

## Załącznik 3

### Autoreferat dotyczący działalności naukowo-badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej

#### Zawartość:

1.	Imię i nazwisko	str. 1
2.	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	str. 1
3.	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	str. 1
4.	Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki	str. 1
4.a.	Tytuł osiągnięcia naukowego	str. 1
4.b.	Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego	str. 1
4.c.	Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	str. 2
5.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych	str. 11
6.	Działalność dydaktyczna	str. 16
7.	Działalność organizacyjna, współpraca naukowa i popularyzacja nauki	str. 17

## 1. Imię i nazwisko

Jerzy Bobiński

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

1. 01.10.1992-18.12.1997. Magister inżynier, kierunek: budownictwo, zakres: konstrukcje budowlane i inżynierskie. Politechnika Gdańska, Wydział Budownictwa Lądowego.
2. 02.10.1995-15.02.1999. Licencjat, kierunek: matematyka, zakres: informatyka. Uniwersytet Gdański, Wydział Matematyki i Fizyki.
3. 20.12.2006. Doktorat, dziedzina: nauki techniczne, dyscyplina: budownictwo. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska. Tytuł rozprawy: Implementacja i przykłady zastosowań nieliniowych modeli betonu z nielokalnym osłabieniem. Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Jacek Tejchman-Konarzewski. Recenzenci: prof. dr hab. inż. Zenon Mróz, prof. dr hab. inż. Jacek Chróścielewski.

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1. 01.01.1999-31.01.2007: Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska – asystent (pełny etat).
2. 01.02.2007-31.01.2015: Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska – adiunkt (pełny etat).
3. od 01.02.2015: Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska – starszy wykładowca (pełny etat).

## 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki

### a. Tytuł osiągnięcia naukowego

Numeryczne modelowanie rys w betonie przy zastosowaniu podejścia ciągłego, nieciągłego i połączonego

### b. Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

1. Marzec I., **Bobiński J.**, Tejchman J., 2007. Simulations of spacing of localized zones in reinforced concrete beams using elasto-plasticity and damage mechanics with non-local softening. *Computers and Concrete*, 4(5), 377-402.
2. Majewski T., **Bobiński J.**, Tejchman J., 2008. FE analysis of failure behaviour of reinforced concrete columns under eccentric compression. *Engineering Structures*, 30(2), 300-317.
3. **Bobiński J.**, Tejchman J., 2010. Continuous and discontinuous modeling of cracks in concrete elements. *Computational Modelling of Concrete Structures, Proceedings of the EURO-C 2010 Conference, Rohrmoos/Schladming, Austria, 263-270, CRC Press, Taylor and Francis Group.*

4. Syroka E., **Bobiński J.**, Tejchman J., 2011. FE analysis of reinforced concrete corbels with enhanced continuum models. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(9), 1066-1078.
5. **Bobiński J.**, Tejchman J., 2011. Simulations of fracture in concrete elements using continuous and discontinuous models. *Mechanics and Control*, 30(4), 183-193.
6. **Bobiński J.**, Tejchman J., 2012. Application of eXtended Finite Element Method to cracked concrete elements – numerical aspects. *Archives of Civil Engineering*, 58(4), 409-431.
7. Marzec I., Skarżyński Ł., **Bobiński J.**, Tejchman J., 2013. Modelling reinforced concrete beams under mixed shear-tension failure with different continuous FE approaches. *Computers and Concrete*, 12(5), 585-612.
8. **Bobiński J.**, Tejchman J., 2014. A constitutive model for concrete based on continuum theory with non-local softening coupled with eXtended Finite Element Method. *Computational Modelling of Concrete Structures, Proceedings of the EURO-C 2014 Conference, St. Anton am Arlberg, Austria, Vol. 1*, 117-126, CRC Press, Taylor and Francis Group.
9. **Bobiński J.**, Tejchman J., 2014. Numeryczne modelowanie betonu niezbrojonego dla mieszanego rodzaju zniszczenia przy zastosowaniu podejścia ciągłego i nieciągłego. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, (5), 536-542.
10. **Bobiński J.**, Tejchman J., 2016. Comparison of continuous and discontinuous constitutive models to simulate concrete behaviour under mixed-mode failure conditions. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 40(3), 406-435.
11. **Bobiński J.**, Tejchman J., 2016. A coupled constitutive model for fracture in plain concrete based on continuum theory with non-local softening and eXtended Finite Element Method. *Finite Elements in Analysis and Design*, 114, 1-21.

**c. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

Powstawanie rys jest jedną z najbardziej istotnych cech betonu. Odpowiada ono za spadek sztywności i wytrzymałości oraz poprzedza zniszczenie elementu bądź całej konstrukcji. Na początku tworzy się cienka strefa mikrorys zwana strefą pękania (*ang. fracture process zone – FPZ*). Wraz ze wzrostem deformacji powstaje jedna dyskretna makrorysa. Wybór opisu zarysowania (pękania) w obliczeniach numerycznych jest niezwykle ważne dla uzyskania poprawnych, zgodnych z rzeczywistością wyników.

Istnieją dwa zasadnicze sposoby opisu rys w ramach mechaniki kontinuum. W pierwszym podejściu rysy opisuje się w sposób rozmyty jako strefę lokalizacji odkształceń (mikrorys) o skończonej szerokości. Do opisu materiału wykorzystuje się wówczas np. prawa sprężysto-plastyczne, kontynuinalną mechanikę uszkodzeń lub modele połączone uwzględniające oba wcześniejsze mechanizmy zniszczenia. Sformułowania te uwzględniają osłabienie materiału, więc muszą posiadać informację o długości charakterystycznej mikrostruktury, by problem brzegowy pozostał dobrze zdefiniowany,

a otrzymane wyniki były niezależne od siatki elementów skończonych. Informację o długości charakterystycznej można przekazać stosując np. teorię nielokalną, podejście gradientowe lub prawa mikropolarne. Alternatywny opis rys polega na wprowadzeniu wzdłuż rys skoków przemieszczeń, z pozostawieniem ciągłego pola przemieszczeń w pozostałym obszarze. W starszych rozwiązaniach stosowano elementy interfejsowe definiowane wzdłuż krawędzi elementów skończonych. Nowsze propozycje pozwalają na definiowanie linii skoków przemieszczeń wewnątrz elementów skończonych. Do tych rozwiązań należy rozszerzona metoda elementów skończonych (*ang. eXtended Finite Element Method – XFEM*). Podejście rozmyte (ciągłe) lepiej charakteryzuje proces tworzenia się mikrorys, natomiast opis dyskretny (nieciągły) pozwala na bardziej realistyczną symulację propagacji rys dyskretnych. Zazwyczaj stosuje się tylko jedno z powyższych podejść do opisu całego procesu zarysowania. W przypadku wykonywania obliczeń numerycznych elementów żelbetowych, dochodzi jeszcze jeden problem do rozwiązania: sposób modelowania zbrojenia z ewentualnym uwzględnieniem poślizgu pomiędzy betonem a prętami zbrojeniowymi.

