

Załącznik nr 2

dr Krzysztof Lejcuś

Instytut Inżynierii Środowiska

Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

AUTOREFERAT

Wrocław, maj 2017

I. Imię i nazwisko: Krzysztof Michał Lejcuś

II. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania

1999 – 2003 Akademia Rolnicza we Wrocławiu

Studia doktoranckie w dyscyplinie: kształtowanie środowiska

Rozprawa doktorska pt.: „Wpływ zbiornika retencyjnego Dobromierz na występowanie substancji biogenych w wodach rzeki Strzegomki”

DOKTOR NAUK ROLNICZYCH W ZAKRESIE KSZTAŁTOWANIA ŚRODOWISKA

1997 – 1999 Uniwersytet Wrocławski

2-letnie studia magisterskie na kierunku: ochrona środowiska

Temat pracy magisterskiej: „Czynniki decydujące o szkodliwym wpływie na środowisko produktów odsiarczania spalin (na przykładzie wybranych instalacji)”

MAGISTER OCHRONY ŚRODOWISKA

1994 – 1997 Uniwersytet Wrocławski

3-letnie wyższe studia licencjackie na kierunku: ochrona środowiska

Temat pracy licencjackiej: „Mokre metody odsiarczania spalin”

LICENCJAT OCHRONY ŚRODOWISKA

II. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2003 – obecnie Adiunkt w Instytucie Inżynierii Środowiska.
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

2001 – 2003, 2004 – 2008 Asystent w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej
w Legnicy

III. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2016 r., poz. 882 ze zm. w Dz.U. z 2016 r., poz. 1311)

Tytuł osiągnięcia naukowego (cykl publikacji powiązanych tematycznie):

„Opracowanie i walidacja geokompozytów sorbujących wodę, jako elementu wspomagającego wegetację roślin na skarpach budowli ziemnych”

Lista publikacji powiązanych tematycznie:

- A1. Garlikowski D., Orzeszyna H., Pawłowski A., **Lejcuś K.** 2006. Wyniki stosowania geokompozytu magazynującego wody opadowe. *Woda, Środowisko, Obszary Wiejskie* (T. 6) 2 (18). 271–279. **6 pkt. Udział 40%.**
- A2. **Lejcuś K.**, Garlikowski D., Orzeszyna H., Pawłowski A. 2008. Geocomposite with superabsorbent in landfill recultivation and slope protection. *Management of Pollutant Emission from Landfills and Sludge. Book Series: Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences.* 151–157. **5 pkt. Udział 45%.**
- A3. Dąbrowska J., **Lejcuś K.** 2012. Charakterystyka wybranych właściwości superabsorbentów. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 3 IV. 59–68. **5 pkt. Udział 50%.**
- A4. **Lejcuś K.**, Dąbrowska J., Grzybowska-Pietras J., Garlikowski D., Lejcuś I., Pawłowski A., Śpitalniak M. 2016. Optimisation of operational parameters for nonwoven sheaths of water absorbing geocomposites in unsaturated soil conditions. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 24, 3 (117). 110–116. **5y IF = 0,566, 25 pkt. Udział 45%.**
- A5. **Lejcuś K.**, Dąbrowska J., Garlikowski D., Kordas L. 2015. Water loss from soil and water absorbing geocomposite. *International Proceedings of Chemical Biological & Environmental Engineering, Environmental Science and Technology* VI (84). 123–127. **Publikacja w recenzowanym czasopiśmie zagranicznym nieuwzględnionym w wykazie czasopism punktowanych. Udział 75%.**
- A6. Oksińska P.M., Magnucka G.E., **Lejcuś K.**, Pietr S.J. 2016. Biodegradation of the cross-linked copolymer of acrylamide and potassium acrylate by soil bacteria. *Environmental Science and Pollution Research* 6 (23). **5y IF = 2,760, 30 pkt. Udział 20%.**
- A7. **Lejcuś K.**, Dąbrowska J., Garlikowski D., Śpitalniak M. 2015. The application of water-absorbing geocomposites to support plant growth on slopes. *Geosynthetics International* 22 (6). 452–456. **IF = 2,066, 25 pkt. Udział 75%.**
- A8. **Lejcuś K.**, Dąbrowska J., Garlikowski D. 2014. Geokompozyty sorbujące wodę jako element wspomagający pokrycia biotechniczne. *Wybrane zagadnienia inżynierii środowiska w budownictwie. Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa, Oddział w Opolu.* 141–148. **4 pkt. Udział 70%.**

Kopie publikacji wchodzących w skład cyklu zamieszczono w załączniku nr 3, oświadczenia współautorów znajdują się w załączniku nr 5. Oznaczenia porządkowe publikacji od A1-A8 oraz B1-B2 w dalszej części autoreferatu stanowią odnośniki bibliograficzne.

Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników

Wstęp

Potrzeba opracowania nowego geosyntetyku

W ostatnich latach w wielu rejonach świata występuje duża zmienność pogody i dochodzi do znacznych wahań wartości elementów meteorologicznych (np. opadów atmosferycznych). Warunki pogodowe mają wpływ na efektywność wielu sektorów gospodarczych, w tym rolnictwa. Największe straty materialne obserwowane na świecie są wynikiem zjawisk ekstremalnych (m.in. powodzi czy suszy) [Stephenson 2008, IPCC 2001, Frich i in. 2002, Miętus 2005]. Ekstremalne zjawiska pogodowe występują w Europie, Azji, Australii i obu Amerykach. W 2012 r. USA zostały dotknięte największą suszą w historii kraju, w roku 2015 susza na ogromną skalę wystąpiła w Polsce. W Wielkiej Brytanii w 2014 r. zanotowano największe od 300 lat opady. W 2015 r. duże powodzie dotknęły m.in. Gruzję, Włochy, Hiszpanię, Japonię, Francję, Argentynę, Chiny, Pakistan, Chile, Tajlandię i USA. Według ekspertów ekstremów pogodowych będzie coraz więcej. Jednocześnie woda została uznana za podstawowy element zrównoważonego rozwoju. Zapotrzebowanie na wodę w krajach rozwiniętych może wzrosnąć w najbliższych latach nawet o 50%, a w krajach rozwijających się o 18% [Fiałkiewicz i in. 2013].

Susze powodują straty plonów w rolnictwie. Powodzie zaś duże straty w infrastrukturze i rolnictwie. Stanowią też zagrożenie dla życia i dobytku ludności. Podstawowym umocnieniem powierzchniowym wałów przeciwpowodziowych są umocnienia biotechniczne – głównie darń. Kondycja traw ma bardzo duży wpływ na wytrzymałość wału i jego podatność na uszkodzenia podczas powodzi lub wezbrań, a także na odporność na zjawisko erozji wodnej, wywołaną opadami deszczu. Niezwykle wrażliwe na działanie deszczy o dużym natężeniu są także skarpy nasypów drogowych i składowisk odpadów. Trawy, podobnie jak inne rośliny, są wrażliwe na suszę. Tylko zwarta, dobrze ukorzeniona darń spełnia swoją funkcję. W lipcu i sierpniu na terenie Polski darń na budowlach ziemnych zazwyczaj jest w złym stanie z powodu niedoboru wody. W tych miesiącach istnieje również duże zagrożenie opadami o dużym natężeniu, a w konsekwencji powodziąmi.

