonane z wysokowytrzymałego betonu (Rys. 1). Belki te były stopniowo uszkodzane (symetrycznie lub asymetrycznie) za pomocą siłownika statycznego. Po każdym etapie uszkodzenia wykonano inwentaryzację rys oraz eksperymentalną analizę modalną z wykorzystaniem translacyjnych akcelerometrów MEMS i czujników MEMS prędkości rotacji. Analiza modalna została przeprowadzona w układzie belki wolnopodpartej i tzw. belki *free-free*. W badaniach przeanalizowałem wpływ ilości danych modalnych, stosunku ilości danych wejściowych do ilości danych wyjściowych, dodatkowych warunków narzuconych w procesie optymalizacji numerycznej podczas identyfikacji uszkodzeń i sposobu otrzymania postaci rotacyjnej na dokładność oszacowanych spadków sztywności.



Rys. 1. Widok badanego elementu podczas badań eksperymentalnych na wykorzystaniem czujników prędkości rotacji do rekonstrukcji sztywności uszkodzonych belek żelbetowych [A]

Poniżej przedstawiono najważniejsze obserwacje z przeprowadzonych analiz szacowania spadków sztywności.

- W wyniku zastosowania metody aktualizacji modelu numerycznego otrzymano spadki sztywności zgodne z zaobserwowanymi rozkładami rys.
- W przypadku zastosowania jedynie postaci translacyjnych, w poszczególnych stanach uszkodzeń, spadek sztywności w niektórych elementach był niewykryty lub był znacząco mniejszy w stosunku do poprzedniego stanu uszkodzenia pomimo wzrostu zarysowania.
- Wykorzystanie postaci rotacyjnych pozwoliło na wykrycie uszkodzeń w prawie wszystkich obszarach uszkodzonych belek.
- W przypadku gdy liczba poszukiwanych niewiadomych była w przybliżeniu równa liczbie osi pomiarowych, nie zauważono istotnych różnic pomiędzy wykorzystaniem samych postaci rotacyjnych a wykorzystaniem łącznie postaci rotacyjnych i translacyjnych w szacowaniu spadków sztywności.
- W przypadku, gdy nie uwzględniono dodatkowych warunków brzegowych dotyczących możliwych rozkładów sztywności, algorytm wykorzystujący jedynie postacie translacyjne nie pozwolił na wykrycie uszkodzeń w kolejnych stanach uszkodzenia.
- Do oszacowania spadków sztywności za pomocą postaci rotacyjnych wymagane jest zastosowanie jedynie pierwszej postaci drgań.
- W przypadku, gdy translacyjne postacie drgań zmierzono za pomocą odpowiednio gęstej sieci pomiarowej, z równo rozmieszczonymi czujnikami (warunek ten nie jest wymagany, lecz dzięki temu nie trzeba stosować dodatkowych interpolacji postaci), postać rotacyjną drgań można także obliczyć niezależnie z postaci translacyjnych za pomocą wzorów numerycznych. Tak obliczona postać rotacyjna może być jednak mniej dokładna niż bezpośrednio zmierzona. W analizowanym przypadku, otrzymane spadki sztywności za pomocą tak oszacowanych postaci rotacyjnych są zbliżone do spadków sztywności otrzymanych za pomocą bezpośrednio zmierzonych postaci rotacyjnych. Jednoczesne wykorzystanie bezpośrednio zmierzonych i obliczonych rotacji, poprawiło wyniki monitorowania poprzez redukcję liczby fałszywie wykrytych uszkodzeń.

W rozdziale 9 podsumowano wykonane badania i przedstawiono wnioski.

Podsumowując, moim zdaniem najważniejszymi oryginalnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi opisanymi w monografii są:

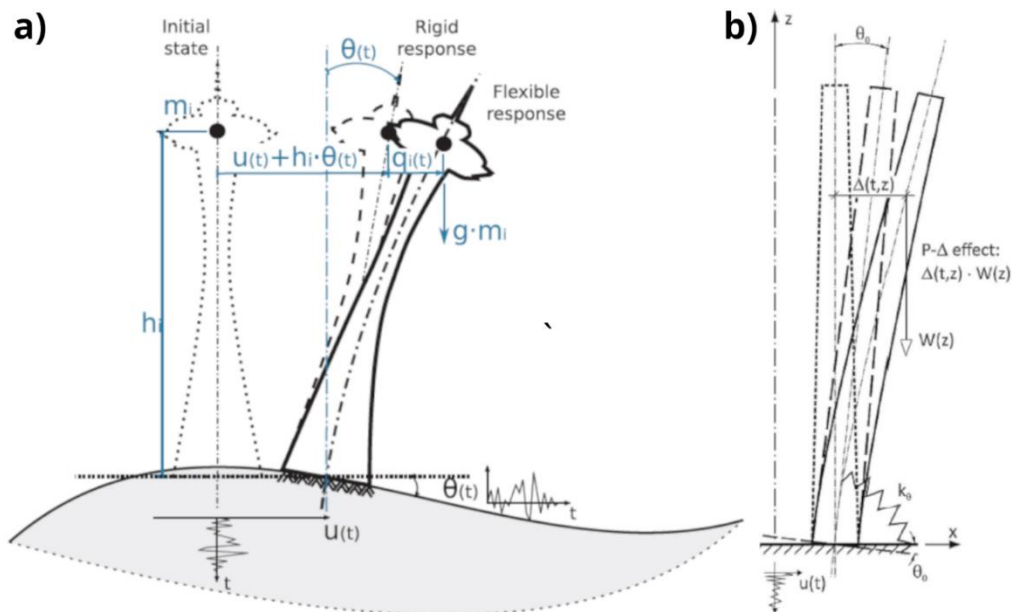
- Wykonanie szczegółowych przeglądów literaturowych z zakresu wykorzystania pochodnych postaci drgań w wykrywaniu uszkodzeń, wykorzystania pomiarów rotacji do monitorowania konstrukcji, metod monitorowania stanu konstrukcji żelbetowych.
- Numeryczna i eksperymentalna analiza wykorzystania pomiarów rotacji do identyfikacji dodatkowych mas w konstrukcji. Wykazanie, że korzystając z postaci rotacyjnych można poprawić dokładność lokalizacji masy.
- Wykonanie eksperymentalnych analiz wykorzystania pomiarów rotacji w monitorowaniu spadków sztywności uszkodzonych belek żelbetowych. Pokazanie, że pomiary rotacji poprawiają dokładność szacowania spadków sztywności.
- Zaproponowanie metody monitorowania spadków sztywności opartej na łącznym zastosowaniu bezpośrednio zmierzonych postaci rotacyjnych i obliczonych postaci rotacyjnych ze zmierzonych postaci translacyjnych.

Ponadto, wyniki przedstawione w monografii mogą być przydatne w projektowaniu i rozbudowie systemów monitorowania konstrukcji, zwłaszcza żelbetowych. Czujniki rotacji mogą być stosowane niezależnie od innych systemów pomiarów, lub mogą być stosowane wraz z innego typu czujnikami (np. akcelerometrami). Dzięki wykorzystaniu czujników rotacji, nie trzeba stosować tak gęstej sieci pomiarowych jak w przypadku pomiarów za pomocą jedynie akcelerometrów, a nawet uniknąć stosowania pracochłonnych systemów wykorzystujących włókna szklane i efekty pomiarowe z nimi związane (np. [2], [3]).