Symulacje numeryczne wykonane podczas przygotowywania mojej rozprawy doktorskiej dotyczyły modelowania elementów betonowych w (zasadniczo) jednoosiowych stanach naprężenia. Celem działalności naukowej prowadzonej po uzyskaniu stopnia naukowego doktora był dalszy rozwój praw konstytutywnych dla betonu oraz ich zastosowanie w symulacjach numerycznych różnych testów wymuszających powstanie złożonych stanów naprężenia. W swojej pracy badawczej skupiłem się na elementach obciążanych monotonicznie w sposób statyczny. Nowe aspekty mojej działalności objęły: wykonanie symulacji numerycznych elementów żelbetowych dla różnych problemów brzegowych, modyfikację dotychczas stosowanych kontynualnych praw konstytutywnych, wprowadzenie dyskretnego opisu rys w betonie (elementy kohezyjne i XFEM) oraz sformułowanie prawa konstytutywnego dla betonu z mieszanym: ciągło-nieciągłym opisem rys w betonie. Dla modeli kontynualnych jako metodę regularyzacji wybrałem podejście nielocalne typu całkowego. Jej zastosowanie umożliwia uzyskanie wyników niezależnych od siatki elementów skończonych, zarówno na poziomie globalnym (np. wykres siła – przemieszczenie) oraz lokalnym (np. pola odkształceń lub naprężeń). Tak zaawansowane techniki regularyzacji z reguły nie są dostępne w programach komercyjnych. Wszystkie obliczenia numeryczne zostały wykonane w programie Abaqus. Z uwagi na szerokie spektrum prowadzonych badań zostały one podzielone na (omówione niezależnie) następujące zagadnienia:

- A. zastosowanie praw konstytutywnych z nielokalnym osłabieniem do modelowania elementów żelbetowych,
- B. rozmyte i dyskretne modelowanie rys w elementach betonowych,
- C. prawo konstytutywne dla betonu z rozmytym-dyskretnym opisem rys.

#### **A. Zastosowanie praw konstytutywnych z nielokalnym osłabieniem do modelowania elementów żelbetowych**

Niniejsza grupa publikacji zawiera wyniki symulacji numerycznych różnych elementów żelbetowych. Ich celem była weryfikacja zdolności „stosunkowo” prostych praw konstytutywnych opisujących beton (a także stal zbrojeniową i poślizg pomiędzy nimi) do symulacji eksperymentów i uzyskiwania wyników zbliżonych do rzeczywistych. W obliczeniach do opisu betonu wykorzystano prawa konstytutywne sformułowane w ramach pracy nad doktoratem z dodatkowymi modyfikacjami wprowadzonymi w trakcie analiz. Stal zbrojeniowa była modelowana jako materiał sprężysto-plastyczny (kryterium Hubera-Misesa). Bezpośrednimi wykonawcami opisywanych w tej części symulacji numerycznych byli moi koledzy z Katedry: dr inż. E. Korol, mgr inż. T. Majewski, dr inż. I. Marzec oraz dr inż. Ł. Skarżyński.

Pierwszy artykuł (poz. 4.b.1) zawierał obliczenia zginanej belki żelbetowej ze zbrojeniem podłużnym (bez strzemion) obciążonej symetrycznie dwoma siłami skupionymi. Do opisu betonu wykorzystano prawo sprężysto-plastyczne z kryterium Druckera-Pragera w ściskaniu i kryterium Rankine'a w rozciąganiu z nielokalnym osłabieniem dla obu warunków plastyczności oraz izotropowy model mechaniki uszkodzeń. Przyjęto stochastyczny rozkład wytrzymałości betonu na rozciąganie wykorzystując algorytm Box-Müller. Poślizg między betonem a zbrojeniem opisano prawem wg Dörra. W obliczeniach zbadano wpływ długości charakterystycznej, energii pęknięcia, wytrzymałości betonu na rozciąganie, stopnia zbrojenia, położenia sił skupionych oraz sztywności początkowej prawa poślizgu. Otrzymano, że rozstaw rys w belce zwiększa się wraz ze wzrostem długości charakterystycznej, ale maleje wraz ze wzrostem energii pęknięcia, stopnia zbrojenia i sztywności początkowej prawa poślizgu. Rozstawy rys otrzymane z symulacji numerycznych były znacznie mniejsze niż wartości obliczone wg wzorów analitycznych. Uzyskane wartości nośności były zbliżone do wyników eksperymentalnych z badań Walravena [1]. Udało się także odwzorować efekt skali w ścinaniu dla belek o różnej wielkości.

Druga publikacja (poz. 4.b.2) dotyczyła symulacji numerycznych słupów żelbetowych ściskanych mimośrodowo. Do opisu betonu zastosowano prawo sprężysto-plastyczne z kryterium Druckera-Pragera w ściskaniu i kryterium Rankine'a w rozciąganiu z nielokalnym osłabieniem dla obu warunków plastyczności. Poślizg między betonem a zbrojeniem opisano prawem wg Dörra. Wykonano obliczenia dwu- i trój-wymiarowe. Zbadano wpływ smukłości, stopnia zbrojenia, długości charakterystycznej, sztywności początkowej prawa poślizgu i energii pęknięcia. Rozstaw rys w symulacjach numerycznych był zbliżony do wartości obliczonych wg wzorów analitycznych. Otrzymano dobrą zgodność wyników obliczeń z doświadczeniami Kima i Yanga [2].

Kolejna praca (poz. 4.b.4) przedstawiała wyniki symulacji numerycznych krótkich wsporników żelbetowych. Zachowanie się betonu opisano jednym z trzech praw

materiałowych. Pierwszą możliwością było użycie prawa sprężysto-plastycznego z kryterium Druckera-Pragera w ściskaniu i kryterium Rankine'a w rozciąganiu. Drugą opcją było zastosowanie izotropowego modelu degradacji sztywności. Ostatnia alternatywa polegała na przyjęciu anizotropowego modelu ortotropowych rys rozmytych (z rysami o ustalonym kierunku lub obracającymi się). Do uwzględnienia poślizgu między betonem a zbrojeniem zaimplementowałem sformułowanie z normy CEB-FIB (stosowano także prawo poślizgu Dörra). Uzyskane wyniki porównano z wynikami doświadczeń otrzymanych przez: Campione i innych [3], Mehmel i Freitag [4] oraz Fattuhi [5]. W przypadku obliczeń z prawem sprężysto-plastycznym otrzymano dobrą zgodność nośności elementów i obrazów zarysowania z wynikami doświadczeń. Wybór zastosowanego prawa poślizgu lub przyjęcie pełnej przyczepności między betonem i zbrojeniem nie miało wpływu na otrzymane wyniki siła – przemieszczenie. Gorszą zbieżność z wynikami doświadczalnymi uzyskano w przypadku izotropowych i anizotropowych modeli mechaniki uszkodzeń.

