

AUTOREFERAT

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych z elementami życiorysu

Załącznik Nr 2

1. DANE PERSONALNE	2
2. WYKSZTAŁCENIE	2
3. INNE FORMY EDUKACJI.....	2
4. PRZEBIEG PRACY ZAWODOWEJ	3
5. PRZEBIEG PRACY NAUKOWEJ	4
6. WYKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO STANOWIĄCEGO PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO	4
6.1. Syntetyczny opis osiągnięcia naukowego.....	4
6.2. Wkład w rozwój dyscypliny „ochrona i kształtowanie środowiska”	10
7. OSIĄGNIĘCIA W DZIAŁALNOŚCI NAUKOWO-BADAWCZEJ.....	12
7.1. Kierunki badań i osiągnięcia naukowe przed uzyskaniem stopnia doktora	16
7.2. Kierunki badań i osiągnięcia naukowe po uzyskaniu stopnia doktora	17
7.2.1. Geotechniczne aspekty wykorzystania masowych odpadów do celów budownictwa ziemnego.....	18
7.2.2. Badania powierzchniowych ruchów masowych (stateczność zboczy)	23
7.2.3. Zastosowanie spektrometrii impedancyjnej (EIS) do monitoringu właściwości fizycznych gruntów naturalnych.....	30
7.2.4. Wpływ systemów korzeniowych roślin na wzmocnienie gruntu.....	31
8. PODSUMOWANIE	33

1. DANE PERSONALNE

Imię i nazwisko habilitanta	Tymoteusz Zydrón
Miejsce pracy	Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków

2. WYKSZTAŁCENIE

X.1994-VI.1999 r.	Magister inżynier Inżynierii Środowiska Jednolite studia magisterskie na Wydziale Inżynierii Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, kierunek Inżynieria Środowiska
XI.2003 r.	Doktor nauk rolniczych w zakresie Kształtowanie Środowiska Akademia Rolnicza im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemnego

3. INNE FORMY EDUKACJI

IX.2006 r.	Warsztaty Projektanta firmy Fatzer AG Geobrugg Protection Systems obejmujące system stabilizacji skarp i nasypów TECCO oraz koncepcję wymiarowania RUVOLUM - certyfikat uczestnictwa
IX.2007 r.	Warsztaty Projektanta firmy Fatzer AG Geobrugg Protection Systems obejmujące system stabilizacji skarp i nasypów TECCO oraz koncepcję wymiarowania RUVOLUM - certyfikat uczestnictwa
X.2008 r.	Tygodniowy staż dydaktyczno-naukowy w Turynii (Niemcy) w ramach Programu Unii Europejskiej „Uczenie się przez całe życie” Leonardo da Vinci, pn. „Nowoczesne kształcenie akademickie w zakresie gospodarki wodno-ściekowej na obszarach wiejskich” - certyfikat.
X.2010 r.	Tygodniowy staż dydaktyczno-naukowy w Turynii (Niemcy) w ramach Programu Unii Europejskiej „Uczenie się przez całe życie” Leonardo da Vinci, pn. „Gospodarka wodna na obszarach wiejskich. Dyrektywa wodna ” - certyfikat.
IV. 2012 r.	Uczestnictwo w wykładach Międzynarodowego Seminarium Geotechnicznego nt. EBGeo – Zalecenia dla geotechnicznego projektowania budowli ziemnych ze zbrojeniem geosyntetycznym - zaświadczenie
X.2011 – VI.2012 r.	Studium Pedagogiczne dla nauczycieli akademickich w Centrum Pedagogiki i Psychologii Politechniki Krakowskiej – dyplom ukończenia
III-XI.2014 r.	Specjalistyczny kurs języka angielskiego oraz indywidualne konwersacje w Szkole Języków Poliglota w ramach projektu „Wzmocnienie potencjału dydaktycznego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego – zaświadczenie

XI. 2014 r	Szkolenie z wykorzystania produktów LiDAR w ramach realizacji projektu Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami - certyfikat
XII. 2014 r.	„Warsztaty specjalistyczne kształcące umiejętności pracy z grupą” w ramach projektu „Wzmocnienie potencjału dydaktycznego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego – zaświadczenie
V.2015 r.	Udział w szkoleniu „Aplikacja i produkty projektu Systemu Osłony Przeciwoświatowej oraz ich wykorzystanie” - certyfikat
XI.2016 r.	Uczestnictwo w Seminarium Naukowo-Technicznym pt. Badania podłoża gruntowego sondą statyczną. Sprzęt, jakość, interpretacja – certyfikat.
IV.2017 r.	Warsztaty Szkoła Mikropali. Tematyka szkolenia obejmowała: <ul style="list-style-type: none"> • systemy do wykonywania mikropali, kotew i gwoździ gruntowych, • możliwości wykorzystania systemów geotechnicznych w budownictwie i inżynierii, • aspekty projektowania systemów geotechnicznych mikropali, kotew i gwoździ gruntowych. Certyfikat uczestnictwa
V-VI.2017 r.	Zagraniczny staż w ramach programu Erasmus+ na Uniwersytecie Technicznym w Brnie, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Budowli Wodnych – zaświadczenie.
VII.2017 r.	Zagraniczny staż naukowy na Uniwersytecie Technicznym w Brnie, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Budowli Wodnych – zaświadczenie.
V.2018 r.	Warsztaty projektowe Szkoła Mikropali. Tematyka szkolenia obejmowała: <ul style="list-style-type: none"> • mikrofale i fundamenty mikropalowe, • konstrukcje gwoździowane i stateczność skarp, • kotwione obudowy wykopów, • wstęp do projektowania z wykorzystaniem modelowania numerycznego. Certyfikat uczestnictwa

4. PRZEBIEG PRACY ZAWODOWEJ

1998-2004 r.	Pracownik laboratorium chemicznego w Miejskim Przedsiębiorstwie Energetyki Ciepłej Sp z o.o. w Brzesku
XI.2003-VII.2005 r.	Asystent naukowo-dydaktyczny Akademia Rolnicza im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego
VIII.2005 r. – IX.2009 r.	Adiunkt naukowo-dydaktyczny Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział inżynierii Środowiska i Geodezji, Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego
VIII.2005 r. – IX.2018 r.	Adiunkt naukowo-dydaktyczny Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
X.2018 r. – nadal	Adiunkt naukowy Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki

5. PRZEBIEG PRACY NAUKOWEJ

28.06.1999 r.	Obrona pracy magisterskiej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej w Krakowie, pt.: „Badania zagęszczalności odpadów powęglowych w różnowymiarowych aparatach Proctora” Promotor: dr inż. Piotr Michalski
14.XI.2003 r.	Publiczna obrona rozprawy doktorskiej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej w Krakowie, pt.: „Wpływ uziarnienia i zagęszczenia gruntów antropogenicznych na ich parametry geotechniczne” Promotor: prof. dr hab. inż. Krystyna Skarżyńska Recenzenci: prof. dr hab. Kazimierz Pietrzyk (Politechnika Krakowska) dr hab. inż. Eugeniusz Zawisza (Akademia Rolnicza w Krakowie).

6. WYKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO STANOWIĄCEGO PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

Osiągnięciem naukowym wynikającym z artykułu 16, ustęp 2, ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r., nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) jest rozprawa:

Zydroń T., 2019. Wpływ systemów korzeniowych wybranych gatunków drzew na przyrost wytrzymałości gruntu na ścinanie. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego im Hugona Kołłątaja w Krakowie nr 546. Rozprawy z. 423. ISSN 1899-3486.

Redaktor Naukowy:

Prof. dr hab. inż. Józef Hernik

Recenzja wydawnicza:

Dr hab. inż. Jan Gaszyński, prof. PK (Politechnika Krakowska),

Dr hab. inż. Grzegorz Kaczor (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie).

6.1. Syntetyczny opis osiągnięcia naukowego

Stateczność skarp i zboczy jest jednym z najważniejszych zagadnień z zakresu geotechniki i geologii inżynierskiej, które ma istotne znaczenie przy projektowaniu różnego typu budowli ziemnych jak i przy ocenie podatności zboczy na ruchy masowe. Wśród czynników biernych, mających wpływ na stateczność zboczy, wymieniana jest budowa litologiczna i strukturalna terenu, warunki morfologiczne. Czynnikiem aktywnymi, zmiennymi w czasie, są natomiast: morfologia terenu (jako pochodna ruchów masowych), warunki meteorologiczne, hydrologiczne, florystyczne oraz działalność człowieka (czynniki antropogeniczne). Jak zauważają Zabuski i in. [1999]¹ obecnie na warunki stateczności zboczy największym wpływ mają czynniki aktywne.

¹ Zabuski L., Thiel K., Bober L. (1999) Osuwiska we fliszu Karpat polskich: geologia – modelowanie – obliczenia stateczności, Wyd. Instytut Budownictwa Wodnego PAN, Gdańsk.

Czynnikiem aktywnym, którego rola w przeciwdziałaniu ruchom masowym jest coraz powszechniej dostrzegana i wykorzystywana w praktyce inżynierskiej, jest pokrywa roślinna. Powszechnie istnieje pogląd, że tereny zalesione są obciążone mniejszym ryzykiem wystąpienia ruchów masowych, a pozytywna rola roślinności przypisywana jest ich systemom korzeniowym. Pierwsze badania dotyczące ilościowej oceny wpływu roślin na wytrzymałość gruntu na ścinanie, a w dalszej konsekwencji na stateczność zboczy, zapoczątkowane zostały w połowie ubiegłego wieku, a znaczący wzrost zainteresowania nauki tym zagadnieniem to w zasadzie początek obecnego wieku. Zagadnienie dotyczące właściwości wytrzymałościowych systemów korzeniowych roślin i ich wpływu na warunki stateczności zboczy jest złożone, wynikające z oddziaływania wielu czynników środowiskowych, co powoduje, że uzyskane wyniki badań są czasami zróżnicowane i trudne do jednoznacznej interpretacji [Reubens i in. 2007²]. Duża bioróżnorodność gatunków roślin spotykana w środowisku powoduje również, że wiedza o ich wpływie na wzmocnienie gruntu jest mocno ograniczona i dlatego wciąż uzasadniona jest potrzeba prowadzenia badań systemów korzeniowych roślin. W Polsce do tej pory powstało niewiele publikacji dotyczących wpływu roślin na stateczność zboczy i skarp, jednak zasadniczo przytaczają one dane z literatury zagranicznej, dotyczą awarii budowlanych związanych z oddziaływaniem roślinności na budowlę lub mają charakter teoretyczny, a nie są efektem bezpośrednich pomiarów systemów korzeniowych.

Celem pracy było określenie wpływu systemów korzeniowych wybranych gatunków drzew występujących na terenie polskich Karpat fliszowych na zwiększenie wytrzymałości gruntu na ścinanie.

W literaturze anglojęzycznej efekt wzmocnienia gruntu przez korzenie roślinne określany jest terminem „root cohesion” i zgodnie z koncepcją zaproponowaną przez Wu [1976] oraz Waldrona [1977] wyraża on różnicę pomiędzy wytrzymałością na ścinanie kompozytu grunt z korzeniami, a wytrzymałością gruntu. W literaturze polskiej parametr ten określany jest terminem wzrost wytrzymałości na ścinanie (gruntu) dzięki ukorzenieniu [Najder 2003, Jeż 2008], a dla uproszczenia opisu wyników badań użyto również pojęcie przyrost wytrzymałości gruntu na ścinanie.

Dla realizacji celu pracy przeprowadzone zostały kompleksowe badania terenowe, laboratoryjne oraz obliczenia analityczne.

Zakres badań terenowych obejmował określenie powierzchni względnej (A_r/A) systemów korzeniowych ośmiu gatunków drzew:

- brzoza brodawkowata (*Betula verrucosa* EHRH.),
- buk zwyczajny (*Fagus sylvatica* L.),
- grab pospolity (*Carpinus betulus* L.),
- jodła pospolita (*Abies alba* Mill.),
- klon jawor (*Acer pseudoplatanus* L.),

² Reubens B., Poesen J., Danjon F., Geudens G., Muys B. (2007) The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees*, 21, 385-402

- robinia akacjowa (*Robinia pseudocacia*),
- sosna pospolita (*Pinus sylvestris* L.),
- świerk pospolity (*Picea abies* L.).