Swoje dalsze badania chciałbym poświęcić zastosowaniu jednoczesnych pomiarów translacji i rotacji w probabilistycznych metodach identyfikacji uszkodzeń, rozwojowi metod online korzystających z czujników rotacji, analizie wykorzystania czujników rotacji w monitorowaniu konstrukcji ramowych (szczególnie w monitorowaniu powstawania przegubu plastycznego), płytowych, czy elementów z istotnym wpływem odkształceń postaciowych, wykorzystaniem czujników rotacji w metodach monitorowania konstrukcji niewymagających bezpośredniego zastosowania modelu numerycznego analizowanej konstrukcji, a także poprawie szacunku spadków sztywności na obrzeżach badanych elementów.

b) Cykl pięciu publikacji dotyczący wpływów statycznych i dynamicznych rotacji podłoża na odpowiedź sejsmiczną smukłych konstrukcji budowlanych.

Rotacje podłoża, w postaci obrotów wokół poziomych osi, mogą znacząco wpływać na odpowiedź dynamiczną konstrukcji budowlanych. Efekt ten może być szczególnie istotny dla wysokich, smukłych konstrukcji w których wprost proporcjonalny do wysokości wpływ pochylenia jest dodatkowo potęgowany przez efekty P- Δ (Rys. 2). Można tu wyróżnić dwa zjawiska: statyczną i dynamiczną rotację podłoża.



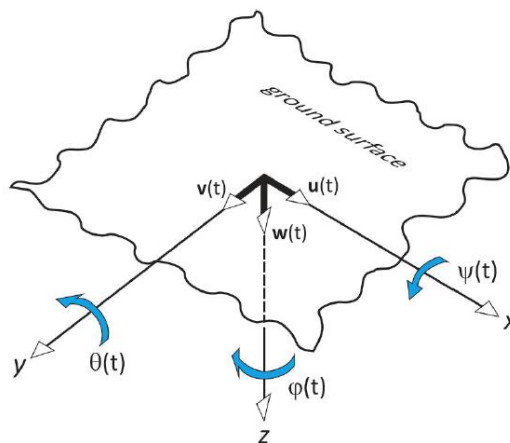
Rys. 2. Szkic ilustrujący wpływ a) dynamicznych rotacji [F] i b) statycznych rotacji z uwzględnieniem efektu P- Δ [D] na odpowiedź konstrukcji budowlanych

Statyczna rotacja podłoża i konstrukcji może być związana z nierównomiernym osiadaniem lub obniżeniem się terenu np. na terenach górniczych. W wyniku wstępnego pochylenia, w konstrukcji powstają dodatkowe naprężenia, które mogą modyfikować nieliniową odpowiedź konstrukcji na wymuszenie sejsmiczne.

Dynamiczna rotacja podłoża związana jest z efektami falowymi na powierzchni. Ruch dowolnego punktu podłoża można opisać za pomocą dwóch translacji wzdłuż osi poziomych, oraz translacji wzdłuż osi pionowej. W tradycyjnej inżynierii sejsmicznej konstrukcje budowlane analizuje się jako poddane jedynie tym trzem, translacyjnym składnikom trzęsienia ziemi. Jednak do powyższych trzech translacji można także dodać 3 rotacje wokół powyższych osi (Rys 3). Jeszcze w drugiej połowie XX wieku postulowano istotną rolę rotacji podłoża w sejsmicznej dynamice konstrukcji (np. [4]), jednak dopiero ostatnie publikacje specjalnych wydań czasopism Bulletin of the Seismological Society of America [5] i Journal of Seismology

[6] oraz Sensors [7], a także rozwój technologii czujników rotacyjnych, pozwoliły na szczególną intensyfikację badań w tym obszarze w niedawnym czasie.

Prowadzone przeze mnie badania dotyczą obydwu tych zjawisk i zostały zainicjowane jeszcze w mojej rozprawie doktorskiej a także opublikowane w czasopiśmie naukowych. Publikacje te, wyodrębnione przeze mnie jako drugie osiągnięcie wniosku habilitacyjnego, opisuję poniżej.



Rys. 3. Szkic ilustrujący translacyjne i rotacyjne składniki ruchu podłoża [E]

Ad. [F]: Bońkowski P.A., Zembaty Z., Minch M.Y., (2018). Time history response analysis of a slender tower under translational-rocking seismic excitations. *Engineering Structures*, vol. 155, 387-393.

W 2015 r. na górnym obszarze Górnego Śląska przeprowadzono kampanię pomiarową, której celem był, unikatowy w Polsce, pomiar sześciu składników (trzy translacje i trzy rotacje) wstrząsów górniczych. W jej wyniku zmierzono m.in. dwa wstrząsy górnicze, których intensywność w zmodyfikowanej skali Mercalliego wynosiła około IV. Powyższe dwa wstrząsy wykorzystałem do analizy wpływu rotacji podłoża na odpowiedź wysokich konstrukcji budowlanych. Jako analizowaną konstrukcję wybrano 160 m przemysłowy komin żelbetowy zaprojektowany głównie z uwagi na obciążenie wiatrem. W środowisku MATLAB wykonano model numeryczny MES komina korzystając z elementów skończonych typu belkowego. Następnie przeprowadzono analizę typu *time-history* odpowiedzi sejsmicznej komina na rotacje i odpowiadające im translacje. W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że wpływ wymuszenia rotacyjnego na odpowiedź wysokiego komina przemysłowego jest znaczący i sięga od 18% w górnej części komina do 65% w dolnej części

komina. Wyniki opublikowane w tym artykule zostały także przedstawione w mojej rozprawie doktorskiej. Artykuł ten powstał przy współpracy z moim promotorem i promotorem pomocniczym. Moim wkładem w powstanie artykułu była współpraca przy opracowaniu koncepcji badań, wykonanie przeglądu literaturowego, analiza zapisów wstrząsów górniczych, wykonanie modelu numerycznego, implementacja rotacji podłoża jako wymuszenie sejsmiczne, wykonanie analiz numerycznych, analiza wyników, wykonanie graficznej reprezentacji wyników analiz, współudział w edycji końcowej manuskryptu, współudział w dyskusji z anonimowymi recenzentami.

Ad. [E]: Bońkowski P.A., Zembaty Z., Minch M.Y., (2019). Engineering analysis of strong ground rocking and its effect on tall structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 116, 358-370.