Dla poprawy właściwości fizycznych gleb, szczególnie dla zwiększenia pojemności wodnej, oprócz substancji organicznych i mineralnych powszechnie stosuje się polimery, zwykle nazywane superabsorbentami lub hydrożelami. Niestety efekty są mocno niejednoznaczne, co stanowi podstawowe ograniczenie w ich powszechnym stosowaniu.

Superabsorbenty (SAP-y) są trójwymiarowymi usieciowanymi, hydrofilowymi polimerami zdolnymi do wchłaniania dużych ilości wody [Buchholz, Graham 1997, Li i in. 2014]. W ostatnich dziesięcioleciach zostały one zastosowane w medycynie, przemyśle, rolnictwie, inżynierii środowiska, głównie jednak do produkcji produktów higienicznych [Caló i in. 2015, Zohuriaan-Mehr i in. 2010, Justs i in. 2015, Orts i in. 2007, Yang i in. 2014, Bakass i in. 2002]. W glebie pełnią one funkcję bufora wilgoci, w związku z tym mogą zmniejszyć stres wodny roślin. Mogą również zapobiec wymywaniu związków nawozowych i środków ochrony roślin ze strefy korzeniowej do wód podziemnych [Liang i in. 2007, Rudziński i in. 2002]. Woda wchłonięta przez superabsorbenty może być wykorzystywana przez rośliny, dzięki sile ssącej korzeni. Większość roślin może wykorzystać do 95% wody zatrzymywanej przez superabsorbent [Wei, Durian 2013, Johnson, Veltkamp 1985].

W inżynierii środowiska i rolnictwie są zwykle stosowane dwie grupy superabsorbentów: jonowe (kationowe i anionowe), np. polikwas akrylowy, i niejonowe (np. poliakrylamid). Związki na bazie poli- (kwasu akrylowego) i ich pochodne są najczęściej stosowane w rolnictwie. Polimery kwasu akrylowego nie są szkodliwe dla roślin, zwierząt i ludzi – zarówno one same, jak i ich sole nie zawierają monomerów akrylamidu. Ze względu na intensywny rozwój nanotechnologii w ostatnich latach odnotowuje się duże zainteresowanie kompozytami polimerowymi (na bazie kwasu akrylowego lub akrylamidu) z dodatkiem minerałów ilastych. W procesie polimeryzacji otrzymuje się polimery złożone (SAPCs) [Kiatkamjornwong 2007].

Najprostszy sposób użycia superabsorbentów lub poliakrylamidu (PAM) w rolnictwie i inżynierii środowiska to ich bezpośrednie wymieszanie z glebą. Jednakże wykazano, że takie sposoby stosowania prowadzą do zmniejszenia parametrów wytrzymałościowych gleb [Sojka i in. 1998, Hejduk 2010] oraz zmniejszenia ich przepuszczalności. Dotychczas superabsorbenty były wprowadzane do gleby z zastosowaniem następujących metod:

- natryskiwanie w postaci roztworu bezpośrednio na powierzchnię gleby,
- mieszanie z glebą do określonej z góry głębokości,
- wtryskiwanie polimeru na ustaloną głębokość,
- hydroobsiew rozcieńczoną emulsją z nasionami [Paluszek 2003].

W dobie zmieniającego się klimatu i coraz częściej występujących anomalii pogodowych oraz odnotowywanych strat w rolnictwie i infrastrukturze dla wspomagania wegetacji i ograniczania strat wody rozwiązaniem może być innowacyjny geokompozyt, który przechwytyje wodę opadową lub wodę z nawodnień, zatrzymując ją w swoim wnętrzu. Korzenie roślin w wyniku hydrotropizmu przerastają wnętrze geokompozytu, a dzięki sile ssącej mogą z niego pobierać wodę. Korzystając z zatrzymanej we wnętrzu geokompozytu wody, rośliny mają szansę przetrwać okresy niedoboru wody lub nawet suszy. Rośliny, które są optymalnie nawadniane i nawożone, dzięki stałemu dostępowi do wody zgromadzonej w geokompozycie mają większe przyrosty biomasy. Geokompozyty zastosowane na wałach przeciwpowodziowych czy skarpach drogowych zwiększają rozwój części naziemnych i podziemnych traw oraz krzewów, przez co wpływają na zwiększenie bezpieczeństwa tych konstrukcji. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, gdy woda przelewa się przez obwałowanie w trakcie powodzi czy po intensywnych opadach o dużym natężeniu – geokompozyty stanowią wówczas ochronę przeciwoerozyjną skarp drogowych.

Opracowanie nowego, innowacyjnego geokompozytu sorbującego wodę, który wspomaga wegetację roślin, stało się dla mnie przyczynkiem do rozpoczęcia badań.

Główne cele naukowe przeprowadzonych przeze mnie badań, których wyniki zawarte zostały w ramach cyklu publikacji

Cel pracy: opracowanie geokompozytów sorbujących wodę (GSW) wspomagających rozwój roślinności wykorzystywanej w zabezpieczeniach przeciwoerozyjnych skarp.

Przystępując do prac nad nowym geokompozytem, postanowiłem sprawdzić:

- czy system korzeniowy roślin będzie w stanie efektywnie przerastać do wnętrza geokompozytów i korzystać ze zgromadzonej tam wody,
- czy możliwe jest takie rozmieszczenie geokompozytów, aby stymulować rozwój systemu korzeniowego roślin na różnych głębokościach,
- jakie parametry decydują o skuteczności działania różnych superabsorbentów w przypadku GSW,
- wpływ mikroorganizmów glebowych na funkcjonowanie i rozkład superabsorbentów,
- jakie jest parowanie wody z GSW w porównaniu z parowaniem z powierzchni gleby,
- jaka jest skuteczność nowo opracowanego geokompozytu.

Na etapie projektowania procedury badawczej sformułowałem następującą **hipotezę**:

Możliwe jest opracowanie nowego rodzaju geosyntetyku, który będzie zatrzymywał wodę w glebie w postaci dostępnej dla roślin. Geosyntetyk taki powinien:

- umożliwiać roślinom swobodny pobór wody z jego wnętrza,
- umożliwić instalację na skarpach i innych powierzchniach nachylonych,
- powodować wzrost części naziemnych i podziemnych roślin.