Ostatnim elementem (poz. 4.b.7) były obliczenia numeryczne zginanych krótkich belek żelbetowych ze zbrojeniem podłużnym (bez strzemion). Punktem wyjścia była doświadczenia Walravena i Lehwaltera [6], w których testowano cztery geometrycznie podobne elementy o różnych wymiarach. Do opisu betonu wykorzystano trzy prawa konstytutywne zastosowane w symulacjach numerycznych krótkich wsporników oraz model sprzężony łączący izotropową degradację sztywności z prawem sprężysto-plastycznym zdefiniowanym w przestrzeni naprężeń efektywnych. Poślizg między betonem a stalą zbrojeniową został uwzględniony zależnościami zaproponowanymi przez Dörra. Wszystkie cztery prawa konstytutywne wykazały się podobną, dobrą zgodnością przy wyznaczaniu wartości sił maksymalnych dla belek o różnych wysokościach. Także efekt skali zaobserwowany w doświadczeniach został pomyślnie odwzorowany przez wszystkie modele betonu. Rozbieżności pojawiły się przy analizie obrazu zarysowania. Najlepsze wyniki dało zastosowanie prawa sprężysto-plastycznego i modelu połączonego, średnie – anizotropowego modelu rys rozmytych, a najgorsze (błędne) – izotropowego prawa mechaniki uszkodzeń. Rozstawy rys uzyskane w symulacjach numerycznych i odczytane w eksperymentach były znacznie mniejsze niż obliczone wg wzorów analitycznych.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane w następujących czasopismach z listy JCR: Computers and Concrete (poz. 4.b.1 i 4.b.7), Engineering Structures (poz. 4.b.2) i Finite Elements in Analysis and Design (poz. 4.b.4). Krótki przegląd praw konstytutywnych dla betonu i żelbetu przedstawiono w pracy [Zał. 5, poz. II.E.12]. Otrzymane rezultaty i wnioski zostały również zaprezentowane na konferencjach międzynarodowych: WCCM 2006 (Zał. 5, poz. II.L.12), CMM 2007 (Zał. 5, poz. III.B.9) oraz CMM 2009 (Zał. 5, poz. III.B.13).

## **B. Rozmyte i dyskretne modelowanie rys w elementach betonowych**

Zdolność różnych praw konstytutywnych do opis betonu w złożonych stanach naprężenia zweryfikowałem wykonując serię symulacji numerycznych dwóch znanych problemów brzegowych. Pierwszym z nich był test Nooru-Mohameda [7]. Polega on na ścinaniu (w kierunku poziomej) kwadratowej próbki betonowej z dwoma nacięciami położonymi na środku krawędzi pionowych. Po uzyskaniu określonej wartości siły ścinającej próbka jest następnie rozciągana w kierunku pionowym (wartość siły poziomej nie zmienia się). W zależności od przyjętej wartości siły poziomej w próbce powstają dwie mniej lub bardziej zakrzywione rysy. Drugim analizowanym problemem był test belki z nacięciem pod obciążeniem antysymetrycznym (test Schlangena [8]). W doświadczeniu uzyskano zakrzywioną rysę biegnącą od pionowego nacięcia położonego w środku górnej krawędzi belki do jednej z dolnych podpór. Dodatkową trudnością w symulacji tego testu była konieczność sterowania obciążeniem z wykorzystaniem metod kontroli długości łuku.

Przeanalizowałem zachowanie się następujących kontynualnych praw konstytutywnych z nielokalnym osłabieniem: modelu sprężysto-plastycznego z kryterium Rankine'a, modelu kontynualnej mechaniki uszkodzeń z izotropową degradacją sztywności i różnymi definicjami odkształcenia efektywnego oraz anizotropowego modelu rys rozmytych (z rysami o ustalonym kierunku lub obracającymi się). Obliczenia wykonałem również przyjmując dyskretny opis zarysowania i stosując elementy interfejsowe kohezyjne. Model sprężysto-plastyczny pozwolił na uzyskanie realistycznych wykresów siła – przemieszczenie oraz poprawnych obrazów zarysowania (choć otrzymane rysy były zbyt proste w porównaniu do wyników eksperymentów). Zachowanie się prawa izotropowej degradacji sztywności zależało od przyjętej definicji odkształcenia efektywnego. Wyniki zgodne z eksperymentem otrzymałem przy zastosowaniu tzw. zmodyfikowanej definicji von Misesa, podczas gdy rezultatem przyjęcia odkształceniowej definicji kryterium Rankine'a były złe wyniki. Również użycie ortotropowego modelu rys rozmytych (w obu wersjach) nie pozwoliło na uzyskanie poprawnych wyników. Najlepszą zgodność z eksperymentem uzyskałem przy zastosowaniu elementów kohezyjnych.

Wyniki uzyskane w pierwszym etapie zostały opublikowane w czasopiśmie recenzowanym: *Mechanics and Control* (poz. 4.b.5). Otrzymane rezultaty i wnioski zostały przedstawione oraz umieszczone w materiałach konferencji Euro-C 2010 (poz. 4.b.3 oraz Zał. 5, poz. II.L.23). Były one także treścią referatów na konferencjach międzynarodowych: CFRAC 2007 (Zał. 5, poz. II.L.15), CMM 2007 (Zał. 5, poz. II.L.16), AMCM 2008 (Zał. 5, poz. II.L.17), WCCM 2008 (Zał. 5, poz. II.L.18), SolMech 2008 (Zał. 5, poz. II.L.19), ComGeo 2009 (Zał. 5, poz. II.L.20) i CMM 2009 (Zał. 5, poz. II.L.21).

Po powrocie ze stypendium PostDoc na Uniwersytecie Technicznym w Delft w Holandii (Zał. 5, poz. III.J.6) zastosowałem rozszerzoną metodę elementów skończonych (XFEM)

do symulacji rys w betonie. W programie Abaqus jest dostępna implementacja tej metody, ale pozwala ona na stosowanie tylko niektórych typów elementów skończonych i nie daje użytkownikowi pełnej kontroli nad procesem propagacji rysy. Z tego względu zdecydowałem się na wykonanie wersji autorskiej. Z uwagi na ograniczenia w dostępie do kodu programu, implementacja wymagała:

1. identyfikacji informacji o topologii zastosowanej siatki elementów skończonych (definicje węzłów i elementów) – były one niezbędne przy definiowaniu propagacji rysy w elementach skończonych,
2. „przejęcia” kontroli nad algorytmem zbieżności w programie Abaqus (dla wykrycia iteracji, w których możliwe jest dodawanie nowych segmentów rysy, a następnie ewentualnego restartu obliczeń w aktualnym przyroście) – wymagało to zdefiniowania niezależnego bloku kodu do wyznaczania maksymalnych wartości residuum siły i poprawki przemieszczeń,
3. sformułowania elementu skończonego standardowego (bez rysy) oraz zarysowanego z dyskretnym prawem osłabienia w rysie,
4. definicji kryteriów inicjacji/rozwoju rysy i kierunku jej propagacji,
5. napisania procedur do wizualizacji rys dyskretnych.

Wprowadzone modyfikacje działania programu Abaqus wykraczały daleko poza standardowo stosowane rozszerzenia, jak definiowanie własnych elementów skończonych lub praw materiałowych. Weryfikację algorytmu przeprowadziłem dla szeregu testów numerycznych. Zbadałem wpływ rozmiaru i typu stosowanych elementów skończonych oraz wyboru schematu całkowania w elementach zarysowanych. Otrzymane wyniki udowodniły poprawność wykonanej implementacji i były niezależne od siatki elementów skończonych. Pokazały również duży wpływ kryterium kierunku propagacji rysy na otrzymywane wyniki.

Wyniki uzyskane w drugim etapie zostały opublikowane w czasopiśmie recenzowanym: Archives of Civil Engineering (poz. 4.b.6). Otrzymane rezultaty i wnioski zostały również zaprezentowane na konferencjach międzynarodowych: CMM 2011 (Zał. 5, poz. II.L.24) i AMCM 2011 (Zał. 5, poz. II.L.25).