W 2014 r. na Greckiej wyspie Kefalonia zainicjowano kampanie pomiarową w celu rejestracji wstrząsów wtórnych po trzęsieniu ziemi w tym przy użyciu czujnika prędkości rotacji. W ramach tej kampanii zarejestrowano między innymi dwa wstrząsy, których intensywność w zmodyfikowanej skali Mercalliego oszacowano na V i VII. Są to jedne z najbardziej intensywnych wstrząsów, dla których dostępne są wiarygodne zapisy translacyjno-rotacyjne. Po przeglądzie dostępnej bazy zapisów z Kefalonii, autorzy artykułu stwierdzili, że tak wysokie intensywności pozwalają być może potraktować translacyjno-rotacyjne zapisy niektórych z tych wstrząsów jak długo oczekiwane, wzorcowe rotacyjne zapisy wymuszeń sejsmicznych podobne do słynnego zapisu „El Centro”. Pozwoli to wykorzystać je jako benchmark translacyjno-rotacyjnych wpływów intensywnych wstrząsów na konstrukcje. W artykule [E] dokonano szczegółowej analizy wpływu zarejestrowanych rotacji na konstrukcje budowlane. W tym celu dokonano obróbki zapisów. Przetworzone zapisy zostały opublikowane w otwartej bazie danych [8]. Dla obróbianych zapisów obliczono spektra częstotliwościowe. Zauważono typowe dla rotacji przesunięcie spektrum w stronę wyższych częstotliwości względem odpowiadającym im zapisom translacyjnym. Dla zapisów obliczono także spektra odpowiedzi w tym rotacyjne spektra odpowiedzi. Z uwagi na zwiększony udział wyższych częstotliwości w przypadku zapisów rotacyjnych zauważono, że szczególnie narażonymi na rotacje konstrukcjami są te o krótkich okresach drgań własnych. W przeciwieństwie do wymuszenia translacyjnego, siły wywołane przez rotacje podłoża o danej charakterystyce są zależne, oprócz od częstotliwości drgań własnych konstrukcji, także od jej wysokości. W celu przeanalizowania tego efektu zaproponowano zastosowanie specjalnego translacyjno-rotacyjnego spektrum odpowiedzi. Spektrum te pozwala na obliczenie wpływu rotacji układów o jednym stopniu

swobody o różnych okresach drgań własnych i wysokości położenia masy. Analizując konstrukcje o typowych zależnościach pomiędzy wysokością a okresem drgań własnych, stwierdzono że wpływ rotacji na odpowiedź konstrukcji ma skomplikowany charakter. Rotacje mogą zarówno zwiększyć jak i zmniejszyć całkowitą odpowiedź konstrukcji. Ich wpływ może być istotny i sięgać nawet 30%. W dalszej części przeanalizowano wpływ rotacji podłoża na odpowiedź modelowych budynków: 10- i 30-piętrowego. Stwierdzono, że dla analizowanych konstrukcji wpływ rotacji dochodził do około 17%. W artykule porównano także wpływ zarejestrowanych rotacji z wpływem rotacji wg normy EN 1998-6 na wysoki komin żelbetowy. Stwierdzono, że dla analizowanych danych, wpływ rotacji wg normy jest nawet dwa razy większy od wpływu zarejestrowanych rotacji. Artykuł ten powstał przy współpracy z prof. Zbigniewem Zembatym i drem Maciejem Minchem. Moim wkładem w powstanie artykułu było wykonanie przeglądu literaturowego, pracochłonny przegląd zapisów bazy danych „Kefalonia”, znalezienie i opracowanie danych dotyczących zapisów drgań niezbędnych do wykonania analizy, współpraca przy opracowaniu koncepcji badań i w zakresie analizy zapisów normy EN 1998-6, wykonanie analizy spektrum odpowiedzi, w tym zaproponowanie specjalnego translacyjno-rotacyjnego spektrum odpowiedzi, wykonanie modeli i analiz numerycznych, analiza wyników, wykonanie graficznej reprezentacji wyników analiz, współudział w edycji końcowej manuskryptu, współudział w dyskusji z anonimowymi recenzentami.

Ad. [D]: Bońkowski P.A., Zembaty Z., Minch M.Y., (2019). Seismic effects on leaning slender structures and tall buildings. *Engineering Structures*, vol. 198, 109518.

Pochylenie konstrukcji może być spowodowane takimi czynnikami jak nierównomierne osiadanie, czy prace górnicze. W obydwóch przypadkach pochylone konstrukcje mogą być narażone na obciążenia dynamiczne takie jak wstrząsy górnicze, czy nawet naturalne trzęsienia ziemi. Analizując literaturę z obszaru pochylonych konstrukcji zauważono, że brak jest prac szczegółowo analizujących wpływ pochylenia na nieliniową odpowiedź wysokich, smukłych konstrukcji budowlanych. Z uwagi na to, że problem ten może być szczególnie istotny na terenie szkód górniczych, artykuł ten podjął próbę analizy wpływu wstrząsów górniczych na pochylone konstrukcje i wpływu pochylenia na osłabienie nośności konstrukcji poddanej obciążeniom naturalnej lub indukowanej sejsmiczności. W tym celu w programie Seismostruct bazującym na metodzie elementów skończonych wykonano nieliniowe modele dwóch konstrukcji żelbetowych: 160 m komina przemysłowego zaprojektowanego głównie z uwagi na obciążenie wiatrem i 30-piętrowego budynku biurowego zaprojektowanego z uwagi

na obciążenie sejsmiczne. Konstrukcje te zamodelowano uwzględniając różny stopień wstępnego pochylenia. W przypadku analizowanego komina żelbetowego stwierdzono, że zachowuje on sprężyste właściwości do pochylenia około 80 mm/m. Jest on także w stanie przenieść obciążenia związane wstrząsem górniczym o maksymalnej prędkości poziomej 54.3 cm/s (spodziewana maksymalna intensywność wstrząsów górniczych na terenie Polski) i pochyleniu 10 mm/m. Potwierdza to polskie zalecenia techniczne dotyczące tego typu obiektów na terenach górniczych. W przypadku obciążenia naturalnym trzęsieniem ziemi stwierdzono, że dla tego obiektu, duże pochylenia powodują wzrost sił wewnętrznych w dolnej części i spadek w górnej części (2/3 całkowitej wysokości) komina. W przypadku analizowanego budynku zauważono, że zachowuje on sprężyste właściwości do pochylenia około 20 mm/m. Dla tego pochylenia średnio intensywne trzęsienie nie powoduje zauważalnie nieliniowej odpowiedzi. Dla większych pochylenia, odpowiedź dynamiczna jest silnie nieliniowa. Artykuł ten powstał przy współpracy z moim promotorem i promotorem pomocniczym. Wyniki opublikowane w tym artykule zostały także częściowo przedstawione w mojej rozprawie doktorskiej. Moim wkładem w powstanie artykułu było wykonanie przeglądu literaturowego, współpraca przy opracowaniu koncepcji badań, zaprojektowanie modelowego budynku żelbetowego, wykonanie modeli i analiz numerycznych, analiza wyników, wykonanie graficznej reprezentacji wyników analiz, współudział w edycji końcowej manuskryptu, współudział w dyskusji z anonimowymi recenzentami.