Do określenia powierzchni względnej korzeni zastosowano metodę profilowania ścian wkopu w odległości około 1,0 m od drzewa. Szerokość wkopów wynosiła około 1,0 m, a ich głębokość uzależniona była od warunków gruntowych, przede wszystkim obecności okruchów i bloków skalnych, głębokości występowania korzeni i mieściła się w zakresie od 0,6 do 1,0 m p.p.t. Po przygotowaniu ścian wkopu profil dzielono na pionowe warstwy o wysokości 0,1 m w obrębie których mierzono średnice korzeni. Przy pomiarach pomijano korzenie o średnicy mniejszej od 1 mm, a w obliczeniach powierzchni względnej nie uwzględniano korzeni o średnicy większej od 10 mm, co jest zgodnie z powszechnie stosowaną metodyką tego typu badań [Bischetti i in. 2009³, 2016⁴, Vergani i in. 2014⁵]. Pomiarów te wykonane zostały w miejscowościach Bieśnik (jodła pospolita), Ropica Polska (brzoza brodawkowata, robinia akacjowa) i Szymbark (brzoza brodawkowata, buk zwyczajny, grab pospolity, jodła pospolita, klon jawor, sosna pospolita, świerk pospolity) koło Gorlic (Beskid Niski) na terenach objętych nieplanowaną gospodarką leśną. Wyniki pomiarów analizowano pod względem rozkład korzeni w gruncie w zależności od jego głębokości, gatunku drzewa, jego wieku (lub rozmiaru) oraz położenia względem części nadziemnej drzewa. Celem określenia rozkładu korzeni w profilu gruntowym zastosowano równanie Gale i Grigal'a [1987⁶], określono również parametry modelu RDM (Root Distribution Model)⁷, który wykorzystuje się do określenia liczby i średnicy korzeni w zależności od średnicy drzewa i odległości od niego.

Badania laboratoryjne obejmowały badania wytrzymałości na rozciąganie korzeni pobranych w trakcie prac terenowych. Próbkę przed badaniem poddawano nasyceniu wodą przez okres co najmniej jednej doby, a po wyjęciu z wody rozciągano w zrywarce celem ustalenia ich wytrzymałości na rozciąganie oraz elastyczności. Analizując wyniki badań określałem zależność wytrzymałości na rozciąganie korzeni od ich średnicy, różnice wytrzymałości pomiędzy gatunkami oraz zmienność tego parametru w obrębie analizowanych gatunków.

Wyniki pomiarów powierzchni względnej systemów korzeniowych oraz wytrzymałości na rozciąganie korzeni posłużyły do obliczenia wartości przyrostu wytrzymałości gruntów na ścinanie (root cohesion). W tym celu zastosowano klasyczny model obliczeniowy Wu-

³ Bischetti G.B., Chiaradia E.A., Epis T., Morlotti E. (2009). Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant and Soil*, 324, 71-89

⁴ Bischetti GB, Bassanelli C, Chiaradia EA, Minotta G, Vergani C. (2016) The effect of gap openings on soil reinforcement in two conifer stands in northern Italy. *Forest Ecology and Management*, 359, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.014>

⁵ Vergani C., Chiaradia E. A., Bassanelli C., Bischetti G. B. (2014) Root strength and density decay after felling in a Silver Fir-Norway Spruce stand in the Italian Alps. *Plant Soil*, 377, 63–81

⁶ Gale M.R., Grigal D.F. (1987) Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status. *Canadian Journal of Forest Research*, 17, 829-834

⁷ Schwarz M. Cohen D., Or D. (2012) Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study. *Geomorphology*, 171-172. 190-200

Waldrona oraz dwa typy modeli wiązkowych, tzn. statyczne (Fiber Bundle Models⁸ - FBM1, FBM2, FBM3) oraz odkształceniowe (Root Bundle Models⁹- RBM1, RBM2, mRBM1). W przypadku modeli statycznych istnieją występują trzy założenia odnośnie sposobu dystrybucji siły rozciągającej na korzenie:

- proporcjonalnie do pola powierzchni ich przekroju poprzecznego (FBM1),
- proporcjonalnie do ich średnicy (FBM2),
- proporcjonalnie do liczby korzeni w wiązce (FBM3).

W przypadku modeli odkształceniowych wartość siły dystrybuowanej na poszczególne korzenie jest uzależniona od przemieszczenia wiązki korzeniowej, przy czym długość oraz wartości parametrów odkształceniowych i wytrzymałościowych poszczególnych korzeni są uzależnione od ich średnicy. Model RBM1 i RBM2(RBMw)⁹ zakładają, że zniszczenie korzeni spowodowane jest zerwaniem lub ich wyciąganiem z gruntu, przy czym w modelu RBM2 uwzględnia się prawdopodobieństwo zniszczenia poszczególnych korzeni w trakcie przemieszczania wiązki korzeniowej, które opisane jest funkcją przeżywalności Weibulla. Z kolei model mRBM1, w odróżnieniu od modelu RBM1, uwzględnia dwa możliwe mechanizmy zniszczenia korzeni (zrywanie i wyciąganie). Należy zaznaczyć, że model mRBM1 stanowi autorską modyfikację modelu wiązkowego zaproponowanego przez Schwarz'a i in. [2010]¹⁰. W obliczeniach tych przyjęto zgodnie z koncepcją zaproponowaną Schmidt'a i in. [2001]¹¹, że korzenie pełnią rolę zbrojenia bocznego (lateral root reinforcement).

Formę weryfikacji obliczeń przyrostu wytrzymałości na ścinanie za pomocą modeli teoretycznych stanowiła analiza stateczności, którą wykonałem dla 8 osuwisk powstałych w 2010 roku na terenie Pogórza Ciężkowickiego i Wiśnickiego na terenach leśnych. Obliczenia te zostały wykonane metodą równowagi granicznej dla przestrzennego modelu zbocza zgodnie z metodyką zaproponowaną w pracach Schmidt'a i in. [2001], Chiaradia i in. [2012]¹².

Wyniki pomiarów powierzchni względnej korzeni w profilu wykazały, zgodnie z oczekiwaniami, że liczba korzeni w profilu gruntowym i ich powierzchnia względna charakteryzuje się dużą zmiennością, niemniej możliwe jest wskazanie gatunków drzew, których system korzeniowy będzie stanowił istotne wzmocnienie gruntu. Wykazano, że wartości powierzchni względnej korzeni badanych gatunków drzew o średnicach 1-10 mm wynoszą maksymalnie 0,8% blisko powierzchni gruntu i maleją wraz ze wzrostem głębokości, osiągając na głębokości 0,5–1,0 m wartości o co najmniej o jeden rząd wielkości mniejsze niż przy powierzchni. Uśrednione wartości powierzchni względnej korzeni w obrębie profilu

⁸ Mao Z., Saint-Andr L., Genet M., Mine F-X., Jourdan Ch., Rey H., Courbaud B., Stokes A. (2012). Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. *Ecological Engineering*, 45, 55-69.

⁹ Schwarz M., Giadrossich F., Cohen D. (2013) Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 4367-4377

¹⁰ Schwarz M., Cohen D., Or D. (2010) Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. *Journal of Geophysical Research*, 115, F04035, doi:10.1029/2009JF001603

¹¹ Schmidt K.M., Roering J.J., Stock J.D., Dietrich W.E., Montgomery D.R., Schaub T. (2001). The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 995-1024

¹² Chiaradia E.A., Bischetti G.B., Vergani C. (2012) Incorporating the effect of root systems of forest species into spatially distributed models of shallow landslides. *International Journal of Forest, Soil and Erosion*, 2 (3), 107–118.

wyniosły od 0,05 do 0,13% odpowiednio dla sosny pospolitej i buka zwyczajnego. Z kolei jeśli w pomiarach powierzchni względnej uwzględnimy wszystkie korzenie o średnicy większej od 1 mm, najbardziej rozwiniętym systemem korzeniowym charakteryzuje się robinia akacjowa ($A_r/A=0,68\%$), a najmniej brzoza brodawkowata ($A_r/A=0,22\%$). Pomierzone wartości powierzchni względnej korzeni są stosunkowo małe w stosunku do wartości tego parametru podawanej w literaturze, co prawdopodobnie ma związek z dużą zwięzłością (spoistością) gruntów podłoża oraz obecnością w nim dużej liczby okruchów skalnych. Wyniki obliczeń parametru funkcji Gale-Grigala wskazują, że rozkład korzeni w profilu gruntowym jest bardzo podobny dla badanych gatunków, za wyjątkiem jodły pospolitej z Bieśnika i grabu pospolitego. Wartości tego parametru dla większości gatunków mieszczą się w stosunkowo wąskim zakresie od 0,95 do 0,975. Najbardziej równomierną dystrybucją korzeni w profilu charakteryzują się systemy korzeniowe jodły pospolitej z Szymbarku, buka zwyczajnego, robinii akacjowej oraz sosny pospolitej. Wyrwykowe pomiary systemu korzeniowego grabu pospolitego, robinii akacjowej i świerka pospolitego powyżej i poniżej pni nie wykazały występowania asymetrii w rozwoju systemu korzeniowego na analizowanych zboczach, co prawdopodobnie miało związek ze stosunkowo niewielkim nachyleniem zboczy w pobliżu analizowanych drzew. Biorąc pod uwagę liczbę korzeni, ich rozkład w profilu gruntowym oraz powierzchnię względną najbardziej optymalne z punktu widzenia stateczności wydają się być systemy korzeniowe buka zwyczajnego oraz robinii akacjowej, co potwierdza wyniki dotychczasowych badań.

Badania wytrzymałości na rozciąganie wykazały, że korzenie analizowanych gatunków drzew charakteryzują się zróżnicowaną wytrzymałością, która jest statystycznie istotnie związana ze średnicą korzeni. Wykazano, że średnica korzeni pozwala w 77–91% wyjaśnić zmienność uzyskanych wartości siły zrywającej, natomiast znacznie mniejszą korelację (współczynnik determinacji $R^2=0,12-0,51$) stwierdzono pomiędzy wartościami wytrzymałości na rozciąganie, a średnicą korzeni. Spośród badanych gatunków drzew dużą wytrzymałością na rozciąganie wykazały korzenie buka zwyczajnego i grabu pospolitego, małą korzenie drzew iglastych, a wśród drzew liściastych brzozy brodawkowatej. Analiza wyników badań wykazała również, że pomimo wysokiej korelacji pomiędzy wartościami siły rozciągającej a średnicą korzeni poszczególne gatunki drzew charakteryzują się dużą zmiennością wartości siły zrywającej korzenie i ich elastycznością. Dlatego też zmienność tej cechy opisano za pomocą funkcji przeżywalności Weibulla, a wartości parametru kształtu tej funkcji mieściły się w stosunkowo wąskim przedziale wartości dla korzeni analizowanych gatunków drzew, zbliżonym do wartości podanych w literaturze.

Wartości przyrostu wytrzymałości na ścinanie są w głównej mierze pochodną liczby i wielkości (średnic) korzeni występujących w profilu gruntowym oraz ich wytrzymałości na rozciąganie lub wyciąganie, ale także mogą wynikać z zastosowanej metody obliczeń (modelu obliczeniowego). Badania wykazały, że rozkład korzeni w gruncie oraz ich wytrzymałość na rozciąganie charakteryzują się dużą zmiennością, co pozwala na stwierdzenie, że zastosowanie typowych obliczeń geotechnicznych uwzględniających rolę systemów korzeniowych jest obarczone dużym ryzykiem przeszacowania ich wpływu na

wzmocnienie gruntu. Stąd też określając lub przyjmując do obliczeń projektowych przyrost wytrzymałości na ścinanie gruntu wzmocnionego korzeniami (root cohesion) należy zastosować podejście konserwatywne (ostrożne), uwzględniające najbardziej niekorzystne wartości tego parametru.

Wyniki badań wykazały, że wartości przyrostu wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami obliczone za pomocą modelu Wu-Waldrona w skrajnych przypadkach są trzykrotnie większe niż uzyskiwane przy zastosowaniu modeli wiązkowych. Ogólnie najbardziej konserwatywne wyniki obliczeń przyrostu wytrzymałości na ścinanie uzyskano stosując odkształceniowe modele wiązkowe: RBM2 (RBMw) lub mRBM1. Główną zaletą tych modeli jest możliwość określenia wielkości sił przenoszonych przez korzenie przy przemieszczeniu gruntu, co jest istotne biorąc pod uwagę różną charakterystykę odkształceniową tych dwóch materiałów. Model RBM2 uwzględnia zmienność charakterystyki wytrzymałościowej korzeni opisaną funkcją przeżywalności Weibulla i daje w większości przypadków najmniejsze wartości przyrostu wytrzymałości na ścinanie. Wyniki obliczeń otrzymane za jego pomocą są mało zależne od liczby korzeni w wiązce i z reguły stanowią 50% wartości przyrostu wytrzymałości na ścinanie określonej klasycznym modelem Wu-Waldrona. Z kolei drugi z modeli (mRBM1) uwzględnia uśrednione wartości parametrów wytrzymałościowych korzeni oraz możliwość równoczesnego występowania dwóch głównych mechanizmów niszczenia wiązki korzeniowej: zrywania i wyciągania korzeni z gruntu. Model ten dał najmniejsze wartości przyrostu wytrzymałości na ścinanie w przypadku korzeni buka zwyczajnego i grabu pospolitego, które charakteryzowały się dużą wytrzymałością na rozciąganie. Model ten wskazuje, że w powierzchniowej części profilu (do 0,2 m ppt.) dominującym sposobem niszczenia wiązki korzeniowej, przede wszystkim w przypadku drzew liściastych, będzie wyciąganie korzeni z gruntu. Model ten jednak wymaga znajomości znacznie większej liczby parametrów geometrycznych korzeni i parametrów geotechnicznych gruntów oraz charakteryzuje się dużą wrażliwością na dane wejściowe.