Wprowadzenie

Skarpy wykopów i nasypów, zbocza hałd i składowisk są erodowane przez wiatr, deszcz i spływające powierzchniowo wody opadowe. Namoknięte grunty drobnoziarniste na powierzchniach skarp mają skłonność do powierzchniowych zsuwów, a przemarznięte grunty podczas tajania ulegają soliflukcji. Powszechnie stosowanym sposobem zabezpieczenia i stabilizacji powierzchni skarp są pokrycia biologiczne w postaci pokrywy trawiastej lub rzadziej – w postaci płożącej się roślinności okrywowej. Nadziemne części roślin chronią powierzchnię gruntu przed uderzeniami kropel deszczu, a ich system korzeniowy, przerastając powierzchniową warstwę budowli ziemnej, tworzy strefę o znacznej odporności erozyjnej i zwiększonej wytrzymałości na ścinanie.

Stateczność ubezpieczeń zależy od wytrzymałości na ścinanie wzdłuż potencjalnej powierzchni poślizgu. Korzenie roślin mogą stabilizować tę warstwę, wiążąc ją z podłożem. Główną rolę w mechanizmie wzmacniania odgrywa wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie samych korzeni.

Każdy rodzaj gleby lub podłoża gruntowego charakteryzuje pewna zdolność przechwytywania i czasowego zatrzymywania określonej ilości opadów atmosferycznych. Wody opadowe infiltrują przez strefę nienasyconą ośrodka porowatego, a po osiągnięciu połowej pojemności wodnej zasilają wody gruntowe lub – w przypadku gdy natężenie opadu przekracza zdolności infiltracyjne – rozpoczyna się spływ powierzchniowy. Zatrzymana woda z czasem odparowuje bądź jest transpirowana przez rośliny. Najtrudniejsze dla roślin warunki wilgotnościowe występują na podłożach silnie przepuszczalnych lub mocno zagęszczonych i nieprzepuszczalnych. Równocześnie w okresie największego zapotrzebowania roślin na wodę występuje zwykle największy niedobór opadów.

Do rozwoju roślinności i pełnienia przez nią funkcji ochronnych konieczna jest, oprócz żyznego podłoża, dostateczna ilość wody. Zgodnie z prawem Liebiga woda to często czynnik limitujący rozwój roślinności na skarpach. Infiltrujące wody opadowe są magazynowane głównie w warstwie humusu, w postaci wody kapilarnie zawieszanej i higroskopijnej. Skarpy zapór, wałów przeciwpowodziowych i składowisk odpadów

pozostają poza zasięgiem podsiąku kapilarnego wód gruntowych. W przypadku braku wody roślinność trawiasta nie rozwija się i często zostaje wyparta przez gatunki niepożądane. Jeśli w okresie wegetacyjnym wystąpi dłuższy okres bezopadowy lub ilość opadów jest niewystarczająca, roślinność trawiasta ubezpieczeń wysycha. Wpływa to znacząco na skuteczność pełnionych przez nie funkcji ochronnych. Z kolei nawodnień budowli ziemnych zwykle się nie wykonuje.

Powstała więc potrzeba opracowania nowego skutecznego rozwiązania zapewniającego roślinom dodatkową ilość wody, z której mogą korzystać tak, aby mogły prawidłowo się rozwijać i pełnić swoje funkcje w konstrukcjach budowli ziemnych.

W latach 70. ubiegłego wieku w USA opracowano silnie pęczniejący absorbent skrobiowy do zastosowań w leśnictwie, który z uwagi na szybką biodegradację nie znalazł niestety komercyjnego zastosowania. Później w związku z potrzebami produkcji artykułów higienicznych wytworzono syntetyczne polimery – superabsorbenty (SAP-y), absorbujące wodę w ilości do 1000 : 1 masy wyjściowej polimeru.

Pierwsze próby przeprowadzono, mieszając superabsorbent (SAP) z piaskiem. Sumaryczna ilość wody zatrzymanej w tym profilu była większa od ilości zatrzymanej przez profil bez SAP-u. Zauważono jednak, że grunt w warstwie, do której zaaplikowano SAP, po zaabsorbowaniu wody niekorzystnie zmienia swoje właściwości wytrzymałościowe i filtracyjne. Spęczniałe cząstki SAP-u, wypełniając dużą część porów gruntu, zmniejszają możliwości infiltracyjne profilu glebowego. Jednocześnie znacząco zmniejszają wartość kąta tarcia wewnętrznego, co w przypadku skarp mogłoby spowodować niestateczność warstwy, do której zaaplikowano SAP.

Chcąc wyeliminować opisane wyżej problemy, zaprojektowano geokompozyt, w którym superabsorbent umieszczono pomiędzy dwiema warstwami geowłókniny. Taśma geokompozytu, o długości 1,0 m, w zależności od szerokości mogła zaabsorbować od 2,5 do 5,0 dcm³ wody. Wyprodukowano prototypową partię geokompozytu o roboczej nazwie „Aquatube”. Forma geokompozytu umożliwia jego wygodną aplikację do zagłębień, wykopów i otworów w glebie lub gruncie. Spęczniały SAP, zamknięty w geowłókninie, nie powodował niekorzystnych zmian właściwości mechanicznych gruntu, a geowłóknina nie ograniczała swobodnego dostępu korzeni roślin do zaabsorbowanej przez SAP wody. Pojemność takiego „zbiornika” mogła być w pewnym zakresie regulowana ilością SAP-u zamkniętego w geokompozycie [Orzeszyna i in. 2004].

Badania

W celu sprawdzenia możliwości zastosowania tego geokompozytu w warunkach rzeczywistych w 2004 r. założono doświadczenie na skarpie odpowietrznej wału przeciwpowodziowego o południowej wystawie [A1]. W czasie modernizacji został on wzmocniony poprzez dobudowanie drenażu o miąższości 1,0 m. Warstwa humusu wyniosła 15,0 cm. Geokompozyt zainstalowano w pasie szerokości 2,0 m. Dodatkowo założono pas kontrolny oraz pas, gdzie dosiano tę samą mieszankę traw, której użyto przy pasie z geokompozytem. W trakcie sezonu wegetacyjnego prowadzono obserwacje rozwoju traw. Na zakończenie doświadczenia stwierdzono, że pas kontrolny jest bardzo słabo porośnięty trawą. Natomiast pas z zainstalowanym geokompozytem był gęsto porośnięty i pozostawał w dobrej kondycji. Doświadczenie to, choć bardzo ograniczone w swoim zakresie, pokazało, że taśma geokompozytu korzystnie wpływa na rozwój traw na skarpie wału przeciwpowodziowego.