Ad. [C]: Bońkowski P., Zembaty Z., Minch M.Y., (2020). Effect of soil compliance on seismic response of slender towers under rocking excitations, in: Köber D. et al. (eds.), *Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures III*. Springer, ISBN 978-3-030-33532-8, pp 3-10. Wyniki badań przedstawione w tej publikacji stanowią uzupełnienie wcześniejszych analiz [F]. W tej pracy wykonano analizę wpływu podatności podłoża na odpowiedź dynamiczną komina żelbetowego poddanemu translacyjno-rotacyjnemu wymuszeniu wstrząsem górniczym. W analizie użyto rzeczywistych zapisów translacyjno-rotacyjnych drgań podłoża. Podatność podłoża została zamodelowana w postaci sprężystej rotacyjnej podpory, której sztywność została oszacowana dla typowych warunków gruntowych wg normy EN 1998-1. W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że zwiększona podatność podłoża powoduje redukcje sił wewnętrznych w analizowanej konstrukcji. Większą redukcję zauważono dla wymuszenia składnikiem rotacyjnym niż dla wymuszenia składnikiem translacyjnym wstrząsu górniczego. Wyniki opublikowane w tej pracy zostały także przedstawione w mojej rozprawie doktorskiej. Publikacja powstała przy współpracy z moim

promotorem i promotorem pomocniczym. Moim wkładem w powstaniu publikacji było wykonanie przeglądu literaturowego, współpraca przy opracowaniu koncepcji badań, wykonanie modelu i analiz numerycznych, analiza wyników, wykonanie graficznej reprezentacji wyników analiz, współudział w edycji końcowej manuskryptu, współudział w dyskusji z anonimowymi recenzentami.

Ad. [B]: Bońkowski P.A., Kuś J. & Zembaty Z., (2021). Seismic rocking effects on a mine tower under induced and natural earthquakes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 21, 65.

Poprzednie analizy wpływu składnika rotacyjnego wstrząsów górniczych i trzęsień ziemi dotyczyły komina przemysłowego i budynku biurowego. Na terenach górniczych jednymi z bardziej typowych wysokich i smukłych budowli są wieże górnicze. W tej publikacji wykonano analizę wpływu składnika rotacyjnego wstrząsów górniczych i naturalnych trzęsień ziemi na odpowiedź dynamiczną stalowej wieży górniczej. W analizie użyto rzeczywistych zapisów translacyjno-rotacyjnych. Tak jak w przypadku analiz wcześniejszych konstrukcji zauważono skomplikowany wpływ składnika rotacyjnego wstrząsów górniczych i naturalnych trzęsień ziemi, który może zarówno zwiększać jak i redukować całkowite siły wewnętrzne w konstrukcji. Wpływ ten jest jednoznacznie znaczący. Przykładowo, składnik rotacyjny wstrząsu górniczego spowodował wzrost przemieszczeń wierzchołka o 135% względem wymuszenia nieuwzględniających rotacji podłoża, a w przypadku wymuszenia naturalnym trzęsieniem ziemi, składnik rotacyjny spowodował wzrost sił osiowych w wybranym elemencie o 23% względem wymuszenia nieuwzględniających rotacji podłoża. Stosunkowo duża różnica we wpływie składnika rotacyjnego pomiędzy wstrząsem górniczym a naturalnym trzęsieniem ziemi sugerują, że efekty rotacyjne mogą być bardziej istotne dla bliskiego pola falowego. Artykuł ten powstał przy współpracy z prof. Zbigniewem Zembatym i dr. Juliuszem Kusiem. Moim wkładem w powstanie artykułu było wykonanie przeglądu literaturowego, współpraca przy opracowaniu koncepcji badań, wykonanie modelu i analiz numerycznych, analiza wyników, wykonanie graficznej reprezentacji wyników analiz, współpraca w edycji końcowej manuskryptu, współudział w dyskusji z anonimowymi recenzentami.

Podsumowując, moim zdaniem najważniejszymi oryginalnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi opisanego cyklu publikacji są:

- Wykonanie analiz wpływu składnika rotacyjnego naturalnych trzęsień ziemi i wstrząsów górniczych na odpowiedź dynamiczną wybranych konstrukcji z wykorzystaniem rzeczywistych zapisów translacyjno-rotacyjnych drgań podłoża.
- Wykazanie, że dynamiczne rotacje podłoża istotnie wpływają na odpowiedź dynamiczną wysokich, smukłych konstrukcji budowlanych.
- Wykonanie analizy wpływu podatności podłoża na udział składnika rotacyjnego wstrząsów górniczych w odpowiedzi dynamicznej komina przemysłowego.
- Analiza wpływu wstępnego pochylenia wysokich, smukłych konstrukcji na ich odpowiedź dynamiczną od naturalnych trzęsień ziemi i wstrząsów górniczych.
- Porównanie otrzymanych wyników z zaleceniami technicznymi dotyczącymi obiektów posadowionych na terenie szkód górniczych w zakresie jednoczesnego wpływu pochylenia obiektów i wstrząsów górniczych.

Wyniki badań przedstawione w tym cyklu publikacji mogą zostać wykorzystane przy projektowaniu i weryfikacji nośności wysokich, smukłych obiektów, a w szczególności wstępnie pochylnych i na terenie szkód górniczych. Wyniki badań mogą być również przydatne przy przyszłej weryfikacji i aktualizacji normy EN 1998-6 w zakresie wpływu rotacji podłoża na konstrukcje. Przyszłe badania w tym obszarze powinny uwzględnić efekty dynamicznej rotacji podłoża na nieliniową odpowiedź budowli, analizę jednoczesnych wpływów statycznych i dynamicznych rotacji podłoża, a także wykonanie powyższych analiz ze szczegółowym uwzględnianiem interakcji podłoże-konstrukcja.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Moja dotychczasowa praca naukowa obejmuje także prace badawcze prowadzone we współpracy oraz w innych ośrodkach naukowych niezwiązanych z Politechniką Opolską.

- Moja praca naukowa rozpoczęła się w trakcie moich studiów magisterskich na Politechnice Wrocławskiej. W ramach prowadzonych działań w ramach pracy magisterskiej dotyczącej kształtowania konstrukcji budowlanych na terenach szkód

górnictw, której promotorem był dr Maciej Minch, opublikowałem rozdział w monografii pokonferencyjnej [9]. Jeszcze w trakcie studiów magisterskich, wraz z drem Maciejem Minchem prowadziłem badania nad wpływem wstrząsów górniczych i trzęsień ziemi na konstrukcje budowlane czego efektem są następujące prace: [10], [11]. Część prac została opublikowana już pod afiliacją Politechniki Opolskiej: [12]–[14]. Współpraca z drem Maciejem Minchem była także kontynuowana w ramach prac nad moją rozprawą doktorską, której dr Maciej Minch był promotorem pomocniczym, a także w ramach innych prac związanych z wpływem składowa rotacyjnego na konstrukcje budowlane. W ramach tej współpracy powstały następujące publikacje [C]–[F], [15]–[17] i baza danych [8]. Wraz z drem Maciejem Minchem analizowałem także inne zagadnienia inżynierskie [18]. Jestem także współautorem wraz z drem Maciejem Minchem, licznych niewymienionych tutaj referatów konferencyjnych.