Zatem do oceny wpływu korzeni na wzrost wytrzymałości gruntu na ścinanie praktyczne wydaje się zastosowanie modelu RBM2, a dla uzyskania bezpiecznych wyników obliczeń w powierzchniowej części profilu można przyjmować wartości współczynnika kształtu funkcji Weibulla równego 1,0. Natomiast do wstępnej oceny wartości przyrostu wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami w sytuacji, gdy nie rozpatruje się właściwości odkształceniowych systemu korzeniowego i jego interakcji z gruntem, można stosować model Wu-Waldrona, przy czym obliczone za jego pomocą wartości przyrostu wytrzymałości na ścinanie należałoby korygować zmniejszając je o połowę.

Wyniki badań wskazują, że najbardziej korzystne właściwości z punktu widzenia stateczności mają systemy korzeniowe buka zwyczajnego i grabu pospolitego, których maksymalny efekt wzmocnienia gruntu w obrębie profilu gruntowego do głębokości 0,5 m nie przekracza zwykle 30 kPa, a do głębokości 1 m – 20 kPa. Najmniejszy wpływ na wzmocnienie zbroca wywierają systemy korzeniowe drzew iglastych, które zwiększają wytrzymałość gruntu na ścinanie zwykle nie więcej niż 5 kPa. Wartości te w dużej części pokrywają się z zakresem wartości przyrostu wytrzymałości na ścinanie uzyskiwanych z

badań bezpośredniego ścinanie, wynikami obliczeń stateczności podanymi w literaturze oraz wynikami przeprowadzonej analizy stateczności. Podkreślić jednak należy, że przy powierzchni gruntu (0,0–0,2 m p.p.t.) przyrost wytrzymałości na ścinanie może dochodzić nawet do ponad 100 kPa (przeciętnie od 5 do 40 kPa w zależności od gatunku drzewa) i maleje z głębokością osiągając wartości bliskie zeru lub kilku kPa na głębokości 0,8–1,0 m. Dlatego też czynniki te powinny być uwzględnione w analizach stateczności zboczy na terenach zalesionych, a przy doborze wartości przyrostu wytrzymałości gruntu na ścinanie (c_r) wskazówkę mogą stanowić wyniki badań uzyskane w ramach niniejszej pracy.

Jak zauważają Chiaradia i in. [2016]¹³ nie istnieją absolutnie najlepsze gatunki drzew z punktu widzenia wzmocnienia zboczy, ponieważ przydatność do tego celu zależy nie tylko od „technicznej” charakterystyki systemu korzeniowego, ale wynika również ze zdolności gatunku do rozwoju w danych warunkach siedliskowych. Przykładem w pracy są wyniki pomiarów systemu korzeniowego jodły pospolitej, która w różnych siedliskach charakteryzowała się bardzo zróżnicowaną rozkładem korzeni w profilu. Wyniki pomiarów wykazały również, że obecność płytko położonego zwierciadła wody gruntowej nie sprzyja głębokiej penetracji korzeni w grunt.

Przeprowadzona w pracy analiza przedmiotowej literatury wskazuje, że metody pomiarów systemów korzeniowych drzew, a także ich interpretacja są bardzo różne m.in. pod względem głębokości rozpoznania profilu gruntowego, szerokości wkopów badawczych, ich odległości od drzew, co często ogranicza możliwości porównania wyników badań. Wskazuje to na potrzebę usystematyzowania tego typu badań, a dla tego celu można wykorzystać model dystrybucji korzeni (RDM), który może być zintegrowany z dowolnym odkształceniowym modelem wiązkowym (RBM). Połączenie tych modeli obliczeniowych umożliwi określenia zakresu wzmocnienia gruntu wokół drzew, a informacja ta może być wykorzystana przy planowaniu zabiegów bioinżynierskich na terenach narażonych na powierzchniowe ruchy masowe. Funkcjonalność tego rozwiązania można zwiększyć uwzględniając w obliczeniach dynamikę rozwoju roślin, co wymaga dalszego prowadzenia tego typu badań w celu pozyskania większej ilości danych.

6.2. Wkład w rozwój dyscypliny „ochrona i kształtowanie środowiska”

Problematyka przedstawiona w moim osiągnięciu naukowym jest zagadnieniem złożonym, istotnym z punktu widzenia problematyki stateczności zboczy i ograniczania negatywnych skutków ruchów masowych. Za najważniejsze osiągnięcia mojej pracy uważam:

1. Otrzymane wyniki badań systemów korzeniowych drzew pod kątem wzmocnienia gruntu występującego w zasięgu korzeni są nowatorskie w skali naszego kraju. Wyniki badań systemów korzeniowych jodły pospolitej, klonu-jawora, brzozy brodawkowatej i grabu pospolitego są w zasadzie pierwszymi w skali światowej, a wyniki badań wpływu

¹³ Chiaradia E.A., Vergani C., Bischetti G.B., (2016) Evaluation of the effects of three European forest types on slope stability by field and probabilistic analyses and their implications for forest management. *Forest Ecology and Management*, 370, 114–129

systemu korzeniowego sosny zwyczajnej na wzmocnienie gruntu opublikowane zostały dopiero w 2017 roku [Vergani i in. 2017].¹⁴

2. Wykazanie, że grunty zwięzłe-spoiste wpływają na ograniczenie wzrostu systemu korzeniowego roślin. Otrzymane wartości powierzchni względnej korzeni są wyraźnie mniejsze niż podaje się w literaturze tego tematu, a dystrybucja korzeni w profilu w takich warunkach gruntowych była bardzo podobna pomiędzy badanymi gatunkami drzew. Wykazano, że silnie rozwiniętym systemem korzeniowym charakteryzuje się buk zwyczajny oraz robinia akacjowa, a sosna zwyczajna posiada słabo rozwinięty system korzeniowy.
3. Wykazanie, że korzenie drzew iglastych charakteryzują się wyraźnie mniejszą wytrzymałością na zrywanie niż korzenie drzew liściastych. Stwierdzono, że wartości siły zrywającej przenoszone przez korzenie są dobrze skorelowane z ich średnicą.
4. Wykazanie, że mechanizm współpracy korzeni z gruntem może obejmować zjawisko zrywania jak i wyciągania korzeni, co jest związane z właściwościami mechanicznymi ośrodka gruntowego, a także długością i średnicą korzeni oraz ich cechami wytrzymałościowymi. Wykazano, że przy powierzchni terenu będzie dominować proces wyciągania korzeni z gruntu.
5. Wykazanie istotnego związku pomiędzy wielkością wzmocnienia, a głębokością w profilu gruntowym. Wielkość wzmocnienia przy powierzchni gruntu (0,0-0,2 m ppt) może przekraczać ponad 100 kPa i maleje liniowo lub logarytmicznie wraz z głębokością osiągając na głębokości 1,0 m p.p.t. wartości mniejsze niż 10 kPa.
6. Dla badanych gatunków drzew zaproponowałem wartości parametrów obliczeniowych modelu RDM pozwalające określić związek pomiędzy liczbą i średnicą korzeni, a odległością od pnia, co umożliwi określania wielkości wzmocnienia gruntu korzeniami w zależności od gatunku drzewa oraz jego średnicy. Zależności te można wykorzystać do prognozowania stateczności zboczy na terenach zalesionych, a także mogą być pomocną przesłanką przy planowaniu zadrzewień terenów lub obiektów narażonych na ruchy masowe.
7. Zaproponowałem dwie metody określania wzmocnienia gruntu przez korzenie w zależności od potrzeb prowadzonych badań. W przypadku wstępnego określenia roli systemów korzeniowych drzew na zwiększeniu wytrzymałości gruntu na ścinanie można z powodzeniem stosować klasyczny model Wu-Waldrona korygując jednak otrzymaną wartość o połowę. W bardziej złożonych analizach uzasadnione jest stosowanie odkształceniowego modelu wiązkowego uwzględniającego prawdopodobieństwo niszczenia korzeni w zależności od ich przemieszczenia.

¹⁴ Vergani C., Werlen M., Conedera M., Cohen D., Schwarz M. (2017) Investigation of root reinforcement decay after a forest fire in a Scots pine (*Pinus sylvestris*) protection forest. *Forest Ecology and Management*, 400, 339–352

7. OSIĄGNIĘCIA W DZIAŁALNOŚCI NAUKOWO-BADAWCZEJ

Mój dorobek naukowy i inżynierski obejmuje 144 pozycje, w tym 84 opublikowane, recenzowane prace naukowe [zał. 4: A.1.1, A.2.1, B.1.1 - B.1.9, B.2.1-B.2.74], 3 publikacje o charakterze popularno-naukowym [zał. 4: B.3.1-B.3.3] i 7 opracowań nieopublikowanych, których byłem autorem lub współautorem i wykonawcą badań [zał. 4: praca magisterska; rozprawa doktorska; A.3.1, B.5.17, B.5.23-5.24, B.5.26-B.5.27] oraz 28 opracowań nieopublikowanych, w których byłem wykonawcą badań geotechnicznych [zał. 4: A.3.1., B.5.1 - B.5.16, B.5.18-5.22, B.5.25, B.6.1-B.6.5]. Byłem również wykonawcą badań, a także opracowywałem sprawozdania końcowe (13 opracowań) z prac badawczych finansowanych ze środków budżetowych na badania statutowe mojej jednostki naukowej w latach 2005-2018 [zał. 4: B.4.1 - B.4.6].

Były to głównie prace zespołowe, z których 83 jako prace twórcze opublikowałem w 24 czasopismach i wydawnictwach naukowych, z tego 29 artykułów ukazało się w języku angielskim (tab. 1 i 2). Łączna suma punktów według punktacji MNiSW za oryginalne prace twórcze wyniosła 546 (do dnia 31 grudnia 2018 r.).

W okresie przed uzyskaniem stopnia doktora na mój dorobek składały się 2 opublikowane recenzowane prace naukowe [zał. 4: publikacje: A.1.1, A.1.2] oraz 2 prace nieopublikowane [zał. 4: praca magisterska; rozprawa doktorska]. Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora mój dorobek naukowo-badawczy powiększył się o 85 opublikowane prace, z czego 81 stanowiły oryginalne recenzowane prace twórcze zamieszczone w czasopismach naukowych [zał. 4: publikacje: B.1.1 - B.1.9, B.2.1 - B.2.73, B.3.1 - B.3.3]. W tym okresie, według punktacji MNiSW, suma moich punktów wyniosła 556. Spośród oryginalnych prac, 5 zostało opublikowanych w czasopismach indeksowanych w bazie Web of Science i posiadających współczynnik wpływu Impact Factor [zał. 4: publikacje: B.2.26, B.2.38, B.2.39, B.2.47, B.2.63], a jedna praca oczekuje na publikację [zał. 4: publikacja B.2.75]. Opublikowane prace indywidualne stanowią 10 pozycji [zał. 4: publikacje: B.1.1 - B.1.9, B.3.1].

Wyniki swoich badań prezentowałem w formie 17 referatów i 26 posterów na konferencjach i seminariach krajowych (8 referatów, 6 posterów) i międzynarodowych (5 referatów w języku angielskim, 19 posterów) [zał. 4: referaty - konferencje: C.1.2, C. 2.1, C.2.4, C.2.6, C.2.10., C.2.14-C.2.16, C.2.18, C.2.24, C.2.27, C.2.31, C.2.35, C.2.42, C.2.43, C.2.52, C.2.57(2x); postery - konferencje: C.2.13, C.2.19, C.22, C.2.25-C.2.29, C.2.31-C.2.33, C.2.34(2x), C.2.36(2x), C.2.38, C.2.40-C.2.41, C.2.48-C.2.50, C.2.51(2x), C.2.52, C.2.53, C.55(4x)] z tego 16 referatów i 26 posterów prezentowałem po uzyskaniu stopnia doktora.

Opublikowane artykuły według bazy Web of Science były cytowane 12 razy (tab. 3), a indeks Hirscha wynosi $h = 2$. Sumaryczny Impact Factor (IF) moich publikacji według listy Journal Citation Reports (JCR) wynosi $IF = 3,096$ [zał. 4: publikacje: B.2.26, B.2.38, B.2.39, B.2.47, B.2.63]. Natomiast według Google Scholar moje publikacje były cytowane 132 razy, a indeks Hirscha wynosi $h = 6$ (do dnia 1 marca 2019 r.).