W ostatnim etapie obliczeń powróciłem do symulacji testu Nooru-Mohameda. Szczególną uwagę zwróciłem na definicję materiału w obszarze ściskanie – rozciąganie. Do oceny zgodności trajektorii rys z eksperymentem wprowadziłem definicję „wysokości rysy” jako odległości pomiędzy linią poziomą łączącą oba nacięcia w próbie a najbardziej oddalonym punktem rysy. Rozszerzyłem warunek plastyczności Rankine'a o liniową zmienność w obszarze ściskanie – rozciąganie (wytrzymałość na rozciąganie maleje wraz ze wzrostem bezwzględnej wartości prostopadłego naprężenia ściskającego). Obliczenia pokazały jednak, że ta modyfikacja nie poprawia zgodności wyników



(szczególnie trajektorii rys) z eksperymentem. Podobnej modyfikacji dokonałem dla definicji odkształcenia efektywnego wg kryterium Rankine'a. Aby uzyskać wyniki zbliżone do otrzymanych z doświadczeń, konieczne było niefizyczne zwiększenie (a nie zmniejszenie) nośności w obszarze ściskanie – rozciąganie. Ta obserwacja wyjaśnia również poprawność otrzymywanych wyników przy stosowaniu kontynuualnej mechaniki uszkodzeń ze zmodyfikowaną definicją Misesa. Wskazuje to na konieczność stosowania odpowiednich zależności anizotropowych do opisu betonu. Wyniki otrzymane rozszerzoną metodą elementów skończonych (XFEM) cechowały się dużą zgodnością z eksperymentem, jedynie otrzymane rysy były zbyt „wysokie” w stosunku do średnich eksperymentalnych wysokości rys.

Wyniki uzyskane w trzecim etapie zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR: International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics (poz. 4.b.10) oraz w czasopiśmie recenzowanym: Inżynieria Morska i Geotechnika (poz. 4.b.9). Otrzymane rezultaty i wnioski zostały również zaprezentowane na konferencji międzynarodowej: ECCOMAS 2012 (Zał. 5, poz. II.L.27).

### ***C. Prawo konstytutywne dla betonu z rozmytym-dyskretnym opisem rys***

Stosowanie podejścia rozmytego lub dyskretnego do opisu zachowania się rysy od inicjacji aż do powstania makrorysy jest uproszczeniem. Dokładniejszy opis powinien uwzględniać obie fazy występujące w procesie zarysowania. Bazując na takich założeniach, sformułowałem prawo konstytutywne łączące rozmyty (ciągły) i dyskretny (nieciągły) opis rys. Do modelowania rys rozmytych zastosowałem jeden z dwóch modeli materiału z nielokalnym osłabieniem: prawo sprężysto-plastyczne z kryterium Rankine'a lub izotropowy model mechaniki uszkodzeń. Opis rysy dyskretny został zrealizowany przez zastosowanie rozszerzonej metody elementów skończonych (XFEM). Kierunek propagacji rysy dyskretny został wyznaczony na podstawie rozkładu pola kontynuualnego parametru osłabienia przed wierzchołkiem rysy. Przejście z opisu ciągłego do nieciągłego może zostać zdefiniowane dla dowolnego punktu na krzywej osłabienia. Przeprowadziłem analizę procesu dysypacji energii, aby zagwarantować stałą wartość całkowitej energii pęknięcia niezależnie od wyboru punktu przejścia z opisu ciągłego do nieciągłego. W przypadku kontynuualnej mechaniki uszkodzeń wymaga to modyfikacji krzywej osłabienia przyjętej dla rysy dyskretny (niezależnie dla każdego segmentu rysy w momencie powstania). Zdefiniowanie segmentu rysy w danym elemencie skończonym oznaczało konieczność „wyłączenia” nielokalności w prostopadłych (do danego segmentu rysy) elementach skończonych na szerokości strefy lokalizacji, w celu uniknięcia podwójnego opisu procesu osłabienia. Proces przejścia z jednego do drugiego sformułowania stał się źródłem problemów z uzyskiwaniem zbieżności w symulacjach numerycznych. Dla jego (częściowego) rozwiązania wprowadziłem tzw. strefę mieszaną przy wierzchołku rysy o długości będącej parametrem modelu. Jej obecność opóźnia proces „wyłączania” nielokalności. Zaproponowałem także kilka modyfikacji standardowego algorytmu stosowanego

w rozwiązywaniu globalnego układu równań MES, który uwzględniał specyfikę sformułowanego prawa konstytutywnego. Dla weryfikacji wykonałem obliczenia numeryczne jednoosiowego rozciągania, trzypunktowego zginania oraz testów Nooru-Mohameda [7] i Schlangena [8]. Przeprowadzone symulacje numeryczne wykazały poprawność tak zdefiniowanego prawa konstytutywnego, choć cechowały się dość wolną zbieżnością. Korzystając z wyników doświadczalnych pól przemieszczeń (otrzymanych przez dr. inż. Ł. Skarżyńskiego przy zastosowaniu metody cyfrowej korelacji obrazu – ang. *Digital Image Correlation* – DIC), spróbowałem dokonać identyfikacji punktu przejścia dla testu trzypunktowego zginania. Został on określony dla naprężenia rozciągającego równego 20% wytrzymałości na rozciąganie. Ten temat był realizowany w ramach grantu międzynarodowego [Zał. 5, poz. II.J.2].

Trudności z uzyskiwaniem zbieżności w symulacjach numerycznych przy stosowaniu modelu połączonego skłoniły mnie do jego ulepszenia. Ideą modyfikacji było zastąpienie gwałtownego przeskoku pomiędzy ciągłym i dyskretnym opisem zarysowania (jeden punkt na krzywej osłabienia) przez stopniowe i łagodne przejście (punkt początkowy i końcowy na krzywej osłabienia). W tym celu zdefiniowałem funkcję przejścia/transferu  $\rho$  o wartościach zmieniających się od 0 (brak opisu dyskretnego) do 1 (brak opisu ciągłego), zależną od wartości kontynualnego parametru osłabienia lub odległości od wierzchołka rysy. Wraz ze zdefiniowaniem nowego segmentu rysy, elementy i węzły leżące w paśmie prostopadłym do tego segmentu są podwajane. Pasma podwajania powinno objąć całą szerokość strefy lokalizacji. Dolna warstwa elementów skończonych opisuje podejście kontynualne (z wagą  $1-\rho$ ), a górna – podejście dyskretne (z wagą  $\rho$ ). Takie rozwiązanie eliminuje konieczność „wyłączania” nielokalności i dodatkowych modyfikacji algorytmu MES.

Uzyskane wyniki z oryginalnym sformułowaniem modelu połączonego zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR: *Finite Elements in Analysis and Design* (poz. 4.b.11). Otrzymane rezultaty i wnioski zostały przedstawione oraz umieszczone w materiałach konferencji Euro-C 2014 (poz. 4.b.8 oraz Zał. 5, poz. II.L.32). Były one także treścią referatów na konferencjach międzynarodowych: FramCoS 2013 (Zał. 5, poz. II.L.29) i CFRAC 2013 (Zał. 5, poz. II.L.30). Ulepszona wersja prawa konstytutywnego została zaprezentowana na konferencjach międzynarodowych: CFRAC 2015 (Zał. 5, poz. II.L.34) oraz CMM 2015 (Zał. 5, poz. II.L.35). Najnowsze wyniki zostaną przedstawione na konferencji FramCoS 2016 w Berkeley w USA.