Kolejnym etapem prac badawczych było sprawdzenie możliwości kształtowania rozkładu masy korzeniowej traw w podłożu [A2]. W tym celu założono doświadczenie z wykorzystaniem odpadów poflotacyjnych oraz popiołów lotnych. Badania przeprowadzono w płytkich pojemnikach o wysokości 20 cm. Geokompozyty instalowane były na różnych wysokościach. W trwającym ponad rok doświadczeniu wykazano, że instalacja geokompozytu pozwala wpływać na rozkład gęstości korzeni w podłożu. Gęstość korzeni traw na poletku z geokompozytem była większa nawet o 150%. Wzrost masy i gęstości korzeni przełożył się na zwiększoną wytrzymałość na ścinanie badanych próbek nawet o 200%. Wykazano również, że dzięki instalacji geokompozytu możliwy jest rozwój systemu korzeniowego traw na znacznie większej głębokości niż w próbie kontrolnej, co w zabezpieczeniach przeciwerozyjnych jest niezwykle istotne. W przeprowadzonych doświadczeniach sprawdzono także różne postacie nowego geokompozytu. Zastosowano geokompozyt punktowy oraz nową wersję, mojego pomysłu, w postaci powierzchniowej maty. Rozwiązanie to znacząco zwiększało powierzchnię chłonną zastosowanego geokompozytu. Było też łatwiejsze i szybsze w instalacji.

Badania opisane w publikacjach A1 i A2 potwierdziły możliwość stosowania taśmy geokompozytu w postaci punktowej lub w postaci maty na skarpach wałów przeciwpowodziowych, jak również na skarpach o podłożu zbudowanym z wybranych odpadów przemysłowych. Uzyskane wyniki zachęciły mnie do podjęcia prac nad szerszym

zastosowaniem nowego rodzaju geokompozytu. Jednocześnie przeprowadzone badania, również te niepublikowane, pokazały jego słabe strony, które wymagały rozwiązania.

W wyniku przeprowadzonych prac studialnych i laboratoryjnych określiłem słabe punkty dotychczasowego sposobu stosowania SAP-ów. Przyczyną było wykonanie taśmy geokompozytu z typowych, wiotkich geowłóknin. Geowłókniny są materiałami elastycznymi o znikomej sztywności i odporności na zginanie. Nie mogą więc zapewnić wytrzymałości wystarczającej do przeciwdziałania obciążeniu od ciężaru gleby znajdującej się nad takim elementem taśmy. Tym samym materiały te nie zapewniają możliwości swobodnego pęcznienia materiału absorbującego wodę, zapadając się pod obciążeniem wynikającym z leżącej nad nim warstwy gruntu, gleby lub innego materiału, w którym taki element taśmy został założony. W konsekwencji, po zaaplikowaniu superabsorbentu do podłoża bez aktywacji wodą i po obciążeniu nadkładem gleby, elementy taśmy zostają ściśnięte, co uniemożliwia swobodne pęcznienie materiału absorbującego wodę. Taka sytuacja zachodzi także w przypadku pobrania wody z taśmy geokompozytu przez korzenie roślin. Pobranie wody przez korzenie skutkuje zmniejszeniem się objętości superabsorbentu, a powstająca w środku elementu taśmy pustka, przy znikomej wytrzymałości na zginanie materiału osłonowego, powoduje zapadanie się taśmy geokompozytu. Znajdujący się w środku superabsorbent nie ma możliwości ponownej sorpcji wody, ponieważ nie ma wolnej przestrzeni do pęcznienia, a jego właściwości nie pozwalają na jej zwiększenie poprzez przemieszczenie otaczającego gruntu. Powodem tego jest wykazywana niska siła pęcznienia superabsorbentów. Niska siła pęcznienia SAP-u oznacza, że element taśmy poddany obciążeniu traci swoje zdolności do retencjonowania wody, ponieważ umieszczony wewnątrz materiał absorbujący wodę może pęcznieć tylko w minimalnym zakresie, ograniczonym przez naprężenia wynikające z działania warstwy nadkładu – gruntu, gleby lub innego materiału.

Zmieszany z glebą superabsorbent, w procesie wielokrotnego pęcznienia i skurczu, spowodowanego pobieraniem wody przez rośliny, zmienia strukturę otaczającego go gruntu. Dodatkowo wadami takiego rozwiązania jest możliwość blokowania porów gruntu przez pęczniący superabsorbent, brak kontroli nad położeniem i jego przemieszczaniem się w podłożu, brak możliwości usunięcia raz zaaplikowanego superabsorbentu, a przede wszystkim ograniczenie efektywności pęcznienia w przypadku naprężeń pionowych. W przypadku aplikacji na zboczach może także dochodzić do zsuwu powierzchniowej warstwy gruntu z powodu zmniejszenia wytrzymałości na ścinanie.

W 2010 r. opracowano rozwiązanie patentowe pod nazwą „element geokompozytowy, zwłaszcza do wspomaganie roślin”¹, na problemy związane z bezpośrednią aplikacją superabsorbentów do gruntu. Zostało ono opatentowane w Polsce (PL 211198), 14 krajach Unii Europejskiej i w Turcji (EP 2560472). Najważniejszym elementem tego rozwiązania jest zaproponowane przeze mnie wprowadzenie do konstrukcji geokompozytu wewnętrznego szkieletu, umożliwiającego swobodną absorpcję wody przez superabsorbent. Wykonane pomiary wykazały, że SAP obciążony warstwą gleby nie jest w stanie skutecznie zatrzymać wody, tak jak to się dzieje bez obciążenia. Parametr ten jest znany w literaturze przedmiotu jako pęcznienie pod obciążeniem (ang. *absorbency under load*, AUL). Do tej pory był on jednak wykorzystywany jedynie przy określaniu właściwości fizycznych superabsorbentów stosowanych w produktach higienicznych, np. pieluchach dla dzieci. Wcześniej nie zauważono wpływu obciążenia glebą/gruntem SAP-u na jego zdolności absorpcyjne. Na podstawie tych obserwacji i wykonanych doświadczeń przygotowano zgłoszenie patentowe.

Istotą wynalazku „element geokompozytowy, zwłaszcza do wspomaganie roślin” jest stworzenie konstrukcji szkieletowej, tworzącej przestrzeń dla materiału sorbującego i włókniny umieszczonej na jej powierzchni. Struktura elementu geokompozytowego zapewnia odpowiednią przestrzeń dla pęcznienia materiału sorbującego wodę, pozwalając na prawidłowe wykorzystanie jego zdolności do absorpcji wody. Szkieletowa konstrukcja elementu geokompozytowego umożliwia taki rozkład przestrzenny materiału sorbującego, że pomiędzy jego cząstkami znajdują się przestrzenie wypełnione powietrzem, co jest niezbędne do prawidłowego rozwoju roślin.

Umieszczony w glebie nowy geokompozyt retencjonuje infiltrujące wody opadowe. Korzenie roślin swobodnie przerastają przez włókninę osłonową i mogą pobierać zgromadzoną przez superabsorbent wodę. Zmagazynowana w nim woda umożliwia roślinom szybszy i bardziej efektywny rozwój w okresie wegetacyjnym oraz przetrwanie w okresach niedoboru wody lub suszy.