Tabela 1. Syntetyczne zestawienie dorobku naukowego, wdrożeniowego i inżynierskiego

Wyszczególnienie	Przed doktoratem	Po doktoracie	Ogółem
Prace publikowane:			
▪ oryginalne prace twórcze w oparciu o badania własne	2	82	84
▪ artykuły popularno-naukowe	-	3	3
Razem	2	85	87
w tym prace:			
- w języku angielskim	0	29	29
- w innym języku kongresowym	-	-	-
- w materiałach konferencji krajowych	0	4	4
- w materiałach konferencji międzynarodowych	0	10	10
- indywidualne	1	8	9
- monografie, książki, skrypty	-	-	-
Prace nie publikowane:			
▪ rozprawy	2	-	2
▪ recenzje artykułów	0	9	9
▪ sprawozdania końcowe z badań	0	13	13
▪ prace projektowe, ekspertyzy, badania zamawiane, w tym:	1	32	33
- współautorstwo sprawozdania końcowego i wykonawca badań	0	5	5
- wykonawca badań	1	27	28
▪ granty	-	-	-
Razem	3	54	57
łącznie	5	138	144

Tabela 2. Zestawienie dorobku naukowego według oceny punktowej wykazu czasopism naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Wydawnictwo	Język publikacji ¹⁾	Liczba prac	IF ²⁾		Punkty wg MNiSW ³⁾	
			Czasopismo	Suma	Czasopismo	Suma
Czasopisma naukowe będące w bazie Journal Citation Reports (JCR) i indeksowane w bazie Web of Science						
Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska)	P	4	0,545 0,646 0,438 0,735	2,364	15	60
Applied Ecology and Environmental Research	A	1	0,685	0,685	15	15
Polish Journal of Environmental Studies*	A	1	1,144	1,144	-	-
Czasopisma naukowe nieposiadające współczynnika wpływu Impact Factor (IF), ale indeksowane w bazie Web of Science						
Acta Scientiarum Polonorum, seria Formatio Circumiectus (od 2015 r.)	A/P	8			10	80
Journal of Ecological Engineering	A	1			12	12
Czasopisma naukowe nieposiadające współczynnika wpływu Impact Factor (IF) i nieindeksowane w bazie Web of Science						
Acta Hydrologica Slovaca	A	1			1	5
Acta Scientiarum Polonorum, seria Architectura	A/P	4			11	44
Acta Scientiarum Polonorum, seria Formatio Circumiectus (do 2014 r.)	P	9			4/5	44
AGH Journal of Mining and Geoengineering	A	1			5	5
Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska – Polonia, Sectio B. Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia	A	1			4	4
Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation	A	3			9/14	37
Drogownictwo	P	2			5/6	11
Geologija	A	2			9	18
Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich	P	3			4/5	14

Inżynieria Ekologiczna	P	2			9	18
Inżynieria Morska i Geotechnika	P	7			3/4/6	30
Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej Geologia	P	1			4	4
Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej Górnictwo i Geoinżynieria	P	3			4/5/6	15
Polish Journal of Soil Science	A	1			14	14
Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria Środowiska	P	1			3	3
Przegląd Górniczy	P	1			9	9
Przegląd Komunikacyjny	P	2			8	16
Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW w Warszawie	P	2			0/2	2
Studia Geoetchnica et Mechanica	A	1			5	5
Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej, Seria Inżynieria Środowiska	P	3			0	0
Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, s. Budownictwo	P	1			2	2
Rozdziały w monografii, materiały konferencyjne						
Rozdziały w monografii	A/P	5			3/5/7	29
Publikacje w materiałach konferencyjnych	A/P	14			0/5	45
Publikacje w materiałach konferencyjnych zarejestrowane w Web of Science	A	1			5	5
RAZEM			3,096			546
¹⁾ język publikacji: P - polski, A - angielski; ²⁾ IF za okres pięciu lat zgodnie z Journal Citation Reports; ³⁾ punktacja MNiSW zgodna z rokiem opublikowania, * - artykuł po recenzjach zaakceptowany do druku						

Tabela 3. Zestawienie wyników cytowań (opracowanie Biblioteka Główna Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie)

Według bazy		Aktualna liczba prac indeksowanych	Aktualna liczba cytowań opublikowanych prac	Indeks Hirscha
<i>Web of ScienceTM Core Collection</i>	<i>Author Search</i>	15	12	2
	<i>Cited Reference Search</i>	28	56	4
<i>Scopus</i>	<i>Author Search</i>	11	5	1
<i>Publish or Perish - źródło danych Google Scholar</i>		64	132	6

W 2015 roku dla wydawnictwa CRC Press (Taylor & Francis Group) recenzowałem rozdział w monografii "Basics of open channel hydraulics, river training and fluvial geomorphology", a latach 2016-2018 recenzowałem 5 publikacji zgłoszonych do czasopism „Acta Scientiarum Polonorum, s. Formatio Circemiectus”, „Inżynieria Ekologiczna”, „Journal of Water and Land Development”, „Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych”, „Journal of Ecological Engineering” znajdujących się na liście „B” Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Jestem również autorem 3 recenzji artykułów zgłoszonych do czasopism indeksowanych w bazie Web of Science i posiadających współczynnik wpływu Impact Factor – „Science China Technological Sciences”, „Journal of Mountain Science” oraz „Plant and Soil”.

W roku 2013 byłem laureatem stypendium z Rektorskiego Funduszu Stypendialnego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, a w 2016 i 2017 r. otrzymałem Nagrodę indywidualną III° Rektora Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie za wybitne osiągnięcia w dziedzinie naukowej.

7.1. Kierunki badań i osiągnięcia naukowe przed uzyskaniem stopnia doktora

Przed uzyskaniem stopnia doktora byłem w latach 1999-2003 uczestnikiem studiów doktoranckich Akademii Rolniczej w Krakowie. W okresie tym moje badania naukowe dotyczyły oceny właściwości geotechnicznych gruntów gruboziarnistych, głównie nieprzepalonych odpadów powęglowych. Materiały te stanowią produkt uboczny powstający przy wydobyciu węgla kamiennego i zwykle składowane są na zwałowiskach, ograniczając tym samym powierzchnię terenu możliwą do wykorzystania dla innych celów oraz stanowią potencjalne źródło zagrożenia środowiska naturalnego. Badania moje prowadziłem w aspekcie oceny możliwości wykorzystania tych materiałów do celu budownictwa ziemnego i dotyczyły określenia parametrów zagęszczalności odpadów powęglowych oraz wpływu zastosowanej aparatury badawczej na wyniki oznaczeń tych parametrów. Parametry zagęszczalności gruntów budowlanych wpływają bezpośrednio na technologię formowania budowli ziemnych, a pośrednio wpływają również na inne parametry fizyczne i mechaniczne gruntów związane ze statecznością budowli ziemnych w trakcie eksploatacji. Z uwagi na nietypowe cechy tych gruntów (wysoka zawartość okruchów skalnych) materiały te wymagają zastosowania niestandardowej aparatury, która pozwala wykonać badania dla gruntu o naturalnym uziarnieniu albo jak najbardziej zbliżonym do niego. W trakcie zagęszczenia tego typu gruntów dochodzi też często do ich rozdrabniania, a intensywność tego procesu jest zależna od składu petrograficznego gruntu, jego uziarnienia, energii zagęszczania. Badania te prowadziłem dla nieprzepalonych odpadów powęglowych z Kopalń Anna, Sośnica, Szombierki poddanych uprzednio odzyskowi węgla w zakładach Haldex oraz także wykonywałem badania porównawcze dla gruntu naturalnego ze złoża rezerwy zapory ziemnej w Świnnej Porębie. Podsumowaniem tego okresu mojej działalności naukowo-badawczej była rozprawa doktorska nt. „Wpływ uziarnienia i zagęszczenia gruntów antropogenicznych na ich parametry geotechniczne”, w której zaproponowano kryteria

oceny podatności odpadów powęglowych na kruszenie mechaniczne, wskazano ograniczenia stosowania aparatury standardowej dla tego typu gruntów oraz wykazano związek pomiędzy uziarnieniem, a innymi cechami geotechnicznymi tych gruntów. Ważniejsze wyniki badań zamieściłem w publikacjach i wygłosiłem na konferencjach i seminariach naukowych [zał. 4: publikacje: A.1.1, A.2.1; konferencje: C.1.2].

W okresie studiów doktoranckich zajmowałem się również zagadnieniem stateczności budowli ziemnych wznoszonych z odpadów poenergetycznych, a wyniki tych prac zostały opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora [zał. 4: publikacja: B.2.1; konferencja C.2.1].

7.2. Kierunki badań i osiągnięcia naukowe po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora kontynuowałem moje zainteresowania naukowe związane z zagadnieniem dotyczącym możliwości zastosowania odpadów przemysłowych do celów szeroko pojętego budownictwa ziemnego, przy czym moje badania zostały rozszerzone o inne materiały odpadowe (odpady poenergetyczne, odpady hutnicze, odpady posodowe). W tym okresie pracy naukowo-badawczej zająłem się również problematyką stateczności zboczy naturalnych i skarp nasypów inżynierskich w aspekcie ich zagrożenia ruchami masowymi. Ogólnie po uzyskaniu stopnia doktora w obrębie moich zainteresowań naukowych można wyróżnić kilka zasadniczych tematów:

1. Geotechniczne aspekty wykorzystania masowych odpadów przemysłowych do celów budownictwa ziemnego.
2. Badania powierzchniowych ruchów masowych (stateczności zboczy).
3. Zastosowanie spektrometrii impedancyjnej (EIS) do monitoringu właściwości fizycznych gruntów naturalnych.
4. Wpływ systemów korzeniowych roślin na wzmocnienie gruntu.

Badania w zakresie wyżej podanych zagadnień wykonywałem samodzielnie lub w ramach współpracy z naukowcami z różnych dyscyplin naukowych. Współpracę naukowo-badawczą prowadziłem z pracownikami mojej Katedry, pracownikami m.in. Wydziału Rolno-Ekonomicznego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Marii Skłodowskiej-Curie w Lublinie, Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk, Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, a w przypadku zagranicznych ośrodków naukowych współpracowałem z pracownikami Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Uniwersytetu w Padwie, Katedry Geografii Fizycznej i Geoekologii Uniwersytetu w Ostrawie oraz Katedry Budowli Wodnych Uniwersytetu Technicznego w Brnie.

Poniżej przedstawiona została charakterystyka ważniejszych zagadnień będących przedmiotem moich zainteresowań naukowych.

7.2.1. Geotechniczne aspekty wykorzystania masowych odpadów do celów budownictwa ziemnego

Badania te prowadzone były dla różnych grup odpadów i obejmowały następujące zagadnienia:

- 1) zagęszczalność odpadów przemysłowych,
- 2) wpływ zagęszczania i wilgotności na parametry geotechniczne odpadów przemysłowych,
- 3) stateczność budowli ziemnych wznoszonych z odpadów przemysłowych,
- 4) możliwości zastosowania odpadów niebezpiecznych w budownictwie ziemnym,
- 5) zastosowanie geosyntetyków w konstrukcjach ziemnych z odpadów poenergetycznych,
- 6) stateczność skarp nasypów składowisk odpadów komunalnych.

Zagęszczalność odpadów przemysłowych

Badania zagęszczalności prowadziłem dla różnych grup odpadów. W przypadku odpadów powęglowych, które charakteryzują się zwykle dużą zawartością frakcji grubych, badania te wykonywałem w średniowymiarowym i standardowym aparacie Proctora (metoda ubijania). Wykazano, że istotny wpływ na wyniki oznaczeń parametrów ma wielkość uziarnienia wyrażona maksymalną średnicą ziaren. Wykazano, że wraz ze wzrostem wielkości uziarnienia zwiększa się wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i maleje wilgotność optymalna. Zależności te świadczą o potrzebie stosowania do badań gruntów gruboziarnistych aparatury średniowymiarowej, a w przypadku braku takiej aparatury badania te można wykonywać stosując aparaturę standardową, ale uzyskane wyniki należy korygować za pomocą zaproponowanych przeze mnie współczynników przeliczeniowych. Badania zagęszczalności odpadów powęglowych wykazały również, że typowym zjawiskiem towarzyszącym zagęszczaniu odpadów powęglowych jest ich rozdrobnienie, które powoduje uzupełnienie niedoboru frakcji drobnych. Ogólnie badania te wykazały, że odpady powęglowe charakteryzują się wysoką zagęszczalnością, odpowiednią z punktu widzenia potrzeb ich wykorzystania do celów budownictwa ziemnego [zał. 4: publikacje: **B.1.1, B.1.2, B.2.74**; konferencje: **C.2.3, C.2.6, C.2.10, C.2.57**].

Prowadziłem również badania zagęszczalności odpadów energetycznych: mieszaniny popioło-żuźlowej ze składowiska Elektrociepłowni „Łęg” w Krakowie oraz popiołów lotnych ze składowiska Elektrowni „Skawina”. Badania te wykonałem przy zastosowaniu metody ubijania oraz wibracyjnej. Zagęszczanie metodą ubijania przeprowadzono w standardowym aparacie Proctora stosując jednostkową energię zagęszczania o wielkości 0,59; 1,22 i 2,65 J·cm⁻³. Zagęszczanie metodą wibracyjną przeprowadzono w standardowym cylindrze aparatu Ve-Be na materiale powietrznie-suchym oraz wilgotnym. Wyniki badań wykazały, że w przypadku obu metod zagęszczenie materiału jest nieefektywne przy wilgotności zarówno mniejszej, jak i większej od optymalnej. W przypadku metody wibracyjnej największą zagęszczalność uzyskano dla materiału w stanie powietrzno-suchym. Ogólnie stwierdzono, że badane odpady spełniają wymogi stawiane mieszaninom popiołowo-żuźlowym stosowanym w budownictwie drogowym, a więc mogą stanowić materiał konstrukcyjny do wznoszenia nasypów budowlanych [zał. 4: publikacja **B.2.3**].