- W obszarze pomiarów rotacji i wykorzystania ich w monitorowaniu konstrukcji współpracuję z drem Felixem Bernauerem z Ludwig-Maximilians Universität München (Niemcy). W ramach tej współpracy w 2019 r. brałem udział w kilkudniowym eksperymencie mającym na celu porównanie czujników rotacji i odkształceń. Eksperyment ten odbył się na terenie obserwatorium geofizycznego Ludwig-Maximilians Universität München w miejscowości Fürstfeldbruck w Niemczech. Efektem tego eksperymentu jest poster na międzynarodowej konferencji naukowej EGU2020 oraz publikacja [19]. W 2022 r. na zaproszenie dra Felixa Bernauera wygłosiłem referat na seminarium Special Topics in Seismology for the Department of Earth and Environmental Sciences w LMU Munich dotyczący wykorzystania rotacji w monitorowaniu konstrukcji. Ponadto, wraz z Felixem Bernauerem zostałem zaproszony do wygłoszenia wspólnego referatu dotyczących wpływu rotacji na konstrukcje budowlane podczas specjalnej sesji na najbliższej światowej konferencji sejsmicznej WCEE2024 w Mediolanie we Włoszech.
- W 2022 r. zrealizowałem miesięczny wyjazd, w ramach stypendium START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, do Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) w University of Grenoble-Alpes w Grenoble we Francji. Pobyt został zrealizowany po uzyskaniu zaproszenia przez dra Philippe Gueguena. Celem wyjazdu było nawiązanie współpracy z drem Philippe Gueguenem, zapoznanie się badaniami prowadzonymi przez niego i konsultacja swoich problemów badawczych. W trakcie mojego pobytu rozpocząłem badania nad wykorzystaniem zmierzonych rotacji do analizy zjawiska interakcji podłoże-konstrukcja – w tym celu wykorzystano dane pomiarowe z systemu

monitoringu ratusza w Grenoble (patrz także [20]). Z uwagi na poziom skomplikowania wykonywanych analiz, prace te są nadal prowadzone. W trakcie wyjazdu wygłosiłem również referat podczas seminarium związanego z projektem *URBASIS-EU New challenges for Urban Engineering Seismology* (<https://urbasis-ezvu.osug.fr/URBASIS-Training-Course-Building-Seismic-Monitoring>). Seminarium było ogólnodostępne online. Planowana jest dalsza kontynuacja współpracy z drem drem Philippe Gueguenem dotycząca interakcji podłoże-konstrukcja i zjawisk rotacyjnych.

- Niezależnie z opisanymi wcześniej głównymi nurtami moich zainteresowań naukowych, prowadzę współpracę z dr Katalin Gribovszki z Earth Physics and Space Science (Eotvos Lorand Research Network) w Sopronie na Węgrzech. Celem współpracy jest pomoc w weryfikacji długofalowego ryzyka sejsmicznego na podstawie analizy wrażliwości na wymuszenia sejsmicznych bardzo smukłych stalagmitów. Zagadnienia te należą do tzw. paleosejsmologii i pomagają m.in. w ustalaniu norm projektowania szczególnie odpowiedzialnych budowli np. elektrowni jądrowych. W ramach tej współpracy wykonano szczegółowy model MES smukłego stalagmitu, którego geometria 3D została zmierzona za pomocą skanera laserowego. Dzięki takiemu podejściu możliwe było dużo dokładniejsze oszacowanie sejsmicznej wrażliwości tego wrażliwego obiektu w porównaniu do dotychczas wykorzystywanych metod. Dotychczasowym efektem tych analiz jest artykuł w *Journal of Earthquake Engineering* [21], promotorstwo obronionej pracy magisterskiej, otwarta baza danych [22] i dwa referaty na międzynarodowych konferencjach naukowych. W maju 2023 r. uczestniczyłem w pomiarach drgań prowadzonych w jaskini Plavecká Priepast w Słowacji w celu wykonania dalszych analiz wrażliwości sejsmicznej smukłych stalagmitów (Rys. 4).
- Jestem także współautorem wniosku grantowego w ramach konkursu NCN Sheng. W ramach tego konkursu planowana była współpraca z prof. Jianwen Liang z Tianjin University dotycząca monitorowania online stanu konstrukcji żelbetowych. Wniosek nie uzyskał finansowania a pojawienie się pandemii wstrzymało dalszą planowaną współpracę w tym zakresie.



Rys. 4. Zdjęcie jaskini Plavecká Priepast w Słowacji w której prowadziłem pomiary drgań stalagmitów

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

a. Osiągnięcia dydaktyczne

Jako nauczyciel akademicki prowadziłem, lub prowadzę zajęcia na Politechnice Opolskiej z następujących kursów na kierunku Budownictwo I-go stopnia: Technologia informacyjna (laboratorium), Mechanika Teoretyczna I (wykład), Mechanika Teoretyczna II (wykład i projekt), Konstrukcje betonowe 1 (projekt), Konstrukcje betonowe 2 (projekt), Komputerowe wspomaganie projektowania (laboratorium); oraz następujące kursy na kierunku Budownictwo II-go stopnia: Programowanie metod numerycznych w Matlabie (Wykład i projekt), Betonowe budowie specjalne (projekt); prowadziłem także następujący kurs w języku angielskim dla studentów ERASMUS+: Introduction to Seismic Engineering.

Byłem promotorem **3 prac inżynierskich** i **4 prac magisterskich**.

Byłem promotorem pomocniczym **2 zakończonych prac doktorskich**:

- 2018-2023. Przewód doktorski dra inż. Marka Nalepki pt.: *Nieliniowa, dynamiczna identyfikacja uszkodzonej konstrukcji żelbetowej*, promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Zembaty.

- 2018-2021. Przewód doktorski dra inż. Tomasza Maleski pt.: *Wpływ wstrząsów sejsmicznych na mosty gruntowo-stalowe*, promotor: dr hab. inż. Damian Bęben.

Zostałem powołany na promotora pomocniczego **2 prowadzonych rozpraw doktorskich**:

- 2023. Rozprawa doktorska mgra inż. Łukasza Huras pt.: *Zastosowanie pomiarów rotacyjnych zginanych belek i układów ramowych w ocenie ich uszkodzeń*.
- 2023. Rozprawa doktorska mgra inż. Piotr Bobry pt.: *Identyfikacja i analiza modalna drewnianej konstrukcji ramowej podczas postępujących uszkodzeń*.

b. Osiągnięcia organizacyjne

W latach 2017-2018 pełniłem stanowisko **przewodniczącego Wydziałowej Rady Doktorantów** Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej, a także **członka Rady Wydziału** Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej z ramienia doktorantów, w tych latach byłem także członkiem **Wydziałowej Rady ds. jakości kształcenia**. W 2020 r. zostałem wybrany do **Wydziałowego Kolegium Elektorów** z grupy pozostałych nauczycieli akademickich.

c. Osiągnięcia popularyzujące naukę lub sztukę

W trakcie swojej pracy zawodowej staram się popularyzować naukę, szczególnie wśród dzieci i młodzieży.