Materiałem odpowiedzialnym za zatrzymanie wody lub jej roztworów wewnątrz GSW jest superabsorbent (SAP), często występujący pod nazwą hydrożel. Jest to grupa polimerów posiadająca zdolności do absorpcji dużych ilości wody w stosunku do swojej wagi. Produkowane obecnie na skalę przemysłową SAP-y są zazwyczaj lekko usieciowanymi

¹ Wynalazek „element geokompozytowy, zwłaszcza do wspomaganie roślin” – uprawniony: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu; twórcy i udział w jego opracowaniu: Henryk Orzeszyna 30%, **Krzysztof Lejcuś 35%**, Daniel Garlikowski 25%, Andrzej Pawłowski 10%.

potasowymi lub sodowymi solami kwasu poliakrylowego, akrylamidu albo ich kopolimerów. Jednym z podstawowych parametrów opisujących SAP jest zdolność absorpcji. Parametr ten został określony w kartach charakterystyki produktu. Odnosi się on jednak tylko do absorpcji w wodzie demineralizowanej lub 0,9-procentowym roztworze NaCl, odpowiadającym soli fizjologicznej. Zwykle brak jest informacji o przebiegu absorpcji w czasie oraz w innych roztworach, np. roztworach nawozów, z którymi mamy do czynienia w przypadku aplikacji do gleby. W artykule A3 określono te parametry. Był to element zaplanowanej procedury badawczej, niezbędny do prawidłowego doboru superabsorbentów do GSW. Do badań wykorzystano SAP Aquasorb i Aquaterra w różnych uziarnieniach, przy czym pierwszy z nich jest solą potasową kopolimeru kwasu poliakrylowego i akrylamidu, a drugi solą potasową kwasu poliakrylowego. Największą zdolność absorpcji wody wykazał SAP o średnim uziarnieniu, a nie jak podaje producent – ten o najdrobniejszym uziarnieniu. Wynika to z tworzenia się grudek drobnego SAP-u, uniemożliwiających szybką absorpcję. W efekcie tego zjawiska zamknięty wewnątrz materiał brał udział w procesie absorpcji tylko w ograniczonym stopniu. Po godzinie chłonność badanych superabsorbentów wahała się od 284,30 do 369,09 g · g⁻¹, a po 24 h od 315,87 do 335,84 g · g⁻¹. Badania wykonane w wodzie demineralizowanej dla superabsorbentów o podobnym uziarnieniu (Aquasorb 3005 KM i Aquaterra) wykazały, że Aquasorb 3005 KM ma większą zdolność absorpcji (ok. 370 g · g⁻¹) przy ok. 250 g · g⁻¹ Aquaterry. Określono również wpływ jonów zawartych w 1-procentowym roztworze nawozu Florovit oraz w wodzie wodociągowej na zdolności absorpcji obu SAP-ów. W roztworze nawozu chłonność spadła do około 100 g · g⁻¹, natomiast w wodzie wodociągowej do 55–60 g · g⁻¹. Wysokie ograniczenie chłonności w przypadku wody wodociągowej jest efektem obecności szczególnie dwuwartościowych jonów wapnia i magnezu. Badania te miały zasadniczy wpływ na dobór superabsorbentów do GSW – pokazały bowiem wpływ podstawowych jonów zawartych w wodzie wodociągowej i wodnych roztworach nawozów stosowanych w uprawie roślin. Pozwoliło to na taki ich dobór, który daje możliwość skutecznej pracy GSW w różnych warunkach środowiskowych.

Kolejnym zasadniczym elementem GSW jest tworząca zewnętrzną powłokę włóknina. Pełni ona funkcję separującą SAP od gleby oraz przewodzi wodę z kapilar w glebie do wnętrza GSW. Poznanie mechanizmu odpowiedzialnego za te zjawiska było kluczowe dla stworzenia prawidłowo pracującego geokompozytu. Geokompozyty sorbujące wodę pracują w strefie aeracji powyżej zwierciadła wody gruntowej. Podczas użytkowania otulająca je włóknina poddawana jest wielu cyklom suszenia i namakania. Zadaniem włókniny to przechwycenie wody infiltrującej w głąb gleby/gruntu. Do wyznaczenia właściwości

hydraulicznych włókniń w stosowanych standardach projektowych i badawczych zakłada się warunki saturacji. Właściwości te w warunkach aeracji są odmienne. Wyniki badań nad optymalizacją parametrów włókniń stosowanych do geokompozytów zawarto w pracy A4. Dla wytypowanych włókniń oznaczono m.in. ich masę powierzchniową, grubość pod obciążeniem, wodoprzepuszczalność, wodochłonność, porowatość. Ciekawych informacji dostarczyła analiza zmian grubości włókniń pod obciążeniem. Ma ona istotne znaczenie dla ich działania, jako materiał filtrujący. Grubość włókniń i wzrost pozornej gęstości mogą mieć negatywny wpływ na wodoprzepuszczalność. Wśród testowanych włókniń szczególnie duże różnice zaobserwowano dla wodochłonności przy ich zbliżonej wodoprzepuszczalności, która wynosiła 74 mm/s dla włókniń N4 i 79 mm/s dla włókniń N5. Uzyskane wyniki wodochłonności wahały się w przedziale od 478,91 (włókniń N4) do 1314,09 g/m² (włókniń N5). Duże różnice odnotowano też, jeśli chodzi o porowatość. Dla włókniń N1 i N2 średnie wartości wynosiły odpowiednio: 206 i 56 μm.

Badania prowadzono w celu optymalizacji doboru włókniń do GSW w strefie aeracji, ponieważ w tej strefie są one stosowane. Natomiast większość badań dla włókniń prowadzonych jest dla warunków saturacji. Tymczasem obecność powietrza w porach gleby bardzo istotnie zmienia warunki ich pracy. Dotyczy to szczególnie dynamiki frontu zwilżania i dystrybucji wody w glebie/gruncie. Bardzo istotne było opisanie zjawiska przerywania ciągłości kapilar, w literaturze zwanego *capillary break phenomena*. Występowanie tego zjawiska powinno zostać uwzględnione przy doborze geowłókniń, które mają być instalowane w strefie aeracji. Zagadnienie to jest bardzo rzadko poruszane w piśmiennictwie. Wystąpienie *capillary break phenomena* może prowadzić do ograniczenia lub nawet blokowania przepływu wody. Dlatego tak istotne było uwzględnienie tego zjawiska przy doborze włókniń do konstrukcji GSW. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazałem, że dobór włókniń do GSW powinien uwzględniać to, że właściwości hydrauliczne geosyntetyków w strefie aeracji mogą być zawodne. Dla uniknięcia *capillary break phenomena* należy stosować testy doświadczalne w profilach gruntowych lub kolumnach filtracyjnych. Dotyczy to również innych zastosowań geowłókniń w strefie aeracji, np. na pokryciach rekultywacyjnych składowisk odpadów.

Kolejnym etapem zaplanowanej procedury badawczej było sprawdzenie tempa biodegradacji SAP przez mikroorganizmy glebowe. Stanowiło to niezmiernie istotny element przewidzianej procedury badawczej, ponieważ w przypadku szybkiej biodegradacji wybranych superabsorbentów nie byłaby możliwa praca GSW w glebie.