Badania zagęszczalności wykonywałem również dla gruboziarnistych odpadów hutniczych (kruszywo z żużla wielkopiecowego) oraz odpadów posodowych [zał. 4: publikacje B.2.9, B.2.13; konferencja C.2.14]. Oznaczenie parametrów zagęszczalności prowadzono metodą ubijania (aparatura Proctora) oraz metodą wibracyjną (stolik wibracyjny). W oparciu o otrzymane wyniki badań i ich analizę stwierdziłem, że wartości parametrów zagęszczalności kruszywa zależne były od zastosowanej metody zagęszczania oraz warunków badania. W przypadku metody wibracyjnej wykazano istotny wpływ wilgotności kruszywa, wielkości obciążenia, czasu wibracji oraz ilości i grubości zagęszczanych warstw na uzyskane wartości gęstości objętościowej szkieletu. Wykazałem, że zagęszczanie metodą wibracyjną pozwala uzyskać znacząco większe wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu niż zagęszczanie metodą ubijania w aparacie Proctora przy energii standardowej. Z drugiej strony wartości parametrów zagęszczalności uzyskane metodą wibracyjną są zbliżone do wartości odpowiednich parametrów uzyskanych metodą ubijania przy energii zmodyfikowanej. Wykazałem, że wibracyjna metoda zagęszczania gruboziarnistych gruntów antropogenicznych, do jakich zaliczamy odpady przemysłowe, odznacza się dużą efektywnością. Dlatego też metoda ta powinna być stosowana w badaniach laboratoryjnych do określania optymalnych parametrów zagęszczalności, a także do bieżącej kontroli jakości zagęszczenia nasypów inżynierskich budowanych z gruboziarnistych gruntów naturalnych lub antropogenicznych.

Badania zagęszczalności mieszanek odpadów posodowych [zał. 4: publikacja: B.2.10] pochodzących z Inowrocławskich Zakładów Sodowych „Soda-Mątwy” z popiołami lotnymi pochodzącymi z elektrocieplowni tych Zakładów prowadzono stosując metodę Proctora. Badania te wykazały, że mieszanki te charakteryzują się stosunkowo niedużymi wartościami maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu. Wartości te uzyskane dla mieszanek o pełnym uziarnieniu przy standardowej energii zagęszczania były równe lub nieco większe od wartości wymaganej dla gruntów przydatnych dla górnych i dolnych warstw nasypów drogowych. Nieduże wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu wynikają z dodatku popiołu lotnego, który jako materiał lekki wpływa na obniżenie wartości tego parametru badanych mieszanek.

Niezależnie od rodzaju badanych odpadów stwierdzono, że w metodzie ubijania (metoda Proctora) istotny wpływ na zagęszczalność tych materiałów ma energia zagęszczania. Wzrost energii zagęszczania powoduje znaczne zwiększenie wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz zmniejszenie wartości wilgotności optymalnej, które jest nieznaczne w przypadku kruszyw z żużla wielkopiecowego, a wyraźne w przypadku odpadów powęglowych, posodowych i energetycznych. Wyniki moich badań wykazały, że odpady powęglowe, hutnicze oraz odpady poenergetyczne charakteryzują się z reguły stosunkowo dobrą zagęszczalnością, odpowiednią z punktu widzenia potrzeb zastosowania ich do wznoszenia nasypów ziemnych dla celów budownictwa drogowego.

Wpływ zagęszczenia i wilgotności na parametry geotechniczne odpadów przemysłowych oraz stateczność budowli ziemnych wznoszonych z odpadów przemysłowych

W przypadku stosowania gruntów do celów budownictwa ziemnego podstawowe wymagania dotyczą odpowiedniego ich zagęszczenia. Najczęściej zagęszczenie to wykonuje się przy wilgotności optymalnej, niemniej warunki zewnętrzne (warunki meteorologiczne) powodują, że wilgotność materiału odpadowego znajdującego się w budowlu ziemnej jest zmienna w okresie jej eksploatacji. Stąd też część moich badań dotyczyła wpływu zagęszczenia i wilgotności na właściwości mechaniczne odpadów przemysłowych.

Jednym z możliwych kierunków utylizacji odpadów poenergetycznych jest m.in. wypełnienie obniżeń terenu. Zastosowanie odpadów przemysłowych jako podłoża budowlanego wymaga znajomości ich odkształcalności. Badania popiołów lotnych z Elektrociepłowni Inowrocławskich Zakładów Sodowych „Soda Mątwy” i Elektrociepłowni „Kraków” [zał. 4: publikacje: B.2.5, B.2.12] wykazały, że wartości modułów ścisłości pierwotnej są stosunkowo niskie i odpowiadają wartościom podawanym w literaturze dla gruntów spoistych w stanie plastycznym i miękkoplastycznym. Przy obciążeniu wtórnym popioły wykazują dużo mniejszą ścisłość niż przy obciążeniu pierwotnym. Zależność ta jest istotna z punktu widzenia stosowania tych materiałów w budownictwie ziemnym jako podłoża gruntowego, gdyż wskazuje, że wstępna konsolidacja popiołów stanowi jedną z metod ich wzmocnienia. Duże zagęszczenie popiołów wpływa na zmniejszenie wartości ich odkształceń w zakresie obciążeń pierwotnych i ogranicza wpływ nawodnienia na przebieg procesu konsolidacji oraz wartości modułów ścisłości i uzasadnia tym samym potrzebę ich wbudowywania przy wilgotności optymalnej dla uzyskania maksymalnego zagęszczenia.

W przypadku stosowania wszelkiego typu materiałów ziemnych do celów budownictwa drogowego jako materiału konstrukcyjnego nawierzchni drogowych ważna jest znajomość ich nośności oraz wytrzymałości na ściskanie. Przeprowadzone badania dla odpadów poenergetycznych [zał. 4: publikacje: B.2.19, B.39, B.2.65; konferencja: C.2.34] wykazały, że odpady te bezpośrednio po zagęszczeniu zasadniczo charakteryzują się stosunkowo dobrą nośnością, która ulega zmniejszeniu po nasączeniu ich wodą. Stąd też planując ich zastosowanie do celów budownictwa drogowego uzasadniona jest tym samym potrzeba ich ochrony przed dostępem wody. Z kolei wartości wytrzymałości na ściskanie popiołów lotnych pochodzących z kotłów fluidalnych wskazuje, że mogą być one stosowane do konstrukcji górnych i dolnych warstw podbudowy drogowej dla ruchu lekkiego i średniego.

W przypadku stosowania gruntów antropogenicznych do szeroko pojętego budownictwa ziemnego niezbędna jest znajomość parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie. Badania takie prowadziłem dla odpadów powęglowych [zał. 4: publikacje: B.1.3, B.2.58, B.2.74; konferencje: C.2.51, C.2.57] oraz odpadów poenergetycznych z Elektrociepłowni „Łęg”, Elektrowni „Skawina” i Elektrowni „Połaniec” [zał. 4: publikacje: B.2.3, B.2.6, B.2.8, B.2.26, B.2.30, B.2.38, B.2.39, B.2.45, B.2.51, B.2.65; konferencje: C.2.4, 2.24, C.2.28, C.2.34]. Wykazały one, że odpady powęglowe charakteryzują się wysokimi wartościami kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności, które

pozwalają prognozować wysoką stateczność budowli ziemnych z nich wznoszonych. Badania odpadów poenergetycznych (mieszanki popiołowo-żużlowe i popioły lotne) wykazały, że ich parametry wytrzymałościowe są ogólnie wysokie, niemniej wraz ze wzrostem wilgotności następuje ich wyraźne zmniejszenie, zwłaszcza w przypadku materiału o niskim zagęszczeniu. Obliczenia stateczności zintegrowane z obliczeniami infiltracji wykazały istotny wpływ wodoprzepuszczalności gruntów na warunki równowagi skarp nasypów wykonanych z mieszanin popiołowo-żużlowych. Wyniki analiz wykazały, że typowe nachylenie skarp nasypów 1:1,5 nie zawsze zapewnia zachowanie ich stateczności w przypadku gdy dochodzi do nasycenia mieszaniny. Zabiegi ograniczające możliwości nasycenia mieszaniny znacznie poprawiają stateczność skarp nasypu. Otrzymane wyniki wskazują zatem, że wyniki obliczeń stateczności skarp nasypów poddanych opadom są pochodną wytrzymałość na ścinanie jak i wodoprzepuszczalność analizowanego materiału konstrukcyjnego. Stąd też podejmując decyzję o przydatności tego typu materiałów do celów budownictwa ziemnego niezbędne jest indywidualna ocena ich właściwości geotechnicznych poprzedzona kompleksowymi badaniami ich parametrów fizycznych i mechanicznych.

Możliwości zastosowania odpadów niebezpiecznych w budownictwie ziemnym.

Dużym problemem środowiskowym w Polsce jest utylizacja odpadów cementowo-azbestowych. Problem ten szczególnie dotyczył gminy Szczucin (woj. małopolskie), na terenie której od lat 50-tych ubiegłego wieku odpady te były masowo wykorzystywane do utwardzania lokalnych dróg. Za względów ekonomicznych zaniechano usunięcie tych odpadów z nawierzchni drogowych, a za optymalny wybór uznano pozostawienie odpadów azbestowych w konstrukcji drogi i trwałe przykrycie ich szczelną warstwą z masy mineralno-bitumicznej. Z uwagi na obecność nietypowego materiału w warstwie podłoża, jaki stanowią odpady azbestowo-cementowe, celowym uznano ocenę jego nośności na wybranych odcinkach dróg w Gminie Szczucin [zał. 4: publikacja B.2.16]. Dla celów porównawczych przeprowadzono również badania na odcinkach dróg nie zawierających odpadów. Ocenę odkształcalności podłoża wykonano na podstawie badań lekką płytą dynamiczną, a otrzymane wartości dynamicznych modułów odkształcalności podłoża nawierzchni drogowej wskazały, że podłoże zawierające odpady azbestowe nie różni się pod względem nośności od podłoża nie zawierającego tego typu odpadów.

Zastosowanie geosyntetyków w konstrukcjach ziemnych z odpadów poenergetycznych

W przypadku stosowania materiałów geosyntetycznych jako warstw izolacyjnej w budowlach ziemnych istotne znaczenie ma ich odporność na przebicie. Badania takie wykonano dla wybranych geowłóknin igłowanych o zróżnicowanej gramaturze układanych na podłożu nieodkształcalnym (płytki aluminiowa) i odkształcalnym [zał. 4: publikacja B.2.29], które stanowiła mieszanina popiołowo-żużlowa o wskaźniku zagęszczenia $0,90 \div 1,00$. Wyniki badań wykazały, że wartości wytrzymałości na przebicie na podłożu nieodkształcalnym są zdecydowanie większe niż na podłożu odkształcalnym. Stwierdzono

również, że wzrost zagęszczenia podłoża wpływa na zmniejszenie wartości siły potrzebnej do przebiccia geosyntetyku.

W budownictwie ziemnym geosyntetyki stosowane są również do wzmocnienia gruntu w konstrukcjach oporowych w postaci równomiernie ułożonych wkładek. W przypadku tego typu rozwiązania istotne znaczenie mają opory tarcia występujące pomiędzy gruntem a zbrojeniem (geosyntetykiem). Przeprowadzono badania z wykorzystaniem mieszanin popiołowo-żużlowych pochodzących ze składowiska Elektrowni „Skawina” oraz Huty ArcelorMittal Poland w Krakowie [zał. 4: publikacje: B.2.30., B.2.45; konferencja: C.2.28] z wybranymi geowłókninami i geotkaninami. Na podstawie badań (metoda bezpośredniego ścinania) stwierdzono, że wartości oporu tarcia na kontakcie materiału zasypki a geosyntetykiem są wysokie, niemniej z reguły nieco mniejsze niż parametry wytrzymałości na ścinanie odpadów poenergetycznych. Stwierdzono, że otrzymane wyniki wskazują na dobrą współpracę odpadów poenergetycznych z analizowanymi geosyntetykami, wskazując tym samym na przydatność odpadów poenergetycznych w zastosowaniu ich w konstrukcjach ziemnych wykonywanych w technologii gruntu zbrojonego.

Stateczność skarp nasypów składowisk odpadów komunalnych.