- W ramach tej działalności 15.01.2022 r. wraz z mgrem inż. Piotrem Bobrą wygłosiłem wykład dla Dziecięcej Politechniki Opolskiej pt.: *Wszystko się rusza, czyli o pomiarach drgań budowli*: <https://po.edu.pl/galeria-zdjec/dziecieca-politechnika-opolska-wyklad-dr-inz-piotr-bonkowski-i-mgr-inz-piotr-bobra-pt-wszystko-sie-rusza-czyli-o-pomiarach-drgan-budowli-15-stycznia-2022-r/>.
- Wraz z mgrem inż. Piotrem Bobrą 08.04.2022 r. nagrałem odcinek *Politechniki Dziecięcej* dla TVP3: <https://opole.tvp.pl/59530686/politechnika-dziecieca-wydzial-budownictwa-i-architektury-zobacz-program>.
- Na platformie YouTube dostępny jest także film promujący wykonywane przeze mnie badania: <https://youtu.be/5RE6UH-G78A>.
- Wygłosiłem także referat podczas seminarium związanego z projektem *URBASIS-EU New challanges for Urban Engineering Seismology* (<https://urbasis-ezwo.osug.fr/URBASIS-Training-Course-Building-Seismic-Monitoring>). Seminarium było ogólnodostępne online.

7. Inne informacje, ważne z mojego punktu widzenia, dotyczące mojej kariery zawodowej.

a. Pozostałe publikacje związane z wykorzystaniem czujników rotacji

Publikacjami blisko powiązаныmi z wykazanyą osiągnięciem dotyczącą wykorzystania czujników rotacji w monitorowaniu stanu konstrukcji są także prace [23]–[26].

W pracy [23] wykonano eksperymentalną analizę możliwości oceny wielkości uszkodzenia na podstawie różnicy w rotacji dwóch przyległych punktów. W tym celu przebadano belkę plexi, którą stopniowo uszkadzano poprzez wywieranie otworów. W każdym stanie uszkodzenia belkę poddano drganiom diagnostycznym. Drgania zostały zmierzone za pomocą profesjonalnych oraz tanich czujników prędkości rotacji typu MEMS. W pracy przetestowano trzy indeksy uszkodzeń oparte na pomiarach rotacji. W pracy wykazano, że korzystając z pomiarów rotacji można wykryć uszkodzenie związane ze spadkiem równym 0.62% sztywności giętej elementu na odcinku pomiędzy czujnikami.

W artykule [24] przedstawiono wyniki z analizy modalnej belek UHPC, które były dalej analizowane w wykazanej jako osiągnięcie monografii. W analizie modalnej wykorzystano zarówno akcelerometry jak i czujniki prędkości rotacji. Podczas eksperymentalnej analizy modalnej wykorzystano wymuszenie młotkiem modalnym i dynamicznym wzbudnikiem drgań. W wykazanej monografii wyniki pomiarów z wykorzystaniem wzbudnika drgań zostały pominięte. W pracy porównano postacie rotacyjne belek otrzymane bezpośrednio z wykorzystaniem czujników rotacji oraz obliczone numerycznie korzystając z postaci translacyjnych. Wykazano zauważalną różnicę pomiędzy dwoma metodami. Dodatkowo w pracy zweryfikowano możliwość pomiarów uśrednionych odkształceń za pomocą czujników prędkości rotacji.

W publikacji [25] wykonano numeryczną analizę możliwości wykorzystania pomiarów rotacji do monitorowania powstawania przegubu plastycznego w konstrukcji ramowej. W tym celu wykonano w programie SAP2000 nieliniowy model numeryczny konstrukcji ramowej. Model ten poddano kinematycznemu wymuszeniu średnio intensywnemu trzęsieniu ziemi El Centro. Jako parametr uszkodzenia wykorzystano różnice w rotacji elementów w przekrojach przyległych do monitorowanego węzła. Wykazano, że zarówno sama różnica rotacji jak również transformacja falkowa różnicy rotacji wyraźnie informuje o powstawaniu przegubu plastycznego w monitorowanym narożu ramy.

W pracy [26] przedstawiono wyniki eksperymentalnej analizy możliwości zastosowania czujników prędkości rotacji do pomiarów odkształceń podczas drgań konstrukcji. Badania

zostały przeprowadzone na belce plexi. Odształcenia obliczone na podstawie różnicy rotacji w dwóch przyległych przekrojach porównano z odształceniami zmierzonym za pomocą tensometrów. Różnica pomiędzy dwoma metodami wyniosła około 3%. Dodatkowo w ramach badań belka została uszkodzona poprzez nawiercenie otworów redukujących sztywność giętą przekroju o 20%. Po uszkodzeniu, belka została poddana temu samemu wymuszeniu co belka nieuszkodzona. Wykazano, że otrzymana różnica rotacji obliczona dla dwóch przyległych czujników pomiędzy belką nieuszkodzoną i uszkodzoną wynosi około 10%

b. Podsumowanie dotyczące publikacji, konferencji, otwartych baz danych, recenzji i ekspertyz

Łącznie jestem autorem lub współautorem **11 artykułów** w czasopiśmie indeksowanych przez **JCR**, **7 artykułów** w pozostałych czasopiśmie, **1 monografii** i **5 rozdziałów** w monografiach. Według bazy Web of Science na dzień 29.05.2023, moje prace posiadają 93 cytowania (80 z wyłączeniem autocytowań), mój indeks Hirscha wynosi $H = 5$, a sumaryczny Impact Factor obliczony dla wskaźnika wg roku publikacji wynosi $IF = 32.218$.

Jestem także autorem lub współautorem **23 referatów** i **3 posterów** przedstawionych na konferencjach międzynarodowych i krajowych. Jestem autorem **2 otwartych baz danych** [8], [22]. Jestem autorem **44 recenzji** artykułów naukowych i **recenzji 2 referatów** konferencyjnych. Swoje doświadczenie dotyczące dynamiki konstrukcji i konstrukcji żelbetowych wykorzystuję realizując ekspertyzy techniczne. Dotychczas zrealizowałem **5 ekspertyz**.

c. Informacja dotycząca aplikacji o finansowanie zewnętrzne badań i kierowania pracami badawczymi

Aktywnie aplikuję o dofinansowanie zewnętrzne:

- W 2020 r. otrzymałem grant wyjazdowy przyznany przez Seismological Society of America na dofinansowanie udziału na konferencji 17th World Conference on Earthquake Engineering w Sendai w Japonii. Ze względu na pandemię Covid-19 na konferencji uczestniczyłem on-line.
- W 2020 r. otrzymałem finansowanie przez Dutch Earthquake Engineering Association na udział w konferencji 22nd European Regional Seminar Induced Seismicity due to Human Activities w Groningen w Niderlandach. Ze względu na pandemię Covid-19 termin konferencji został zmieniony. Odbyła się ona 23-26.05.2023 r.