### ***Podsumowanie***

Opisane powyżej wyniki symulacji numerycznych elementów betonowych i żelbetowych wykazały zdolność stosowanych praw konstytutywnych do odzwierciedlenia zachowania się elementów rzeczywistych. Weryfikacja ta została przeprowadzona dla szerokiego spektrum problemów brzegowych. W obliczeniach uwzględniono trzy sposoby opisu rys w betonie: rozmyty, dyskretny i połączony. W przypadku kontynualnych praw

konstytutywnych z osłabieniem teoria nielokalna potwierdziła swoją skuteczność dla uzyskania wyników niezależnych od siatki elementów skończonych.

Do najważniejszych osiągnięć, wynikających z przeprowadzonych badań, należą:

1. sformułowanie/modyfikacja oraz implementacja kontynualnych praw konstytutywnych z nielokalnym osłabieniem; prawa te pozwalają na uzyskiwanie wyników niezależnych od siatki elementów skończonych,
2. zastosowanie zdefiniowanych modeli materiałowych do wykonania serii symulacji numerycznych różnych elementów żelbetowych i uzyskania rezultatów zgodnych z wynikami eksperymentalnymi,
3. wykorzystanie kontynualnych praw konstytutywnych dla betonu do symulacji numerycznych elementów betonowych i żelbetowych w ramach doktoratów i dalszej działalności naukowej przez koleżanki i kolegów z Katedry (E. Korol, T. Majewski, T. Małecki, I. Marzec, M. Ostaszewska, Ł. Skarżyński, M. Skuza, Ł. Widuliński),
4. implementacja w programie Abaqus autorskiego kodu rozszerzonej metody elementów skończonych (XFEM) pozwalającego na pełną kontrolę nad procesem modelowania rozwoju rys dyskretnych w betonie,
5. analiza stosowanych praw kontynualnych i dyskretnych dla betonu w złożonych stanach naprężenia pokazująca wagę odpowiedniego zdefiniowania prawa konstytutywnego w obszarze ściskanie – rozciąganie,
6. sformułowanie prawa konstytutywnego dla betonu z ciąгло-nieciąglým opisem zarysowania charakteryzującym się poprawnym sformułowaniem modelu dla obu faz (z uwagi na osłabienie) oraz zidentyfikowanie i rozwiązanie problemów numerycznych.

Uzyskane wyniki (prawa materiałowe) mogą być stosowane do:

1. wykonywania obliczeń numerycznych innych elementów betonowych i żelbetowych (np. test rozłupywania, belki żelbetowe skręcane),
2. analizy wpływu poszczególnych parametrów geometrycznych i materiałowych na zachowanie się elementów betonowych i żelbetowych,
3. formułowania praw konstytutywnych opisujących zjawiska niemechaniczne w połączeniu z analizą rozkładu naprężeń (np. pełzanie, dojrzewanie betonu, korozja),
4. symulowania ewolucji rys w elementach betonowych z uwzględnieniem zmiany charakteru zarysowania (prawo ciąгло-nieciąglę).

Jednocześnie przeprowadzone obliczenia pokazały kilka nowych obszarów badawczych, których realizacja ulepszyłaby i zwiększyła możliwości stosowanych przeze mnie algorytmów. Jednym z takich zagadnień jest uwzględnianie w rozwiązywaniu globalnego

układów równań równowagi MES interakcji między punktami całkowania (elementami skończonymi), które są tworzone przy obliczaniu wartości nielokalnych dla danego punktu (tzw. nielokalna macierz sztywności). Obecnie trwają prace nad implementacją takiej macierzy sztywności w programie Abaqus. Drugą kwestią jest rozszerzenie możliwości algorytmu rozszerzonej metody elementów skończonych (XFEM). Dotychczasowa implementacja pozwala na definicję i propagację wielu niezależnych rys, które muszą zaczynać się na brzegu próbki i nie mogą się ze sobą łączyć. Ulepszona wersja pozwoli na inicjację rys w dowolnym punkcie oraz na łączenie się rys. Umożliwi to wykonywanie obliczeń numerycznych elementów żelbetowych. Algorytm ten zostanie również wykorzystany do modelowania powstawania i propagacji rys w betonie z uwzględnieniem jego mezostruktury. Ten temat jest realizowany przy współpracy z mgr inż. W. Trawińskim, doktorantem z Katedry.

- [1] Walraven, J., 1978. The influence of depth on the shear strength of lightweight concrete beams without shear reinforcement. TU-Delft Report 5-78-4, Delft University.
- [2] Kim J., Yang J., 1995. Buckling behaviour of slender high-strength concrete columns. *Engineering Structures*, 17(1), 39-51.
- [3] Campione G., La Mendola L., Papia M., 2005. Flexural behavior of concrete corbels containing steel fibres or wrapped with FRP sheets. *Materials and Structures*. 38(6), 617-625.
- [4] Mehmel A., Freitag W., 1967. Tragfähigkeitsversuche an Stahlbetonkonsolen. *Bauingenieur*. 42(10), 362-369.
- [5] Fattuhi, N.I., 1990. Strength of SFRC corbels subjected to vertical load. *Journal of Structural Engineering ASCE*. 116(3), 701-718.
- [6] Walvaren J., Lehwalter N., 1994. Size effects in short beams loaded in shear. *ACI Structural Journal*, 91(5), 585-593.
- [7] Nooru-Mohamed M, B, 1992. Mixed-mode fracture of concrete: an experimental approach. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- [8] Schlangen E., 1993. Experimental and numerical analysis of fracture process in concrete, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych**

### Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

Pierwszy kontakt z działalnością naukową zawdzięczam dr hab. inż. Piotrowi Korzeniowskiemu z Politechniki Gdańskiej. Dzięki jego zaproszeniu, będąc jeszcze studentem budownictwa, napisałem program komputerowy służący do wyznaczania nośności żelbetowych słupów ściskanych wg Eurokodu 2 (Zał. 5, poz. III.B.1).

Po podjęciu pracy na Politechnice Gdańskiej (styczeń 1999) na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego rozpocząłem, trwającą do dziś, współpracę z prof. dr hab. inż. Jackiem Tejchmanem. Początkowo miałem zajmować się nośnością elementów żelbetowych poddanych jednoczesnemu zginaniu, ścinaniu i skręcaniu. Temat ten jednak uległ modyfikacji i centrum moich zainteresowań stało się szeroko pojęte numeryczne modelowanie zachowania się elementów betonowych (i żelbetowych). Od samego początku w obliczeniach numerycznych wykorzystywałem program Abaqus. Dla lepszego poznania tego narzędzia odbyłem 3-miesięczny staż naukowy u prof. J. Eibla

na Uniwersytecie w Karlsruhe w ramach programu Socrates-Erasmus (Załącznik 5, poz. III.L.2). Na początku zajmowałem się prawami konstytutywnymi definiowanymi w ramach mechaniki ośrodka ciągłego. Z faktu definiowania osłabienia wymagały one stosowania metody regularyzacji dla otrzymywania wyników niezależnych od siatki elementów skończonych. W moim przypadku było to podejście nielocalne typu całkowitego. Kolejny ważny staż odbyłem na Uniwersytecie w Dortmundzie (Załącznik 5, poz. III.L.3). Pomoc oraz informacje przekazane przez dr T. Maiera przyspieszyły i ułatwiły pracę nad implementacją modelu nielocalnego do programu Abaqus.