Składowiska odpadów komunalnych są budowlami ziemnymi, które wymagają oceny stateczności, przy czym podstawowy problem przy tego typu obliczeniach stanowi dobór ich parametrów wytrzymałościowych. Przeprowadzona analiza literatury dotyczącej parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie odpadów komunalnych wykazała, że odpady te charakteryzują się bardzo zróżnicowanymi wartościami kąta tarcia wewnętrznego i spójności, które zależą m.in. od ich struktury, stopnia rozkładu, metody badań, w tym zakresu odkształceń. Wpływ tych czynników na wytrzymałość na ścinanie odpadów jest często niejednoznaczny, co powoduje, że dobór parametrów wytrzymałościowych dla prognozowania stateczności składowisk jest zadaniem złożonym. Przeprowadziłem obliczenia stateczności [zał. 4: publikacja: B.2.42] skarpy kwatery składowiska odpadów komunalnych w Chełmku wykorzystując wartości parametrów wytrzymałościowych przyjętych z literatury. Wykazano, że metoda obliczeń stateczności skarpy składowiska, oparta o uśrednione parametry wytrzymałościowe odpadów, dała wysoką wartość współczynnika bezpieczeństwa, natomiast analiza probabilistyczna wykazała, że bezpieczeństwo konstrukcji można uznać pomiędzy słabym, a przeciętnym wskazując tym samym, że projektowana skarpa jest zbyt stroma (1:1), aby zagwarantować odpowiedni z punktu widzenia potrzeb inżynierskich poziom bezpieczeństwa. Z kolei analiza stateczności wykonana dla skarp składowiska w Brzozowie [zał. 4: publikacja: B.2.27] wskazała, że istotny wpływ na ocenę stateczności skarp mają przede wszystkim wartości spójności. Wyniki moich badań wskazują, że ocena stateczności skarp nasypów składowisk odpadów komunalnych obarczona jest niepewnością doboru parametrów geotechnicznych do tych materiałów, która związana jest z ich dużą zmiennością. Dlatego uzasadnione wydaje

się, że obliczenia stateczności dla tego typu obiektów powinny również uwzględniać analizę probabilistyczną.

7.2.2. Badania powierzchniowych ruchów masowych (stateczność zboczy)

Problematyka ruchów masowych jest technicznym i społecznym problemem powszechnie występującym na terenie polskich Karpat fliszowych, gdzie szacowana liczba osuwisk wynosi około 60 000. Wśród obecnie występujących ruchów masowych przeważają płytkie osuwiska powstałe w utworach pokrywowych lub skalno-zwietrzelinowych, co jest w dużej mierze efektem zmian zagospodarowania terenu przez człowieka, czego z kolei skutkiem są zmiany sposobu krążenia wody w systemie stokowym z głębokiego na powierzchniowy i podpowierzchniowy. Ponadto obserwowane w ostatnich latach zmiany klimatyczne objawiają się nasileniem ekstremalnych, często krótkotrwałych i gwałtownych opadów deszczu, które zasięg oddziaływania w profilu gruntowym ogranicza się do powierzchniowych warstw zboczy. Stąd też moje zainteresowania naukowo-badawcze dotyczyły określenie związku pomiędzy właściwościami geotechnicznymi gruntów pokryw stokowych, a obiegiem wody w systemie stokowym i jego wpływem na stateczność zboczy. W obrębie tego zagadnienia można wyróżnić szczegółowe problemy badawcze zrealizowane przeze mnie:

- 1) oznaczanie parametrów geotechnicznych gruntów pokryw stokowych,
- 2) modelowanie wpływu warunków meteorologicznych i wegetacji na stateczność zboczy,
- 3) modelowanie stateczności zboczy w środowisku GIS.

Przedstawione powyżej zagadnienia mają charakter interdyscyplinarny, umożliwiając wieloaspektową analizę czynników i procesów powodujących powstawanie ruchów masowych. Część moich prac poświęcona problematyce stateczności zboczy dotyczyła analizy stanu wiedzy i stosowanych metod badań terenów osuwiskowych [zał. 4: publikacje: **B.1.5, B.2.62**], niemniej większość z nich zawiera wyniki badań własnych ruchów masowych oraz gruntów pochodzących z obszaru karpackiego (Beskid Mały, Beskid Niski, Pogórze Wielickie, Pogórze Wiśnickiego, Pogórze Ciężkowickie), a także budowli ziemnych z rejonu pozakarpackiego.

Oznaczanie parametrów geotechnicznych gruntów pokryw stokowych

Wśród głównych czynników mających związek z podatnością terenu na utratę stateczności wymieniana jest jego budowa litologiczna, która ma związek z właściwościami geotechnicznymi gruntów. Podstawowym zjawiskiem powodujących utratę stateczności zboczy jest poślizg jednej warstwy gruntu względem pozostałej, co spowodowane jest przekroczeniem przez naprężenia styczne wartości wytrzymałości gruntu na ścinanie. Wytrzymałość ta jest zasadniczo pochodną właściwości fizycznych gruntów (składu mineralnego, granulometrycznego, porowatości), a przede wszystkim stopnia wypełnienia porów gruntowych przez wodę. Z kolei wpływ na prędkość zmian wilgotności gruntu mają

jego właściwości hydrauliczne (współczynnik filtracji). Stąd też znajomość tych właściwości gruntów ma duże znaczenie dla oceny (prognozowania) stateczności zboczy. Badania właściwości geotechnicznych gruntów prowadziłem głównie dla utworów pokryw stokowych z terenu Beskidu Małego, Beskidu Niskiego, Gorców, Pogórza Ciężkowickiego, Pogórza Wielickiego oraz Pogórza Wiśnickiego [zał. 4: publikacje: **B.1.4, B.1.8, B.1.9, B.2.4, B.2.11, B.2.17, B.2.18, B.2.21, B.2.23, B.2.24, B.2.31, B.2.32, B.2.33, B.2.34, B.2.40, B.2.41, B.2.43, B.2.49, B.2.50, B.2.56, B.2.59, B.2.64**; konferencje: **C.2.2.13, C.2.16, C.2.18, C.2.25, C.2.27, C.2.34, C.2.49, C.2.43**].

Część moich badań dotyczyła określenia zależności [zał. 4: publikacje **2.23, B.2.24, B.2.32, B.2.49, B.2.50, B.2.56**; konferencja: **C.2.43**] pomiędzy mierzonymi wartościami wytrzymałości na ścinanie (metoda bezpośredniego ścinania), a wilgotnością oraz właściwościami fizycznymi badanych gruntów. Wyniki tych badań wykazały, że wzrost uwilgotnienia gruntu wpływa na zmniejszenie jego wytrzymałości na ścinanie, przy czym zmniejszenie to jest związane przede wszystkim ze zmianami wartości spójności, a w zdecydowanie mniejszym stopniu ze zmianą wartości kąta tarcia wewnętrznego. Zależność ta znalazła potwierdzenie w wynikach obliczeń teoretycznych wytrzymałości na ścinanie gruntu. Wyniki te jednocześnie wskazują na bardzo istotny wpływ sił ssania, wynikający z właściwości retencyjnych gruntów, na ich wytrzymałość w stanie niepełnego nasycenia. Należy podkreślić, że wyniki przedstawione w dwóch pracach [zał. 4: publikacje: **B.2.49, B.2.50(x2)**] były cytowane¹⁵ w artykułach zamieszczonych w czasopismach posiadających współczynnik wpływu (Impact Factor).

Dla określenia wpływu właściwości fizycznych gruntów na wartości ich ciśnienia ssania prowadziłem badania we współpracy z Zakładem Gleboznawstwa i Ochrony Gleb Wydziału Rolno-Ekonomicznego Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie. W ramach tych prac analizie poddano przydatność wybranych funkcji pedotransferu do określenia charakterystyki retencyjnej kilkunastu gruntów pochodzących z obszaru karpackiego [zał. 4: publikacja: **B.2.25**]. Wyniki badań wykazały, że funkcje pedotransferu oparte o zależności statystyczne pomiędzy właściwościami gruntów, a ich właściwościami retencyjnymi w przypadku analizowanych gruntów nie potwierdziły w pełni swej przydatności. Wartości wilgotności objętościowej obliczone jedną z metod proponowanych w pracy Minasny'ego i in. [1999]¹⁶ dały niedużą zgodność z wynikami badań, natomiast stosunkowo dobre wyniki obliczeń uzyskano korzystając z metody Vereecken'a i in. [1989]¹⁷.

¹⁵ Artykuły:

1) John H. Kim, Thierry Fourcaud, Christophe Jourdan, Jean-Luc Maeght, Zhun Mao, James Metayer, Louise Meylan, Alain Pierret, Bruno Rapidel, Olivier Rouspard, Anneke de Rouw, Mario Villatoro Sanchez, Yan Wang, Alexia Stokes (2017), Vegetation as a driver of temporal variations in slope stability: The impact of hydrological processes, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 4897–4907, doi:10.1002/2017GL073174.

2) Chunlai Zhang, Xuesong Wang, Xueyong Zou, Jinlu Tian, Bo Liu, Jifeng Li, Liqiang Kang, Hong Chen, Yongqiu Wu, (2018) Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of northern China's wind erosion area, *Soil and Tillage Research*, Volume 178: 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.014>

¹⁶ Minasny B., McBratney A.B., Bristow K. (1999) Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, 93, 225-253

¹⁷ Vereecken H., Maes J., Feyen J., Darius P. (1989) Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*, 148, 389-403

Podobnie dobre dopasowanie wyników obliczeń do danych pomiarowych otrzymano w przypadku modeli Arya-Paris [1981]¹⁸ oraz zmodyfikowanego modelu Kovac'a [Aubertin i in. 2003¹⁹]. Modele te oraz model Vereeckena dały porównywalną dokładność oznaczeń wilgotności objętościowej w całym zakresie stosowanych wartości wysokości ciśnienia ssania, przy czym modele Arya-Paris oraz Vereecken'a z reguły zaniżały, a zmodyfikowany model Kovac'a zawyża wartości wilgotności objętościowej w stosunku do wyników pomiarów.

Moje badania dotyczyły również oznaczeń resztkowej (residualnej) wytrzymałości na ścinanie, która charakteryzuje grunt poddany dużym odkształceniom. Wytrzymałość resztkowa ma szczególne znaczenie w przypadku analiz stateczności terenów osuwiskowych, gdy rozważa się możliwość wstąpienia wtórnych ruchów masowych. Badania te wykonywałem stosując kilkukrotne ścinanie tych samych próbek gruntu pochodzących z terenów osuwiskowych. Wyniki badań wykazały [zał. 4: publikacje: **B.2.17, B.2.21, B.2.41, B.2.59**; konferencje: **C.2.18, C.2.27**], że na skutek dużych odkształceń gruntów i ich zawodnienia w płaszczyźnie poślizgu następuje zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie i wartości parametrów ją charakteryzujących. Z praktycznego punktu widzenia istotne są jednak przedstawione w pracy zakresy zmian analizowanych parametrów, które w przypadku badanych gruntów były również współzależne z ich właściwościami geotechnicznymi. Wykazano, że wytrzymałość na ścinanie wzdłuż wytworzonej powierzchni poślizgu jest w skrajnych przypadkach nawet o 80% mniejsza niż maksymalna wartość tego parametru. Otrzymane wyniki wskazują, że dla ustalenia się wytrzymałości resztkowej uzasadnione wydaje się wykonanie co najmniej 5–6 serii ścięć tej samej próbki gruntu. Bezpośrednia interpretacja wyników badań resztkowej wytrzymałości na ścinanie wykazała, że grunty te charakteryzują się nieznaczną spójnością, co jest spotykane w przypadku stosowania liniowego opisu wytrzymałości gruntów na ścinanie. Zastosowanie tego typu podejścia do obliczeń stateczności daje w przypadku występowania niewielkich wartości naprężeń normalnych bardziej korzystne wyniki obliczeń niż stosowanie założenia, że wytrzymałość resztkowa opisywana jest nieliniowo przy założeniu braku występowania spójności resztkowej. Wykazano również, że wartości resztkowego kąta tarcia wewnętrznego gruntów zwięzłych i bardzo spoistych są stosunkowo dobrze skorelowane z ich wskaźnikiem plastyczności. Należy podkreślić, że wyniki tych badań były cytowane [zał. 4: publikacja: **B.2.21**] w artykułach²⁰ zamieszczonych w czasopiśmie posiadających współczynnik wpływu.

¹⁸ Arya L.M., and Paris J.F. (1981) A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45:1023-1030

¹⁹ Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. and Chapuis, R.P. (2003) A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6): 1104-1122

²⁰ Artykuły:

- 1) Šarūnas Skuodis, Arnoldas Norkus, Neringa Dirgėlienė, Liudvikas Rimkus (2016) Determining characteristic sand shear parameters of strength via a direct shear test. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22:2, 271-278, DOI: 10.3846/13923730.2015.1073174 – IF_s=1,749
- 2) Dudeja, D., Bhatt, S.P., Biyani, A.K. (2017) Stability assessment of slide zones in Lesser Himalayan part of Yamunotri pilgrimage route, Uttarakhand, India. *Environmental Earth Sciences*, 76: 54. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6366-y> - IF_s=1,310

Podsumowując tę część moich badań można stwierdzić, że grunty stanowiące pokrywy stokowe na terenie Karpat charakteryzują się dużym zróżnicowaniem właściwości geotechnicznych, co uzasadnia potrzebę wykonywania każdorazowo tego typu badań. Wyniki badań potwierdziły również istotny wpływ sił ssania matrycowego na wartości wytrzymałości na ścinanie gruntów w stanie niepełnego nasycenia. Moje badania potwierdziły, że wzrost uwilgotnienia gruntu powoduje redukcję sił ssania, co przyczynia się do zmniejszenia wytrzymałości gruntu na ścinanie, a w dalszej konsekwencji ma to wpływ na stateczność zboczy.