- W 2020 r. pełniłem funkcję kierownika projektu finansowania badań naukowych w ramach rozwoju młodych naukowców ze środków finansowych przeznaczonych na rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa i transport na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej. Projekt dotyczył sfinansowanie kosztów udziału w konferencji The 7th European Conference on Structural Control (EACS 2020).
- **W latach 2019-2020 pełniłem funkcję kierownika grant NCN MINIATURA 2 pod tytułem *Monitorowanie własności dynamicznych uszkodzonych belek z betonu wysokowartościowego poprzez obserwacje rotacji ich osi*. Nr projektu: 2018/02/X/ST8/02950.**
- W 2018 r. pełniłem funkcję kierownika projektu badawczego z Dotacji na prowadzenie w 2018 r. badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej w 2018 r. Grant NBS DS – MN/42/WBiA/18 pt.: Sfinansowanie kosztów udziału w piątych warsztatach IWGoRS (International Working Group on Rotational Seismology).
- W 2018 r. pełniłem funkcję kierownika projektu w ramach programu „Grant Dziekana” wspierającego młodych naukowców/doktorantów Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej wykazujących się znaczącą aktywnością publikacyjną/patentową. Grant NBS 90/18 pt.: Badanie wpływu składników rotacyjnego trzęsienia ziemi na odpowiedź dynamiczną konstrukcji budowlanych.
- W latach 2016-2017 pełniłem funkcję kierownika projektu badawczego z Dotacji na prowadzenie badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej w 2016 r. Grant NBS DS - MN/31/WB/17 pt.: Badanie nieliniowej dynamiki wstępnie pochylonych konstrukcji żelbetowych na obciążenia sejsmiczne i parasejsmiczne.

d. Nagrody, wyróżnienia i stypendia

Moja praca była wielokrotnie nagradzana. Dotychczas otrzymałem następujące nagrody i wyróżnienia i stypendia:

- **2022 – 2023. Stypendium START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej.**

- **2022. Zwiększenie stypendium START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej o stypendium wyjazdowe.**
- 2022. Nagroda Rektora Politechniki Opolskiej dla nauczycieli akademickich za inne osiągnięcia.
- **2021 – 2024. Stypendium Ministra Edukacji i Nauki dla wybitnego młodego naukowca.**
- 2020. Nagroda Rektora Politechniki Opolskiej. Nagroda indywidualna za wysoko punktowane osiągnięcia naukowe.
- 2020, 2021, 2022. Nagrody Rektora Politechniki Opolskiej. Nagrody projakościowe.
- 2019. Nagroda III stopnia Rektora Politechniki Opolskiej dla nauczycieli akademickich za inne osiągnięcia.
- 2019, 2018. Nagroda III stopnia Rektora Politechniki Opolskiej dla nauczycieli akademickich za działalność naukową.
- 2018. Nagroda za wyróżniające wyniki w nauce Samorządu Doktorantów Politechniki Opolskiej.
- **2018. Wyróżnienie rozprawy doktorskiej przez Radę Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej.**
- 2017/2018, 2016/2017. Stypendium dla najlepszych doktorantów Politechniki Opolskiej.
- 2017/2018, 2016/2017. Zwiększenie stypendium doktoranckiego ze względu na wysoki poziom prowadzonych badań i wyniki podczas studiów doktoranckich.

e. Udział w szkoleniach

Aktywnie podnoszę swoje kompetencje zawodowe. W 2022 r. uczestniczyłem w 5-dniowym kursie **Propagation of mechanical waves in deformable solids and meta-materials** w Pawii we Włoszech organizowanym przez Uniwersytet w Pawii; 1-dniowym szkoleniu online **FEMA P-2018, Seismic Evaluation of Older Concrete Buildings for Collapse Potential** organizowanym przez the Applied Technology Council (ATC) for the Federal Emergency Management Agency (FEMA); 1-dniowym szkoleniu online **Narodowe Centrum Nauki: Szkolenie dla wnioskodawców**; szkoleniu e-learningowym **korupcja w administracji publicznej** organizowanym przez Centralne Biuro Antykorupcyjne. Ukończyłem także następujące tzw. *self-paced courses* z oprogramowania MATLAB i Simulink:

- MATLAB Fundamentals.

- Introduction to Linear Algebra with MATLAB.
- Introduction to Statistical Methods with MATLAB.
- Introduction to Symbolic Math with MATLAB.
- Machine Learning with MATLAB.
- MATLAB for Data Processing and Visualization.
- MATLAB Programming Techniques.
- Signal Processing Onramp.
- Solving Nonlinear Equations with MATLAB.
- Solving Ordinary Differential Equations with MATLAB.
- Simulink Onramp.

f. Członkostwo w organizacjach

Aktualnie jestem członkiem **Polskiej Grupy Inżynierii Sejsmicznej i Parasejsmicznej** oraz **Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa**. Aktywnie uczestniczę w rozwoju czasopism naukowych. Pełnię rolę **Topic Editor** w czasopiśmie MDPI *Sustainability* oraz jestem członkiem **Reviewer board** w czasopiśmie MDPI *Energies*.

Bibliografia

- [A] P. A. Bońkowski, *Application of Rotation Rate Sensors for Structural Health Monitoring of Reinforced Concrete Beams*. Opole: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2023.
- [B] P. A. Bońkowski, J. Kuś, i Z. Zembaty, „Seismic rocking effects on a mine tower under induced and natural earthquakes”, *Archiv.Civ.Mech.Eng*, t. 21, nr 2, s. 65, maj 2021, doi: 10.1007/s43452-021-00221-7.
- [C] P. Bonkowski, Z. Zembaty, i M. Y. Minch, „Effect of Soil Compliance on Seismic Response of Slender Towers Under Rocking Excitations”, w *Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures III*, D. Köber, M. De Stefano, i Z. Zembaty, Red., w Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 3–9. doi: 10.1007/978-3-030-33532-8_1.
- [D] P. A. Bońkowski, Z. Zembaty, i M. Y. Minch, „Seismic effects on leaning slender structures and tall buildings”, *Engineering Structures*, t. 198, s. 109518, lis. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109518.
- [E] P. A. Bońkowski, Z. Zembaty, i M. Y. Minch, „Engineering analysis of strong ground rocking and its effect on tall structures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, t. 116, s. 358–370, sty. 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2018.10.026.
- [F] P. A. Bońkowski, Z. Zembaty, i M. Y. Minch, „Time history response analysis of a slender tower under translational-rocking seismic excitations”, *Engineering Structures*, t. 155, s. 387–393, sty. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.11.042.
- [1] J. Maeck *i in.*, „Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination”, *Engineering Structures*, t. 22, nr 10, s. 1339–1349, paź. 2000, doi: 10.1016/S0141-0296(99)00074-7.
- [2] Y. Goldfeld i A. Klar, „Damage Identification in Reinforced Concrete Beams Using Spatially Distributed Strain Measurements”, *Journal of Structural Engineering*, t. 139, nr 12, grudz. 2013, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000795.