W eksperymencie został użyty czysty, techniczny SAP – Aquasorb 3005 KM, będący usieciowionym kopolimerem akrylamidu i potasowego akrylanu. Zawierające go GSW zostały umieszczone w 31 doniczkach wypełnionych gliniastą glebą ze Rolniczego Zakładu Doświadczalnego Swojec (pH_{KCl} 7,8, C_{org} 12,000 mg kg⁻¹), należącej do UPWr (17°15'E, 51°12'N). Stopień kolonizacji i biodegradacji SAP przez mikroorganizmy glebowe był mierzony przez 9 miesięcy w temperaturze $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Eksperyment prowadzono w trzech powtórzeniach i dwóch wariantach – z posianą trawą i bez. W kolejnym eksperymencie z tym samym technicznym SAP-em sprawdzono możliwość jego wykorzystania przez bakterie glebowe jako źródła węgla. Doświadczenie również prowadzono w dwóch wariantach – z trawą i bez. Bakterie zdolne utylizować SAP, jako jedyne źródło węgla i energii, zostały oznaczone poprzez sekwencjonowanie rybosomalnego RNA (rRNA). Wyniki opracowano statystycznie testem ANOVA/MANOVA.

Po 9-miesięcznej inkubacji stwierdzono ograniczenie początkowej zdolności absorpcji wody o 23,86% (SD \pm 5,57%) i 24,95% (SD \pm 6,55%). Nie stwierdzono natomiast istotnej statystycznie różnicy, jeśli chodzi o obecność korzeni traw w glebie lub ich brak. Na tej podstawie możemy stwierdzić, że obecność korzeni traw wewnątrz geokompozytu nie przyczynia się do zwiększenia tempa biodegradacji SAP przez drobnoustroje glebowe. Obecność korzeni traw wewnątrz GSW i wewnątrz uwodnionego SAP-u nie wpłynęła ani na masę ulegającego biodegradacji SAP-u, ani też na liczbę CFU (*colony forming unit*) bakterii go kolonizujących.

Stwierdzono, że dwa szczepy bakterii – *Rhizobium radiobacter* 28SG oraz *Bacillus aryabhatai* 31SG, wyizolowane z uwodnionego SAP-u – były zdolne do jego kolonizacji i biodegradacji w czystym podłożu. Wśród bakterii *Bacillus aryabhatai* i *Rhizobium radiobacter* znaleziono szczepy, które rozpuszczają fosforan wapnia i produkują fitohormony, takie jak kwas indoloocetowy, kwas masłowy czy kwas abscysynowy, które zostały uznane za rizobakterie zwiększające wzrost roślin.

Uzyskane wyniki są ważne ze względu na potencjalne zastosowania GSW z badanym kopolimerem jako potencjalnego nośnika dla wzrostu roślin i biokontroli bakterii. Ta dodatkowa cecha wzmacnia wykorzystanie geokompozytów sorbujących wodę w celu poprawy retencji wody w glebie rolnej czy do wspierania wzrostu roślin stosowanych w zabezpieczeniach przeciwoerozyjnych.

Przeprowadzone badania umożliwiły skonstruowanie nowego geosyntetyku – geokompozytów sorbujących wodę (GSW). Posiadają one zdolność zatrzymywania wody

infiltrującej w gruncie. W następnym etapie procedury badawczej zostały one poddane serii badań sprawdzających ich sposób działania i skuteczność.

Parowanie jest jedną z najważniejszych przyczyn utraty wody z gleby. Geokompozyty sorbujące wodę zostały zaprojektowane, aby minimalizować te straty. Opisany w publikacji [A6] eksperyment przeprowadzono w komorze klimatycznej, w warunkach regulowanej temperatury – w ciągu dnia 36–40°C i 20–25°C w nocy. Zastosowano dwa rodzaje gleb: piaszczystą i gliniastą oraz dwa rodzaje geokompozytu: w postaci maty i punktowy. Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego (ρ_d) wynosiła 1,406 g cm⁻³ dla gleby piaszczystej i 1,414 g cm⁻³ dla gleby gliniastej. Wilgotność początkowa (w) wynosiła odpowiednio 1,73% i 2,75%. GSW przed eksperymentem nasączono w wodzie (0,5 litra), następnie umieszczono w donicach i dodano po 7 kg gleby. Do donic bez GSW dodano również po 0,5 litra wody. Doświadczenie prowadzono w pięciu powtórzeniach. Kontrole stanowiły doniczki z glebami bez geokompozytu. Utrata wody została obliczona w oparciu o różnicę masy w danym czasie w porównaniu z masą początkową. W ciągu kolejnych 10 dni utratę wody mierzono dwa razy dziennie.

Najmniejszą utratę wody, w porównaniu z utratą wody z doniczek zawierających tylko glebę, stwierdzono w przypadku gleby gliniastej. Taką obserwację przeprowadzono zarówno dla geokompozytu punktowego, jak i dla geokompozytu w postaci maty. Odparowało tu zaledwie 13% wody, która wyparowała z doniczek zawierających glebę gliniastą bez geokompozytu. Podobne wyniki uzyskano dla gleby piaszczystej, w której zostały zainstalowane geokompozyty – dla obu rodzajów GSW odparowało po 15% wody, która wyparowała z doniczek stanowiących próbę kontrolną. Badania wykazały, że straty wody z gleby z zainstalowanym geokompozytem były prawie 7-krotnie niższe niż z samej gleby. Nie zauważono istotnych różnic w parowaniu wody pomiędzy dwoma testowanymi rodzajami geokompozytów.

W ramach dalszych badań GSW zostały sprawdzone w warunkach operacyjnych [A7]. Zaplanowane przeze mnie badania przeprowadzono na doświadczalnym nasypie o wysokości 2 m oraz nachyleniach skarp 1 : 3 i 1 : 1,5. Nachylenie 1 : 3 jest charakterystyczne dla wałów przeciwpowodziowych i skarp składowisk odpadów. Natomiast nachylenie 1 : 1,5 – dla skarp drogowych. Nasyp doświadczalny jest zlokalizowany we Wrocławiu na terenie należącym do Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (51°07'N, 17°08'E). W 2011 r. zainstalowano w podłożu serię geokompozytów, które zostały przykryte 20-centymetrową warstwą piasku średniego i 10-centymetrową warstwą humusu, a następnie obsiane mieszanką traw. Zainstalowano 18 GSW (L = 74,0 cm, H = 5,5 cm, W = 9,0 cm) w 9 poziomych rzędach, po

2 GSW w odstępnie 33 cm. W doświadczeniu z krzewami (*Potentilla fruticosa L.*) zastosowano po jednym geokompozycie. Obserwacje prowadzono przez trzy sezony wegetacyjne. W tym czasie prowadzone były pomiary biometryczne. Poletka były koszone dwa razy w roku. Próbkę do badań wytrzymałościowych pobierano próbnikami o wymiarach $15 \times 15 \times 18$ cm. Do analizy korzeni wykorzystano skaner EPSON Expression 10000XL oraz specjalistyczne oprogramowanie do analizy obrazów WinRHIZO Pro. Statystycznej analizy danych dokonano, wykorzystując pakiet Statistica v. 10.