Modelowanie wpływu warunków meteorologicznych i wegetacji na stateczność zboczy

Pierwsze moje prace związane z problematyką stateczności zboczy miały charakter analiz stateczności, w których ośrodkowi gruntowemu przypisane były charakterystyczne parametry wytrzymałościowe oraz stały poziom zwierciadła wody gruntowej [zał. 4: publikacje: **B.2.4, B.2.11**; konferencja: **C.2.13**]. Wyniki obliczeń stateczności zboczy osuwiskowych na terenie Beskidu Małego wykazały, że zagrożenie ich równowagi występuje przede wszystkim w przypadku nasycenia gruntów wodą opadową. Otrzymane zależności wskazały tym samym, że dla zrozumienia mechanizmu utraty stateczności niezbędna jest analiza procesu przepływu wody w obrębie stoku.

Stąd też dalsze moje prace były skoncentrowane na określeniu przebiegu procesu infiltracji wody opadowej w profil gruntowy. W tym celu wykonano szereg analiz stateczności kilkunastu zboczy osuwiskowych położonych w Beskidzie Małym, Niskim, Pogórzu Ciężkowickim i Wiśnickim w których starano się odtworzyć przebieg procesu infiltracji oraz związane z tym zmiany stanu naprężenia gruntów i związane z tym zmiany ich wytrzymałości na ścinanie, a w dalszej części zmiany równowagi zboczy (współczynnika bezpieczeństwa) [zał. 4: publikacje: **B.1.4, B.1.9, B.2.18, B.2.20, B.2.31, B.2.33, B.2.34, B.2.37, B.2.48, B.2.52, B.2.66**; konferencje: **C.2.15, C.2.16, C.2.22, C.2.26, C.2.47, C.2.29, C.2.32, C.2.33, C.2.36, C.2.28, C.2.41, C.2.49, C.2.52**]. Obliczenia te wykonywano stosując metody analityczne (model Lumba, Green-Ampt'a, model Montrasio-Valentino) oraz metody numeryczne (metoda elementów skończonych – program Geo-Slope). Moje badania wykazały, że w przypadku analiz stateczności rozpatrywanych w krótkim okresie czasu, odpowiadającym długości trwania czynnika inicjującego utratę stateczności (opad deszczu), do obliczeń przepływu wody przez ośrodek gruntowy dla powierzchniowych warstw zboczy można z powodzeniem stosować metody analityczne [zał. 4: publikacje: **B.1.6, B.2.31, B.2.33, B.2.34**], co znacznie ogranicza zakres danych niezbędnych dla przeprowadzenia obliczeń. Z kolei analizy stateczności w dłuższej perspektywie czasowej, uwzględniające również okresy bez opadów, wykonywano stosując metody numeryczne [zał. 4: publikacje: **B.2.37, B.2.52, B.2.66**; konferencje: **C.2.27, C.2.29, C.2.31, C.2.33, C.2.41, C.2.49, C.2.52**], w których uwzględniano wpływ procesu ewapotranspiracji na zmiany stopnia uwilgotnienia gruntu. Na podstawie analiz możliwe było określenie efektywnej wielkości opadu (opadu progowego) powodującej naruszenie stateczności zboczy. Analiza stateczności dwóch zboczy położonych na terenie Pogórza Wiśnickiego [zał. 4: publikacja **B.2.37**; konferencja: **C.2.27**]

wykazała, że w okresie 2009-2013 r. najbardziej niekorzystne warunki stateczności uzyskano w maju 2010 r., co stanowi potwierdzenie sytuacji zaobserwowanej w rzeczywistości (katastrofy osuwiskowej w 2010 r.²¹). Wielkość opadów w 14-dniowym okresie poprzedzającym wystąpienie krytycznych warunków stateczności wyniosła około 200 mm. Z kolei w dalszej części tego roku odnotowano jeszcze 2 dni, gdzie wartości współczynnika bezpieczeństwa były mniejsze od wartości granicznej (1,0) i związane były one z opadami poprzedzającymi o wysokości 90 mm.

W prowadzonych analizach stateczności uwzględniano również wpływ roślinności, wyrażoną wartością wskaźnika pokrycia liściowego (LAI), na kształtowanie się warunków stateczności jednego ze zboczy osuwiskowych na terenie Pogórza Wiśnickiego [zał. 4: publikacja: B.2.52; konferencja: C.2.36]. Otrzymane wyniki obliczeń stateczności analizowanego zbocza wykazały, że wartość opadu progowego wywołującego powstanie osuwiska zależą od wilgotności gruntu, intensywności i czasu trwania opadu, ale także od pokrycia terenu roślinnością opisywaną wskaźnikiem pokrycia liściowego LAI i dla tego samego zbocza mogą wynosić w skrajnych przypadkach od 90 mm do ponad 700 mm. Obliczenia przepływu wody w gruncie wskazały, że wskaźnik pokrycia liściowego LAI ma wyraźny wpływ na kształtowanie się wilgotności gruntów zbocza. Wartości LAI z zakresu 1–3, odpowiadające roślinności trawiastej, sprzyjają w dłuższej perspektywie czasu większemu gromadzeniu się wody w gruncie, co ogranicza jego zdolność retencji w momencie wystąpienia intensywnych opadów. Z kolei pokrycie terenu drzewami, odpowiadające wartości LAI=5, umożliwia wytworzenie dużego zapasu wilgotności w gruncie, co wpływa na opóźnienie reakcji gruntu na opady (utrata stateczności) w stosunku do terenu pokrytego roślinnością trawiastą.

Moje badania poświęcone były również analizom hydrologicznym rozdziału wody opadowej na spływ powierzchniowy i infiltrację, a w dalszej kolejności na stateczność zboczy. Obliczenia takie przeprowadzono dla zbocza z okolic Beskidu Małego [zał. 4: publikacja: B.2.20], a analizie poddano wpływ opadu deszczu o zmiennym natężeniu na wielkość infiltracji wód w profil gruntu. Obliczenia te wykonywano z użyciem jedno- i dwuwymiarowego modelu Green-Ampt'a wykazały istotne różnice w ocenie relacji opad-infiltracja-spływ powierzchniowy wskazując, że obliczenia modelem jednowymiarowym prowadzą do uzyskania większych wartości infiltracji, co stawia tę metodę po stronie bezpiecznych z punktu widzenia oceny stateczności zboczy. Otrzymane wyniki obliczeń infiltracji z zastosowaniem jednowymiarowego modelu infiltracji Green-Ampt'a wykazały istotny wpływ rozkładu opadu w czasie na głębokość infiltracji wód opadowych, a różnice głębokości położenia frontu zwilżenia dla rozpatrywanego czasu trwania opadu wynosiły do 35% i były w dużym stopniu związane z obliczoną wielkością spływu powierzchniowego. Z kolei obliczenia infiltracji i spływu powierzchniowego porównywane były z wynikami pomiarów na poletku doświadczalnym Stacji Naukowo-Badawczej Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN [zał. 4: publikacja: B.2.36]. Obliczenia wielkości

²¹ Termin zaproponowany przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, odnoszący się do okresu maja i czerwca 2010 r., kiedy na terenie Polski południowej uaktywniło się ponad 1300 osuwisk

spływu powierzchniowego wykonano stosując jednowymiarowych modeli infiltracji Green-Ampt'a, Diskina-Nazimowa oraz metodą NRCS-CN. Obliczenia dały zróżnicowane wartości spływu powierzchniowego w zależności od zastosowanej metody jak i w stosunku do wartości pomierzonych na poletku. Ogólnie najbardziej zbliżone wyniki obliczeń do danych pomiarowych uzyskano stosując model Green-Ampt'a. Nieco gorsze wyniki obliczeń uzyskano z modelu Diskina-Nazimowa, przy czym model ten dał porównywalne wyniki obliczeń do danych pomiarowych w przypadku jednej z przeprowadzonych analiz. Natomiast wyniki obliczeń otrzymane z modelu NRCS-CN wykazały znaczną rozbieżność w stosunku do wyników pomiarów, co wskazuje, że model ten wymaga kalibracji uwzględniającej warunki fizjograficzne zlewni.

Przeprowadzone obliczenia stateczności potwierdziły istotność związku przyczynowo-skutkowego pomiędzy opadami, a procesami osuwiskowymi wskazując, że wartości opadu progowego są funkcją wielu zmiennych, przede wszystkim właściwościami hydraulicznymi (wodoprzepuszczalnością) pokryw stokowych i podłoża skalnego, rozkładu opadów w czasie oraz warunków wilgotnościowych (stopnia nasycenia pokryw stokowych) [zał. 4: konferencja: **C.2.40**]. Wykazano, że w przypadku zboczy zbudowanych z utworów przepuszczalnych zasadniczy wpływ na utratę ich stateczności mają intensywne opady. Z kolei dla zboczy zbudowanych z utworów mniej przepuszczalnych istotna jest przede wszystkim długość trwania opadu, który powoduje powolne ich nasycanie.

Zajmowałem się także zagadnieniem wpływu erozji bocznej potoków górskich na stateczność zboczy [zał. 4: publikacja: **B.2.48**]. Przeprowadzona analiza stateczności fragmentu zbocza osuwiskowego w miejscowości Bieśnik k. Gorlic (Beskid Niski) wykazała istotny wpływ opadów deszczu i procesów fluwialnych (erozji) na warunki równowagi zbocza, przy czym proces erozji bocznej intensywniej wpływa na brzeg na odcinkach zboczy zlokalizowanych na łukach wklęsłych potoków. Uzyskane wyniki obliczeń wskazują na istotną potrzebę badań procesów fluwialnych w aspekcie stateczności zboczy przykorytowych. Stąd też w 2017 roku rozpocząłem badania właściwości geotechnicznych gruntów formujących brzegi potoku Rogoźnik Wielki na Podhalu [zał. 4: konferencje: **C.2.55**].

Inny zakres moich zainteresowań naukowych związany z procesami denudacyjnymi stanowiły badania procesu abrazyj brzegów Zbiornika Czorsztyńskiego, które prowadzę od 2003 roku w ramach działalności studenckiego ruchu naukowego, będąc jednym z opiekunów Sekcji Geotechnicznej Koła Naukowego Inżynierii Środowiska oraz ze współpracy z pracownikami mojej Katedry [zał. 4: publikacje: **B.2.14**, **B.2.15**; konferencje: **2.19**, **2.53**]. Badania te obejmowały pomiary zmian geometrii skarp zbiornika znajdujących się w pobliżu zapory oraz rozpoznanie właściwości geotechnicznych gruntów formujących brzeg zbiornika. Obserwacje terenowe wykazały, że w okresie badań od 2003 do 2008 roku nastąpiła istotna przebudowa profilu w analizowanym fragmencie brzegu zbiornika. W obrębie przekroi pomiarowych znajdujących się w pobliżu zapory stwierdzono pokrywanie się krawędzi tarasu abrazyjnego z hipotetycznym przebiegiem pierwotnej linii brzegowej, co pozwala stwierdzić brak, że w rejonie zasięgu pomiarów przekroju nie występuje taras akumulacyjny. Wykazano, że istnieje wpływ nachylenia zboczy i uziarnienia materiału na procesy abrazyjne, tj. na

wysokość i wielkość cofania się klifu abrazyjnego. Duże nachylenie zboczy sprzyja wykształceniu wysokich klifów abrazyjnych, których krawędź znajduje znacznie powyżej normalnego poziomu piętrzenia wody w zbiorniku. W okresie od 2004 do 2009 roku wielkość cofania się klifu abrazyjnego wyniosła 1–2 m, a jego wysokość osiągnęła wartość 1–2 m w rejonie zboczy o względnie niskim nachyleniu, a w skrajnym wypadku (stromie zbocze) osiągnęła wartość 5–6 m. Wyniki tych badań cytowane były w pracach zamieszczonych w czasopiśmie posiadających współczynnik wpływu²².

W ramach współpracy naukowej z Uniwersytetem w Padwie (Włochy) oraz Przedsiębiorstwem Geologiczno-Inżynieryjnym GEO-INŻ-BUD analizowałem możliwość zastosowania kotew pływających SIRIVE dla potrzeb zabezpieczenia osuwisk w polskich Karpatach fliszowych [zał. 4: publikacja: B.2.53; konferencja: C.2.31], a moich badań przyczyniły się do zastosowania tej metody po raz pierwszy w Polsce do zabezpieczenia drogi powiatowej 2167k w Ochojnie (gmina Świątniki Górne).