- [3] D. Anastasopoulos, M. De Smedt, L. Vandewalle, G. De Roeck, i E. P. B. Reynders, „Damage identification using modal strains identified from operational fiber-optic Bragg grating data”, *Structural Health Monitoring*, t. 17, nr 6, s. 1441–1459, lis. 2018, doi: 10.1177/1475921717744480.
- [4] J. E. Luco i D. A. Sotiropoulos, „Local characterization of free-field ground motion and effects of wave passage”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, t. 70, nr 6, s. 2229–2244, 1980.
- [5] W. H. K. Lee, M. Celebi, M. I. Todorovska, i H. Igel, „Introduction to the Special Issue on Rotational Seismology and Engineering Applications”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, t. 99, nr 2B, s. 945–957, maj 2009, doi: 10.1785/0120080344.
- [6] H. Igel, J. Brokesova, J. Evans, i Z. Zembaty, „Preface to the special issue on advances in rotational seismology: instrumentation, theory, observations and engineering”, *Journal of Seismology*, t. 16, nr 4, s. 571–572, paź. 2012, doi: 10.1007/s10950-012-9307-6.
- [7] Z. Zembaty, F. Bernauer, H. Igel, i K. U. Schreiber, „Rotation Rate Sensors and Their Applications”, *Sensors*, t. 21, nr 16, s. 5344, sie. 2021, doi: 10.3390/s21165344.
- [8] P. Bońkowski, Z. Zembaty, i M. Minch, „6-dof strong ground motion data records from Kefalonia Island (November 8th 2014, MMI = VII and November 17th 2015, MMI = V)”. Mendeley, 15 grudzień 2018. doi: 10.17632/n3tgfn7xj8.1.
- [9] P. Bońkowski, „Wybrane problemy obliczania oddziaływań dynamicznych obiektów posadowionych na terenach szkód górniczych”, w *Konferencja Studentów i Doktorantów Wydziałów Budownictwa KONstruktor2015*, T. Trapko, M. Musiał, i W. Pawlak, Red., Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2015, s. 275–283.
- [10] P. Bońkowski i M. Y. Minch, „Wpływ nieregularności bryły budynku na siły wewnętrzne wywołane wstrząsami górniczymi”, *MATERIAŁY BUDOWLANE*, t. 1, nr 6, s. 58–59, cze. 2015, doi: 10.15199/33.2015.06.19.
- [11] P. Bońkowski i M. Y. Minch, „Analiza efektu P-Delta w zbiornikach wieżowych z jednym stopniem swobody zlokalizowanych na obszarach sejsmicznych”, *MATERIAŁY BUDOWLANE*, t. 1, nr 9, s. 46–47, wrz. 2015, doi: 10.15199/33.2015.09.12.
- [12] P. Bońkowski i M. Y. Minch, „Analiza wyteżenia fundamentu ramowego pod zespół turbowentylatorów od obciążeń parasejsmicznych”, *MATERIAŁY BUDOWLANE*, t. 1, nr 5, s. 5–6, maj 2016, doi: 10.15199/33.2016.05.01.
- [13] P. Bońkowski i M. Y. Minch, „Analiza prostopadłościennego żelbetowego zbiornika poddanego wstrząsowi górniczemu”, *MATERIAŁY BUDOWLANE*, t. 1, nr 9, s. 80–81, wrz. 2016, doi: 10.15199/33.2016.09.29.
- [14] P. Bońkowski i M. Y. Minch, „Selected problems relating to structural calculations of buildings located in mining areas in terms of preventive protection”, *Czasopismo Techniczne*, t. 2016, nr Budownictwo Zeszyt 3-B (9) 2016, s. 3–13, grudz. 2016, doi: 10.4467/2353737XCT.16.207.5956.
- [15] P. Bońkowski, Z. Zembaty, i M. Y. Minch, „Analiza komina żelbetowego poddanego rotacyjnemu składnikowi wstrząsu górniczego”, *Materiały Budowlane*, t. nr 6, 2017, Dostęp: 6 październik 2017. [Online]. Dostępne na: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2675116b-73f5-4ed3-9a8c-57fcffa66f34>
- [16] P. Bońkowski, Z. Zembaty, i M. Y. Minch, „Nieliniowa analiza komina żelbetowego pod obciążeniem sejsmicznym z uwzględnieniem wstępnego pochylenia”, *Materiały Budowlane*, t. 1, nr 5, s. 34–35, maj 2016, doi: 10.15199/33.2016.05.14.
- [17] P. Bońkowski, Z. Zembaty, i M. Y. Minch, „Nonlinear interaction of initial leaning of r/c slender tower with its seismic response”, zaprezentowano na Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, SEMC 2016, 2016, s. 303–308.
- [18] M. Y. Minch i P. A. Bońkowski, „Awaria ściany reaktorów służących do przetwarzania biologicznego odpadów”, w *Awarie budowlane : zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje : monografia*, M. Kaszyńska, Red., Szczecin: Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, 2017, s. 815–826.
- [19] F. Bernauer i in., „Rotation, Strain, and Translation Sensors Performance Tests with Active Seismic Sources”, *Sensors*, t. 21, nr 1, s. 264, sty. 2021, doi: 10.3390/s21010264.
- [20] P. Guéguen, F. Guattari, C. Aubert, i T. Laudat, „Comparing Direct Observation of Torsion with Array-Derived Rotation in Civil Engineering Structures”, *Sensors*, t. 21, nr 1, Art. nr 1, sty. 2021, doi: 10.3390/s21010142.

- [21] Z. Zembaty, P. A. Bońkowski, M. A. Jaworski, i K. Gribovski, „Seismic Vulnerability of a Slender Stalagmite”, *Journal of Earthquake Engineering*, s. 1–20, luty 2022, doi: 10.1080/13632469.2022.2033356.
- [22] P. A. Bońkowski, „Seismic Vulnerability of a Slender Stalagmite - Dataset”. Mendeley, 10 styczeń 2022. doi: 10.17632/8BZGD3VCSV.1.
- [23] L. Huras, Z. Zembaty, P. A. Bońkowski, i P. Bobra, „Quantifying local stiffness loss in beams using rotation rate sensors”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, t. 151, s. 107396, kwi. 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107396.
- [24] P. A. Bońkowski, P. Bobra, Z. Zembaty, i B. Jędraszak, „Application of Rotation Rate Sensors in Modal and Vibration Analyses of Reinforced Concrete Beams”, *Sensors*, t. 20, nr 17, s. 4711, sie. 2020, doi: 10.3390/s20174711.
- [25] Ł. Huras, P. Bońkowski, M. Nalepka, S. Kokot, i Z. Zembaty, „Numerical analysis of monitoring of plastic hinge formation in frames under seismic excitations”, *Journal of Measurements in Engineering*, t. 6, nr 4, s. 190–195, grudz. 2018, doi: 10.21595/jme.2018.20410.
- [26] Z. Zembaty, P. Bobra, P. A. Bońkowski, S. Kokot, i J. Kuś, „Strain sensing of beams in flexural vibrations using rotation rate sensors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, t. 269, s. 322–330, sty. 2018, doi: 10.1016/j.sna.2017.11.051.

.....

(podpis wnioskodawcy)