Na poletkach obsianych mieszanką traw zastosowanie GSW spowodowało zwiększenie maksymalnej długości korzeni o 28,8% (2011), 13,1% (2012) i 12,8% (2013), wzrost objętości korzeni – nawet o 129,7%, a średniej średnicy – o 55,8% (2013). Sucha masa części naziemnych w porównaniu z kontrolną była wyższa o 49,4% (2011), 73,1% (2012) i 50,2% (2013), biomasa odpowiednio o 58,0%, 83,3% i 60,1%.

Wyniki prób wytrzymałościowych potwierdziły obserwacje z pomiarów biometrycznych. Próbkę z poletek z GSW wykazały ponad 20-procentowy przyrost wytrzymałości na ścinanie. Wartości średnie wytrzymałości na ścinanie zwiększyły się z 14,60 kPa dla próbek kontrolnych do 17,54 kPa dla próbek z GSW. Jeszcze lepsze wyniki uzyskano dla korzeni krzewów. Przyrost wytrzymałości na ścinanie wyniósł w tym przypadku ponad 66%, z 10,15 kPa dla próbek kontrolnych do 16,92 kPa dla próbek z GSW. Przeprowadzone 3-letnie badania w warunkach bardzo zbliżonych do rzeczywistych potwierdziły zasadność i skuteczność stosowania geokompozytów sorbujących wodę w zabezpieczeniach przeciwoerozyjnych skarp przy wspomaganie wegetacji roślin.

Ostatnim etapem zaplanowanej procedury badawczej było sprawdzenie funkcjonowania GSW w warunkach rzeczywistych. W tym celu na skarpię wyeksploatowanego złoża piasków w miejscowości Pierwoszków koło Trzebnicy założono doświadczenie o powierzchni ok. 800 m^2 [A8]. Czterdziestometrowej długości skarpa o nachyleniu 1 : 3 i 20-metrowym boku została podzielona na 8 pól doświadczalnych. Pojedyncze poletka miały wymiar 5×20 m. Na połowie poletek zainstalowano GSW w wersji powierzchniowej i liniowej. Obok każdego poletka z geokompozytami założono poletko kontrolne. Całość przykryto warstwą humusu o miąższości 5–7 cm i obsiano mieszanką traw. W pierwszym okresie poletka zostały kilkakrotnie podlane. W późniejszym okresie badawczym nie były już nawadniane. Po dwóch sezonach wegetacyjnych z poletek pobrane zostały próby do badań wytrzymałościowych. Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono, wykorzystując wielkoformatowy aparat bezpośredniego ścinania Shearmatic 300 Wykeham Farrance. Badania przeprowadzono na próbach o wymiarach

30 × 30 × 17 cm i 15 × 15 × 17 cm przy zerowym obciążeniu pionowym, symulując warunki na skarpie. Prędkość ścinania była stała i wynosiła 0,2 mm · min⁻¹. Próby ścinano na głębokości ok. 6–7 cm od góry. Dla badanych prób o wymiarach 15 × 15 × 17 cm z geokompozytem uzyskano wartości wytrzymałości na ścinanie w zakresie 13,3–24,4 kPa. Dla prób kontrolnych bez geokompozytu uzyskano wartości wytrzymałości na ścinanie w zakresie 12,0–18,2 kPa. Uzyskane wyniki badań wykazały 24–29-procentowy wzrost wytrzymałości na ścinanie przy zastosowaniu GSW. Tylko w jednym przypadku uzyskano wyniki podobne jak dla poletka kontrolnego. Zauważono również wyraźną korelację dodatnią między liczbą zainstalowanych GSW na poletku doświadczalnym a wynikami wytrzymałości na ścinanie. Zwiększenie liczby zastosowanych GSW przełożyło się na ponad 83-procentowy przyrost wytrzymałości na ścinanie. Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie geokompozytów sorbujących wodę ma bezpośrednie przełożenie na poprawę i wzmocnienie trawiastych pokryć biotechnicznych.

Podsumowanie

Problem niedoboru wody dla roślin i suszy staje się problemem o coraz większym nasileniu. Zjawiska te dotyczą również roślin pełniących funkcje ochronne na skarpach budowli ziemnych. Rozwiązania mogące ograniczyć te zjawiska, zarówno techniczne, jak i organizacyjne, są bardzo potrzebne w skali globalnej. Za najważniejsze osiągnięcie przedstawionego cyklu uważam opracowanie, wszechstronne przebadanie i sprawdzenie skuteczności działania nowego rodzaju geosyntetyku. Opracowanie geokompozytów sorbujących wodę wymagało przełamania bariery skutecznego i bezpiecznego stosowania superabsorbentów w glebie. W tym zakresie najważniejsze okazało się opisane przeze mnie zjawisko znaczącego ograniczenia ich pęcznienia pod obciążeniem warstwą gruntu. To spostrzeżenie umożliwiło opracowanie nowego, opatentowanego rodzaju geokompozytu składającego się z geowłókniny, superabsorbentu i wewnętrznego szkieletu. Wszechstronne i interdyscyplinarne badania potwierdziły, że:

- istnieje możliwość swobodnego przerastania korzeni roślin do wnętrza GSW i pobierania z nich wody,
- istnieje możliwość swobodnego i bezpiecznego instalowania GSW na skarpach,
- zastosowanie GSW zwiększa przyrosty części naziemnych i podziemnych roślin oraz zwiększa ich odporność erozyjną.

Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Wały przeciwpowodziowe odgrywają bardzo istotną rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa przeciwpowodziowego kraju. Większość z nich została wykonana kilkadziesiąt, a część ponad 100 lat temu. W tym czasie zmieniała się w sposób znaczący nasza wiedza w zakresie sposobu ich budowy i eksploatacji. W początkowym okresie wały były sypane z dość przypadkowych gruntów, pobieranych najczęściej z międzywała lub pobliskiego zawala. Trasa ich przebiegu, wysokość oraz konstrukcja przekroju poprzecznego były bardziej wynikiem wycucia inżynierskiego ówczesnych budowniczych niż efektem badań czy analiz. Część dzisiejszych obwałowań nie była modernizowana od początku XX w. Nie były też regularnie konserwowane, co jest warunkiem ich prawidłowego utrzymania. W tym okresie wystąpiło kilka wezbrań powodziowych, które spowodowały liczne uszkodzenia. W dużej mierze były to uszkodzenia filtracyjne, znacząco osłabiające wytrzymałość wału, nie zawsze widoczne z zewnątrz. Nie naprawiono też części uszkodzeń wynikających ze złej eksploatacji czy bytowania zwierząt. Wymienione czynniki powodują, że duża część polskich obwałowań jest w dalszym ciągu w złym stanie technicznym i wymaga modernizacji, tak aby mogły zapewnić bezpieczeństwo w trakcie wezbrań powodziowych.