Ostatecznie tytuł mojej rozprawy doktorskiej został określony jako „Implementacja i przykłady zastosowań nieliniowych modeli betonu z nielocalnym osłabieniem”. Została ona obroniona z wyróżnieniem w dniu 20.12.2006. Jej głównym celem było zastosowanie modelu nielocalnego w połączeniu z prawami konstytutywnymi definiowanymi w ramach mechaniki ośrodka ciągłego (kontinuum) do numerycznego modelowania elementów betonowych (i żelbetowych) w różnych dwuwymiarowych quasi-statycznych problemach brzegowych. Cele szczegółowe (będące jednocześnie uzyskanymi osiągnięciami) polegały na:

1. implementacji algorytmów nielocalnych do programu komercyjnego Abaqus/Standard w połączeniu z różnymi prawami konstytutywnymi,
2. zbadaniu wpływu poszczególnych parametrów nielocalnych na otrzymywane wyniki,
3. porównaniu poprawności i skuteczności różnych algorytmów nielocalnych w sprężysto-plastyczności.

Zakres pracy doktorskiej obejmował:

1. opis własności betonu, zjawiska lokalizacji odkształceń i metod regularyzacji,
2. opis podstawowych równań metody elementów skończonych (MES) oraz praw konstytutywnych zastosowanych do opisu betonu, stali zbrojeniowej i poślizgu między nimi,
3. przedstawienie sposobu implementacji podejścia nielocalnego w programie Abaqus/Standard, ze szczególnym uwzględnieniem problemu zbierania danych z sąsiednich punktów całkowania, zjawiska symetrii i barier w uśrednianiu nielocalnym,
4. weryfikację modelu nielocalnego przez wykonanie symulacji numerycznych dla wybranych zagadnień brzegowych w połączeniu z różnymi prawami konstytutywnymi dla betonu.

Zbiór zastosowanych praw konstytutywnych dla betonu obejmował prawo sprężysto-plastyczne z kryterium Rankine'a i nielocalnym osłabieniem, prawo sprężysto-plastyczne z kryterium Druckera-Pragera i nielocalnym osłabieniem oraz materiał zdefiniowany w ramach mechaniki uszkodzeń z izotropową degradacją sztywności.

Proces weryfikacji polegał na wykonaniu symulacji numerycznych testów jednoosiowego ściskania, jednoosiowego rozciągania oraz trzy-punktowego zginania. We wszystkich przypadkach wyniki były niezależne od siatki elementów skończonych. Wyniki weryfikacji modeli nielokalnych zamieszczono w czasopiśmie na liście JCR: Computers and Concrete (Zał. 5, poz. II.A.1) oraz w czasopismach recenzowanych: TASK Quaterly (Zał. 5, poz. II.E.4) i Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics (Zał. 5, poz. II.E.6). Otrzymane rezultaty i wnioski zostały przedstawione oraz umieszczone w materiałach konferencji w Karlsruhe w roku 2004 (Zał. 5, poz. II.E.5 oraz poz. III.B.2) oraz Powders and Grains 2005 (Zał. 5, poz. II.E.7 i poz. III.B.4). Były one także treścią referatów na konferencjach międzynarodowych: CMM 2003 (Zał. 5, poz. II.L.7), SEMC 2004 (Zał. 5, poz. III.B.3) i AMCM 2005 (Zał. 5, poz. III.B.5) oraz krajowych: w Zielonej Górze w roku 2001 (Zał. 5, poz. II.L.1), Gdańsku-Sobieszewie w roku 2001 (Zał. 5, poz. II.L.4) i w Wiśle w roku 2002 (Zał. 5, poz. II.L.6).

Sprawdzono również zdolność teorii nielokalnej do odzwierciedlenia zjawiska deterministycznego efektu skali. Przeprowadzono obliczenia numeryczne dla testu mimośrodowego rozciągania, jednoosiowego ściskania i trzypunktowego zginanie belki z nacięciem dla elementów o różnych wielkościach. We wszystkich trzech testach zastosowano prawo sprężysto-plastyczne (z odpowiednim kryterium) oraz model izotropowej degradacji sztywności. Potwierdzono zdolność zdefiniowanych praw konstytutywnych do symulacji efektu skali. Wyniki obliczeń numerycznych zostały opublikowane w czasopismach recenzowanych: Archives of Civil Engineering (Zał. 5, poz. II.E.8), TASK Quaterly (Zał. 5, poz. II.E.9) oraz w publikacji [Zał. 5, poz. II.E.11]. Otrzymane rezultaty i wnioski zostały również zaprezentowane na konferencjach międzynarodowych: Cure 2004 (Zał. 5, poz. II.L.8), CMM 2005 (Zał. 5, poz. II.L.9), AMCM 2005 (Zał. 5, poz. III.B.6) i konferencji krajowej w Krynicy w roku 2005 (Zał. 5, poz. II.L.10).

Jednym z ostatnich elementów zamieszczonych w pracy doktorskiej było sformułowanie i implementacja prawa konstytutywnego przeznaczonego do symulacji zachowania się elementów betonowych obciążonych cyklicznie. Przyjęto połączenie prawa sprężysto-plastycznego z kryteriami Rankine'a i Druckera-Pragera bez osłabień (zdefiniowanego w przestrzeni naprężeń efektywnych) z nielokalną wersją modelu izotropowej degradacji sztywności. Weryfikację przeprowadzono dla testu czteropunktowego zginania belki betonowej z nacięciem obciążonej cyklicznie. Uzyskano dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi Hordijka. Wyniki obliczeń numerycznych zamieszczono w czasopiśmie na liście JCR: Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Zał. 5, poz. II.A.2). Otrzymane rezultaty i wnioski zostały przedstawione oraz umieszczone w materiałach konferencji Euro-C 2006 (Zał. 5, poz. II.E.10 i poz. II.L.11). Były one także treścią referatów na konferencjach międzynarodowych: WCCM 2006 (Zał. 5, poz. II.L.13) i SolMech 2006 (Zał. 5, poz. II.L.14). Problem symulacji numerycznych

betonu obciążonego cyklicznie był następnie rozwijany przez kolegę z Katedry, dr inż. I. Marca.

Dodatkowa moja działalność naukowa, niezwiązana z tematem doktoratu, dotyczyła praktycznych aspektów zastosowań MES w problemach inżynierskich i wynikała z wykonywanych projektów i ekspertyz technicznych. Zastosowane metody obliczeniowe i otrzymane wyniki symulacji numerycznych podczas realizacji projektu płyty fundamentowej (Zał. 5, poz. II.B.1) zostały zaprezentowane podczas konferencji w Wenecji (Polska) w roku 2001 (Zał. 5, poz. II.E.1 i poz. II.L.2). Na tej samej konferencji zostały przedstawione rezultaty obliczania żelbetowych stropów płytowo-słupowych, ze szczególnym uwzględnieniem metod definiowania obciążeń od ścian działowych (Zał. 5, poz. II.E.2 i poz. II.L.3). Z kolei wyniki opracowania dotyczące wyznaczania sił w zbiorniku żelbetowym od obciążeń termicznych (Zał. 5, poz. III.M.4) zostały przedstawione na konferencji w Łańsku w roku 2002 (Zał. 5, poz. II.L.5).

#### Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze po uzyskaniu stopnia doktora stanowiły uzupełnienie lub rozszerzenie mojej podstawowej działalności naukowej. Niektóre z nich były kontynuacją analiz umieszczonych w doktoracie, a inne dotyczyły zupełnie nowych dla mnie problemów. Zostały one podzielone na następujące zagadnienia:

- D. analiza rozstawu rys w rozciąganych elementach żelbetowych,
- E. efekt skali w zginanych elementach betonowych,
- F. numeryczne symulacje stref ścinania w gruntach.

Ponadto wyniki większości symulacji numerycznych, razem z opisem praw materiałowych, zamieszczone w rozprawie doktorskiej oraz otrzymane po uzyskaniu stopnia doktora (tematy A, B, D i E) zostały zebrane w monografii opublikowanej w Wydawnictwie Politechniki Gdańskiej (Zał. 5, poz. II.E.15). Ulepszona i rozszerzona jej wersja (m. in. i wyniki symulacji rys dyskretnych w betonie) została wydana w wydawnictwie Springer (Zał. 5, poz. II.E.16). Dodatkowe zagadnienie, które nie zostały ujęte w tematach A-F, dotyczyły aspektów numerycznych stosowania teorii nielokalnej. Sposoby implementacji praw konstytutywnych z nielokalnym osłabieniem zostały zaprezentowane na konferencji MHM 2007 (Zał. 5, poz. III.B.10), natomiast wyniki porównawcze różnych algorytmów w nielokalnej plastyczności przedstawiono na konferencji COMPLAS 2009 (Zał. 5, poz. II.L.22).

#### ***D. Analiza rozstawu rys w rozciąganych elementach żelbetowych***

Jedynym przykładem symulacji numerycznej elementu żelbetowego umieszczonej w rozprawie doktorskiej był przykład rozciągania elementu żelbetowego. Oryginalne obliczenia zostały wykonane dla materiału sprężysto-plastycznego z kryterium Rankine'a

i nielokalnym osłabieniem i prawem poślizgu między betonem a zbrojeniem wg Dörra. Przyjęto stochastyczny rozkład wytrzymałości na rozciąganie wykorzystując algorytm Box-Müller. Dla zbadania wpływu przyjętego prawa poślizgu zaimplementowałem zaawansowane prawo poślizgu wg den Uijl i Bigaj. Obliczenia numeryczne, wykonane przez mgr inż. T. Małeckiego, dr inż. I. Marca i mgr inż. Ł. Widulińskiego, pokazały jednak, że dla tego problemu brzegowego na wyniki wpływa jedynie sztywność początkowa prawa poślizgu. W symulacjach analizowano również wpływ procentu zbrojenia i długości charakterystycznej. Obliczenia numeryczne pokazały, że rozstaw rys rośnie wraz ze wzrostem długości charakterystycznej, ale maleje przy zwiększaniu stopnia zbrojenia, energii pęknięcia i sztywności początkowej prawa poślizgu. Nie stwierdzono wpływu wielkości przekroju poprzecznego i ciśnienia bocznego na rozstawy rys. Otrzymane wartości rozstawów rys porównano z wzorami analitycznymi. Najlepszą zgodność otrzymano dla wzoru z normy CEB-FIB.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR: Mechanics Research Communications (Załącznik 5, poz. II.A.3) oraz w czasopiśmie recenzowanym: Archives of Civil Engineering (Załącznik 5, poz. II.E.13). Otrzymane rezultaty i wnioski zostały również zaprezentowane na konferencji międzynarodowej: WCCM 2006 (Załącznik 5, poz. II.L.12).

#### ***E. Efekt skali w zginanych elementach betonowych***

Drugim zagadnieniem, rozpoczętym podczas pracy nad rozprawą doktorską, była analiza efektu skali w elementach betonowych. Po uzyskaniu stopnia doktora w pierwszej kolejności wykonałem obliczenia numeryczne dla geometrycznie podobnych zginanych belek betonowych z nacięciem. Zastosowałem sprężysto-plastyczne prawo materiałowe z warunkiem plastyczności Rankine'a i nielokalnym osłabieniem. Przestrzennie skorelowane pola stochastyczne wytrzymałości na rozciąganie zostały przygotowane przez dr. hab. inż. J. Górskiego z Politechniki Gdańskiej. W analizie stochastycznego efektu skali zbadano wpływ długości korelacji. Jej zmiana nie wpływała na średnią wartość nośności belki, ale wraz z jej spadkiem zmniejszył się rozrzut obliczonych sił maksymalnych. W drugim etapie analizie poddano zginane belki betonowe bez nacięć. Obliczenia numeryczne zostały wykonane przez dr inż. E. Korol, koleżankę z Katedry. Dla belek bez nacięć otrzymano silniejszy stochastyczny efekt skali w porównaniu z belkami z nacięciami. Wynikało to z różnic w propagacji rysy oraz możliwym niesymetrycznym jej położeniu (względem osi symetrii belki).

Temat deterministycznego i stochastycznego efektu skali w zginanych elementach betonowych (i żelbetowych) został następnie podjęty przez dr inż. E. Korol i jest on przez nią kontynuowany z sukcesami do dnia dzisiejszego. Obecnie prowadzę analizy problemu deterministycznego efektu skali w elementach betonowych osiowo obciążonych z nacięciami/otworami współpracując z prof. dr. hab. inż. Z. Mrozem z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w ramach grantu [Załącznik 5, poz. III.J.3].



Uzyskane wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR: Archives of Mechanics (Załącznik 5, poz. II.A.4). Otrzymane rezultaty i wnioski zostały przedstawione oraz umieszczone w materiałach konferencji Euro-C 2010 (Załącznik 5, poz. II.E.14 oraz poz. III.B.16). Były one także treścią referatów na konferencjach międzynarodowych: CFRAC 2007 (Załącznik 5, poz. III.B.8), AMCM 2008 (Załącznik 5, poz. III.B.11), SolMech 2008 (Załącznik 5, poz. III.B.12), CMM 2009 (Załącznik 5, poz. III.B.14) oraz COMPLAS 2009 (Załącznik 5, poz. III.B.15).

#### ***F. Numeryczne symulacje stref ścinania w gruntach***

Znajomość założeń i metod implementacji teorii nielokalnej zaowocowała nawiązaniem współpracy z dr W. Minkley'em z Instytutu Geomechaniki Sp. z o.o. w Lipsku. Współpraca ta trwała w latach 2006 i 2009 i polegała na rozszerzeniu wybranych praw konstytutywnych stosowanych do symulacji zachowania się gruntów o podejście nielokalne. W ramach tej współpracy zaimplementowałem teorię nielokalną do programów FLAC i UDEC firmy ITASCA Group. Rozszerzenie to zostało połączone z prawem sprężysto-plastycznym z kryterium Mohra-Coulomba oraz z prawem sprężysto-wisko-plastycznym sformułowanym przez dr Minkley'a. Owocem tej współpracy była seria raportów opisująca proces implementacji oraz wyniki symulacji numerycznych wykonanych w celu weryfikacji (Załącznik 5, poz. II.B.2).