Przeprowadzone badania ruchów masowych, poparte wynikami obliczeń, wskazują, że na terenie polskich Karpat fliszowych, oprócz osuwisk strukturalnych, istotny wpływ na przeobrażenia rzeźby terenu mają również powierzchniowe ruchy masowe wywołane intensywnymi opadami deszczu. Przeprowadzone badania i analizy potwierdzają, że stateczność zboczy nie jest związana wyłącznie z właściwościami mechanicznymi gruntów, ale zależy również od ich wodoprzepuszczalności, która determinuje prędkość krążenia wody w profilu gruntowym i intensywność zachodzących na zboczach procesów geodynamicznych. O ile zależności te są powszechnie znane to w praktyce są bardzo rzadko uwzględniane w analizach procesów osuwiskowych występujących na terenie karpackim.

Modelowanie stateczności zboczy w środowisku GIS

Moje zainteresowania naukowe obejmują również przestrzenne analizy stateczności wykorzystujące modele deterministyczne, w których wyniki obliczeń infiltracji wód opadowych są zintegrowane z obliczeniami stateczności zboczy.

We współpracy z pracownikiem Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie jako jedni z pierwszych w kraju zastosowaliśmy model SINMAP do oceny zagrożenia płytkimi ruchami masowymi na obszarze karpackim [zał. 4: publikacja: B.2.22]. Przeprowadzone analizy dla obszarze zlewni potoku Bystrzanka w Beskidzie Niskim wykazały, że znaczna część obszaru nie jest zagrożona powierzchniowymi ruchami masowymi. Uzyskane wyniki obliczeń uznano za stosunkowo zbieżne z informacjami podanymi w bazie SOPO oraz rezultatami obserwacji terenowych. Stwierdzono, że model umożliwia określenie wpływu intensywności opadu na kształtowanie się warunków

²² Artykuły:

- 1) Karol Augustowski, Józef Kukulak J. (2017) Rates of frost erosion in river banks with different particle size (West Carpathians, Poland). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 40 (2017). 5-17. DOI: 10.4461/GFDQ.2017.40.1
- 2) Małgorzata Kijowska-Strugała, Łukasz Wiejaczka, Jarosław Cebulski, Krzysztof Kiszka, Mateusz Maślanka & Daria Maria Kramkowska (2018) Factors affecting bluff development around a mountain reservoir: a case study in the Polish Carpathians, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, DOI: 10.1080/04353676.2018.1542202

równowagi zboczy uwzględniając właściwości geotechniczne gruntów i ukształtowania terenu na prawdopodobieństwo występowania procesów osuwiskowych, natomiast nie pozwala on na symulowanie zmian warunków stateczności w czasie rzeczywistym. Z kolei zaletą tego modelu jest możliwość wydzielenia obszarów predysponowanych do występowania powierzchniowych ruchów masowych dysponując nawet niewielkim zasobem informacji o właściwościach geotechnicznych pokryw stokowych.

Model ten zastosowano też do określenia terenów zagrożonych powierzchniowymi ruchami masowymi na terenie Pogórza Wiśnickiego, Gorców [zał. 4: publikacje: **B.2.35**, **B.2.46**, **B.2.64**; konferencje: **C.2.25**, **C.2.34**, **C.2.40**], a także dla okolic wzgórza zamkowego i starego miasta w Sandomierzu [zał. 4: konferencje: **C.2.26**, **C.2.32**, **C.2.38**]. Ocenę podatności osuwiskowej powierzchniowych warstw zboczy na terenie Gorców przeprowadzono dla dolin potoków Jamne i Jaszce stosując modele SINMAP i Iversona. Dla określenia poprawności uzyskanych wyników obliczeń odniesiono je do wyników obserwacji terenowych przeprowadzonych w okresie 8-9 lipca 1997 r., kiedy intensywne opady spowodowały intensyfikację ruchów masowych w zlewniach analizowanych potoków. Wyniki obliczeń stateczności uzyskane z obu modeli różniły się pod względem uzyskanych wartości współczynników bezpieczeństwa, niemniej wykazały one zgodnie, że podstawowym czynnikiem sprzyjającym przekroczeniu granicznego stanu naprężeń jest nasycenie pokryw stokowych wodą opadową. Ogólnie lepsze dopasowanie wyników obliczeń do danych pomiarowych (wyników obserwacji terenowych) uzyskano stosując model Iversona, natomiast wyniki obliczeń wykazały, że model SINMAP przeszacowuje wielkości obszaru zagrożonego ruchami masowymi. Stąd też w innej pracy poświęconej badaniom właściwości geotechnicznych pokryw stokowych dolin potoków Jamne i Jaszce [zał. 4: publikacja: **B.2.64**] wyniki obliczeń infiltracji uzyskane modelem SINMAP zintegrowano z probabilistycznymi obliczeniami stateczności zboczy w programie GEO-SLOPE określając przestrzenny rozkład prawdopodobieństwa utraty stateczności zboczy w obu dolinach.

Wyniki obliczeń stateczności z wykorzystaniem modeli deterministycznych wykazały stosunkowo dobrą zbieżność z wynikami obserwacji powierzchniowych ruchów masowych na analizowanych obszarach dając tym samym podstawy do wykorzystania tych narzędzi dla potrzeb wspierania procesu zarządzania ryzykiem osuwiskowym.

7.2.3. Zastosowanie spektrometrii impedancyjnej (EIS) do monitoringu właściwości fizycznych gruntów naturalnych

Wśród podstawowych czynników wpływających na zmianę równowagi zboczy naturalnych czy też stateczności konstrukcji ziemnych jest obecność w gruncie wody, której przepływ zmienia stan naprężeń ośrodka gruntowego. Stąd też wiele technik pomiarowych stosowanych w budowlach ziemnych służy do analiz zawartości wody w porach czy też jej ciśnienia. Jedną z takich metod pomiarowych stanowi metoda spektrometrii impedancyjnej (EIS), która w ogólnym zarysie pozwala monitorować zmiany oporności elektrycznej ośrodka gruntowego czy też innego ośrodka porowatego. Od roku 2015 biorę udział w

międzynarodowym projekcie EUREKA, Project No.: E!7614, A System of Monitoring of Selected Parameters of Porous Substances Using the EIS Method in a Wide Range of Applications [zał. 4: publikacje: B.2.44, B.2.54, B.2.55, B.2.60., B.2.61, B.2.67, B.2.68, B.2.70, B.2.71, B.2.72; konferencje: C.2.35, C.2.42, C.2.48, C.2.50] realizowanym przez przedsiębiorstwo GEOtest, a.s. z Brna (Czechy) we współpracy z Brno University of Technology (Czechy). Podstawową zaletą tej metody jest stosunkowo niski koszt, natomiast ze względu na fakt, że wartości oporności gruntu są pochodną właściwości fizycznych ośrodka gruntowego, temperatury, czy też zawartości zanieczyszczeń metoda ta wymaga przeprowadzenia kalibracji względem rozpatrywanego ośrodka.

W ramach prac prowadziłem badania laboratoryjne służące określeniu zależności pomiędzy opornością, a wilgotnością gruntów (piasek średni i pył ilasto-piaszczysty, piasek pyłasty, pył ilasty) [zał. 4: publikacje: B.2.54, B.2.60] dla próbek formowanych w cylindrze aparatu CBR. Wyniki badań wykazały, że wraz ze wzrostem wilgotności objętościowej zmniejszają się wartości oporności gruntu. Wykazałem, że im grunt jest bardziej spoisty tym relatywnie mniejszymi wartościami oporności będzie się charakteryzował przy dużym uwilgotnieniu. Przeprowadzono również zostały badania infiltracji, które monitorowano wykorzystując metodę spektrometrii impedancyjnej. Wykonano zostały również teoretyczne obliczenia infiltracji, których wyniki były stosunkowo zgodne z wynikami pomiarów oporności.

Wykonano również pomiary oporności gruntu w skali póltechnicznej dla modelowego nasypu wykonanego z piasku pylastego przy różnych poziomach piętrzenia wody monitorowanych za pomocą piezometrów [zał. 4: publikacje: B.2.55, B.2.61, B.2.67]. Przeprowadzone badania przepływu filtracyjnego wody przez nasyp porównano z wynikami pomiarów piezometrycznych oraz obliczeń numerycznych, wykazując dobrą ich zbieżność z wynikami zmian oporności elektrycznej.

Metodę spektrometrii impedancyjnej zastosowana jest w również na kilku obiektach hydrotechnicznych na terenie Republiki Czeskiej [zał. 4: publikacje: B.2.68, B.2.72]. W przypadku zapory ziemnej zbiornika wodnego Karolinka [zał. 4: publikacja B.2.68] metoda ta posłużyła do weryfikacji zastosowanych zabiegów uszczelniających zapórę (doszczelnienie rdzenia w 2013 r.) zapobiegających przesiąkom wody przez korpus budowli. Monitoring zapory prowadzono w czterech przekrojach, a wyniki pomiarów pozwoliły wskazać miejsca występowania anomalii wartości przewodności elektrycznej, czyli miejsc o większej wilgotności gruntu wskazując tym samym strefy występowania uprzywilejowanych dróg filtracji w korpusie budowli.

Przeprowadzone badania wykazały, że metoda spektroskopii impedancyjnej stanowi małowazyjne narzędzie pomiarowe, które można stosować do monitoringu procesów filtracyjnych zachodzących w ośrodku gruntowym.

7.2.4. Wpływ systemów korzeniowych roślin na wzmocnienie gruntu

Wśród czynników mających wpływ na stateczność zboczy często wymienia się rodzaj pokrycia terenu, w tym roślinność. Powszechnie panuje pogląd, że drzewa oraz krzewy

stabilizują zbocze za pomocą swoich systemów korzeniowych. W literaturze krajowej brakuje ilościowych informacji o wielkości tego wpływu. W swojej pracy naukowej zająłem się również badaniami właściwości wytrzymałościowych systemów korzeniowych roślin i ich wpływem na wzrost wytrzymałości gruntu na ścinanie [zał. 4: publikacje: **B.1.7, B.2.28, B.2.47, B.2.63, B.2.69, B.2.72**; konferencje: **C.2.51, C.2.55, C.2.57**]. Moje prace obejmowały laboratoryjne badania wytrzymałości na ścinanie metodą bezpośredniego ścinania gruntów bez oraz z korzeniami [zał. 4, publikacje: **B.1.7, B.2.28**], które wykazały, że obecność korzeni w gruncie powoduje zwiększenie przede wszystkim wartości spójności, a w mniejszym stopniu wartości kąta tarcia wewnętrznego. Wykazano, że przyrost wytrzymałości na ścinanie gruntu zawierającego korzenie zwiększa się wraz wielkością powierzchni względnej korzeni. W ramach badań prowadzono również pomiary systemów korzeniowych drzew w warunkach naturalnych (dojrzałe drzewa grabu pospolitego, młode drzewa robinii akacyjowej, topoli czarnej, olszy czarnej i młody krzewy wierzby wiciowej) oraz wykonano oznaczenia ich wytrzymałości na rozciąganie [zał. 4: publikacje: **B.28, B.2.47, B.2.63, B.2.69, B.2.72, B.2.73**], a wyniki te posłużyły do określenia wielkości wzmocnienia gruntu za pomocą różnych uznanych w nauce metod obliczeniowych (model Wu-Waldrona, modele wiązkowe). Obliczenia stateczności dla hipotetycznego nasypu ziemnego wykazały, że obecność na skarpie nawet młodych drzew powoduje poprawę jej stateczności, zwłaszcza w powierzchniowych części gruntu. W ramach współpracy naukowej z innymi ośrodkami naukowymi (Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Politechnika Warszawska) po raz pierwszy w skali naszego kraju do identyfikacji architektury systemu korzeniowego zastosowano metodę tomografii komputerowej [zał. 4: publikacja: **B.2.69**]. Rozwinięciem moich zainteresowań jest rozprawa nt. „Wpływ systemów korzeniowych wybranych gatunków drzew na przyrost wytrzymałości gruntu na ścinanie.” której najważniejsze wyniki przedstawione zostały w punkcie 6 niniejszego autoreferatu.

8. PODSUMOWANIE

Przedstawiony autoreferat obejmuje samoocenę mojej aktywności naukowo-badawczej oraz przedstawia najważniejsze osiągnięcia naukowo-badawczych w dziedzinie nauk rolniczych, w dyscyplinie „ochrona i kształtowanie środowiska”.

W treści autoreferatu przedstawiłem mój rozwój naukowy przed oraz po uzyskaniu stopnia doktora nauk rolniczych w zakresie „ochrona i kształtowanie środowiska”. Główny obszar mojej aktywności naukowej jest skoncentrowany na zagadnieniach związanych z badaniem wpływu różnych czynników środowiskowych na kształtowanie się warunków stateczności zboczy, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu infiltracji wód opadowych i systemów korzeniowych roślin na wytrzymałość gruntu na ścinanie. Moja aktywność naukowa i zawodowa jest wielokierunkowa, a wyniki moich prac mają charakter zarówno praktyczny, jak i poznawczy. W dużej części weryfikację moich wyników badań stanowią procesy kształtujące współczesną rzeźbę terenów górzystych, a częściowo weryfikacją moich dokonań badawczych jest praktyczne ich zastosowanie w budownictwie ziemnym.



dr inż. Tymoteusz Zydrón