Mój drugi kontakt z mechaniką gruntów miał miejsce podczas rocznego stypendium PostDoc na Uniwersytecie Technicznym w Delft w Holandii (Załącznik 5, poz. III.L.6). Moimi przełożonymi byli dr inż. R. Brinkgreve i prof. L. Sluys. Pobyt w Holandii pozwolił mi na poznanie założeń teorii i metod implementacji rozszerzonej metody elementów skończonych (XFEM). W ramach uczestnictwa w grantie [Załącznik 5, poz. II.J.1] zajmowałem się implementacją tej metody w programie Plaxis. Do opisu ścinania w gruntach zostało wykorzystane prawo sprężysto-plastyczne z kryterium Mohra-Coulomba w wersji kontynuualnej (bez osłabienia) i dyskretnej (z osłabieniem). Efektem mojego pobytu był raport (Załącznik 5, poz. II.F.1) opisujący główne założenia XFEM, szczegóły implementacji oraz wyniki serii obliczeń numerycznych. Te ostatnie obejmowały m. in. testy jednoosiowego ściskania, ścinania prostego oraz oddziaływania gruntu i ściany oporowej. Problem ścinania był kontynuowany po powrocie do Polski. Model dyskretnych stref ścinania dla gruntów został zaimplementowany do programu Abaqus. Wyniki symulacji numerycznych zostały przedstawione na konferencji IWBDG 2014 (Załącznik 5, poz. II.E.17 oraz poz. II.L.33).

#### **6. Działalność dydaktyczna**

Od początku mojego zatrudnienia na Politechnice Gdańskiej (w roku 1999) prowadzę zajęcia dydaktyczne na studiach stacjonarnych kierunku budownictwo (w przeszłości

także na kierunku inżynieria środowiska). W chwili obecnej prowadzę zajęcia na następujących przedmiotach (Załącznik 5, poz. III.J):

1. budownictwo ogólne I (studia I stopnia) – ćwiczenia i projektowanie,
2. budownictwo ogólne II (studia I stopnia) – ćwiczenia i projektowanie,
3. konstrukcje drewniane (studia I stopnia) – wykład i projektowanie (osoba odpowiedzialna za przedmiot),
4. nowoczesne konstrukcje drewniane (studia II stopnia) – wykład i ćwiczenia (osoba odpowiedzialna za przedmiot),
5. projektowanie zaawansowanych konstrukcji inżynierskich (studia II stopnia) – ćwiczenia i projektowanie (osoba odpowiedzialna za przedmiot),
6. Complex Concrete Structures (studia II stopnia) – ćwiczenia i projektowanie (zajęcia prowadzone w języku angielskim).

Opracowałem treści programowe przedmiotów: nowoczesne konstrukcje drewniane i projektowanie zaawansowanych konstrukcji inżynierskich. W przeszłości prowadziłem również projektowanie z konstrukcji betonowych i budownictwa ogólnego III (studia magisterskie jednolite) oraz zajęcia z budownictwa ogólnego na kierunku inżynieria środowiska.

Od roku 2008 r. byłem promotorem 31 i recenzentem 35 prac dyplomowych inżynierskich oraz promotorem 16 i recenzentem 58 prac dyplomowych magisterskich na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych (Załącznik 5, poz. III.J).

W roku 1999 w ramach programu TEMPUS odbyłem tygodniowy staż dydaktyczny na City University w Londynie, którego celem było zapoznanie się z metodami nauczania stosowanymi w Wielkiej Brytanii (Załącznik 5, poz. III.L.1).

Byłem współautorem materiałów pomocniczych do przedmiotu budownictwo ogólne I (razem z kolegami z Katedry: M. Niedostatkiem, T. Majewskim i M. Skuzą), które zostały wydane w roku 2006 jako skrypt uczelniany w Wydawnictwie Politechniki Gdańskiej (Załącznik 5, poz. III.I.1). Za swoją działalność dydaktyczną otrzymałem nagrody Rektora Politechniki Gdańskiej: indywidualną 2 stopnia (rok akademicki 2000/2001), indywidualną 1 stopnia (rok akademicki 2001/2002) oraz zespołową 3 stopnia (rok 2006).

## **7. Działalność organizacyjna, współpraca naukowa i popularyzacja nauki**

W latach 2005-2008 byłem członkiem Rady Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska. Brałem udział w pracach zespołu ds. opracowania strategii rozwoju Wydziału (lata 2008-2009). Angażuję się w liczne obowiązki wykonywane na rzecz Katedry. Byłem osobą odpowiedzialną za informacje o planach pobytów pracowników Katedry (do roku 2009).

Od roku 2013 jestem odpowiedzialny za przydzielanie zajęć dydaktycznych pracownikom Katedry. Zajmuję się także oprogramowaniem oraz zakupami sprzętu komputerowego. Od roku 2001 jestem zatrudniony w Centrum Informatycznym Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej (CI TASK), gdzie pełnię funkcję konsultanta ds. oprogramowania stosowanego w mechanice i inżynierii lądowej (Abaqus, programy firmy MSC, a ostatnio Ansys).

Biorę aktywny udział w konferencjach naukowych (Załącznik 5, poz. II.L oraz III.B). Uczestniczyłem w 9 konferencjach krajowych oraz 26 konferencjach międzynarodowych, na których wygłosiłem (łącznie) 35 referatów. Do ważniejszych konferencji cyklicznych, w których biorę udział, należą: Computational Modelling of Concrete Structures EURO-C (2006, 2010, 2014), Conference on Computer Methods in Mechanics CMM (2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2015) oraz Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures CFRAC (2007, 2013, 2015). Byłem także uczestnikiem cyklicznych konferencji Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures AMCM (2005, 2008, 2011) oraz Solid Mechanics Conference SolMech (2006, 2008).

W ramach programu Socrates-Erasmus byłem na 3-miesięcznym stypendium na Uniwersytecie Technicznym w Karlsruhe u prof. J. Eibla (Załącznik 5, poz. III.L.2). Odbyłem staże naukowe na Uniwersytecie w Dortmundzie i Uniwersytecie Technicznym w Kaiserslautern (Załącznik 5, poz. III.L.3 i III.L.4). Wziąłem udział w kursie o modelowaniu lokalizacji odkształceń prowadzonym przez prof. M. Jiráskę na Uniwersytecie Technicznym w Pradze (Załącznik 5, poz. III.L.5). Najważniejszym moim stażem było roczne stypendium PostDoc na Uniwersytecie Technicznym w Delft odbyte pod kierunkiem dr R. Brinkgreve'a i prof. L. Sluysa (Załącznik 5, poz. III.L.6). Współpracowałem także z dr. W. Minkley'em z Instytutu Geomechaniki Sp. z o.o. w Lipsku (Załącznik 5, poz. II.B.2).

Od roku 2009 wykonałem 6 recenzji artykułów dla czasopism międzynarodowych, w tym 3 dla czasopism z listy Journal Citation Reports (JCR): Journal of Civil Engineering and Management, Archives of Civil and Mechanical Engineering oraz Materials and Design (Załącznik 5, poz. III.P).