Podstawowym rozwiązaniem modernizacyjnym obwałowań jest ich uszczelnienie. Pomimo pojawienia się wielu nowych technologii dalej stosowane są ekrany i fartuchy z gruntów spoistych lub geomembran. Rozwiązania te wiążą się jednak z dużą ilością robót ziemnych, co z kolei przekłada się na ich wysoki koszt. Od lat udoskonalane są technologie wykonywania szczelnych przesłon w podłożu gruntowym. Pozwala to na modernizację wałów przeciwpowodziowych bez potrzeby przemieszczania dużych ilości mas ziemnych i używania ciężkiego sprzętu. Jednak i w tej dziedzinie poszukuje się rozwiązań optymalnych pod względem jakości aplikowanego produktu oraz obniżenia kosztów jego wytworzenia. Opracowano składy zaczynów iniekcyjnych z wykorzystaniem ilu i szlamu o uziarnieniu pyłu piaszczystego, które mogłyby znaleźć zastosowanie w technologiach WIPS, DSM i innych przy wykonywaniu przesłon hydroizolacyjnych.

Publikacje B1 i B2 zawierają podsumowanie wyników badań przeprowadzonych w ramach projektu „Zastosowanie ultradrobnych spoiw na bazie gliny do wykonywania przesłon hydroizolacyjnych” realizowanego przez Przedsiębiorstwo Robót Geologiczno-Wiertniczych G. Janik & R. Kuś sp. j. wraz z UPWr, IMGW-PIB i AGH. Celem projektu było uzyskanie standardu najlepszej dostępnej technologii (BAT) dla trzech technologii

wykonywania przesłon hydroizolacyjnych z zastosowaniem ultradrobnych spoiw na bazie glin.

W tym celu przeprowadzono zakrojone na szeroką skalę badania terenowe i laboratoryjne. Całość prac badawczych podzielona została na dwie zasadnicze części. W pierwszej części wykonano badania laboratoryjne, w których wszechstronnie przebadano zaczyny iniekcyjne. Były one przygotowywane zgodnie z recepturą opracowaną przez zamawiającego badania. Skład mieszanin o zawartości 10, 25, 50 lub 100% dodatku jednego z dwóch zaczynów (na bazie łu Bełchatów lub szlamu z Bolesławca) uzyskiwano poprzez dodanie do masy piasku średniego Ps lub piasku gliniastego Pg określonego procentu wagowego przygotowanego zaczynu. Mieszaniny o zawartości 10 i 25% zaczynu iniektowego miały konsystencję plastyczną i próbki z nich formowano poprzez lekkie ugniatanie mieszaniny w próbniku. Mieszaniny o zawartości 50 i 100% zaczynu oraz same zaczyny miały konsystencję płynną i były wlewane do próbników.

W drugiej części na wale przeciwpowodziowym rzeki Warty w rejonie miejscowości Kostrzyn nad Odrą wykonano sześć 10-metrowych odcinków przesłon. Spośród szeregu opracowanych przez zamawiającego ultradrobnych spoiw wytypowano dwa rodzaje, których skuteczność działania postanowiono przetestować w korpusie istniejącego obwałowania. Projekt badań doświadczalnych przewidywał wykonanie przesłony przeciwfiltracyjnej na 60-metrowym odcinku wału przeciwpowodziowego o wysokości ok. 2,5 m, zbudowanego z piasków drobnych. Spoiwa na bazie łu Bełchatów i szlamu Bolesławiec zaaplikowano trzema metodami: WIPS (wibracyjnie iniektowana przesłona szczelinowa), DSM (ang. *deep soil mixing*) i IN (iniekcja niskociśnieniowa). Wykonanie przesłon zostało poprzedzone dokładnym rozpoznaniem geotechnicznym podłoża gruntowego wału. Następnie po 50-dniowym okresie dojrzewania przesłony dokonano wkopów udostępniających. Odkryto wykonane fragmenty przesłon i pobrano próbki do analiz laboratoryjnych. Oba przeprowadzone zadania badawcze skupiały się na wykonaniu badań terenowych i badaniach współczynników filtracji. Przebadalem zarówno przygotowane w laboratorium iniekty wzorcowe, jak i próbki pobrane z wykonanych w terenie fragmentów przesłon.

Próbki gruntu przeznaczone do badań współczynnika wodoprzepuszczalności (współczynnika filtracji k) pobierane były do cylindrów pomiarowych (próbki NNS) lub, tak jak próbki mieszanin, były formowane w próbnikach. Próbki pobrane w terenie były szczelnie owijane kilkoma warstwami folii. Mieszaniny Ps i Pg z iniektem w przypadku dodatku zaczynu iniektowego 10% i 25% były formowane w próbnikach przez dokładne wymieszanie, a pozostałe były do pojemników wlewane. Każdorazowo określano gęstość objętościową (ρ)

i wilgotność (w). Oznaczono także gęstość właściwą szkieletu gruntowego (ρ_s), składników oraz mieszanin. Próbkę mieszanin, które w procesie dojrzewania uległy skurczowi, na całej powierzchni kontaktu pomiędzy próbką a cylindrem były doszczelniane klejem polimerowym.

Badania wodoprzepuszczalności przeprowadzono w specjalnie do tego celu skonstruowanym aparacie filtracyjnym. Pomiarów wykonywano przy spadku hydraulicznym w zakresie od 2 do 17 w zależności od rodzaju gruntu lub mieszaniny. Przed wykonaniem właściwego pomiaru wodę przez próbkę przepuszczano przez co najmniej 48 h. Dla każdej próbki wykonywano 5–10 pomiarów, odrzucając wartości skrajne. Do badań używano wody destylowanej.

Wyniki pomiarów współczynnika filtracji k mieszanin piasków średniego i iniektu wykonanego na bazie łu Bełchatów wykazują dużą zmienność. Wskazują, że mieszanina piasku średniego z 10-procentowym dodatkiem iniektu na bazie łu Bełchatów nie wpływają znacząco na zmianę współczynnika filtracji. Okazuje się, że zagęszczony piasek średni ma niższą wartość współczynnika filtracji niż mieszanina piasku średniego z 10-procentowym dodatkiem iniektu. Istotna zmiana następuje dopiero w przypadku 25-procentowego dodatku, przy którym uzyskano znacząco niższy wynik. Jest on porównywalny do wartości współczynnika filtracji charakterystycznych dla glin. Dalszy wzrost dodatku iniektu w mieszaninie z piaskiem powoduje stopniowe obniżenie współczynnika filtracji. Zmiany wartości tego parametru nie są jednak już tak duże. Wynika to z różnicy gęstości objętościowych szkieletu gruntowego ρ_d obu mieszanin. Dla piasku średniego z 25-procentowym dodatkiem iniektu wyniosła ona $1,675 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ przy $\rho_d = 1,532 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ dla mieszaniny z 50-procentowym dodatkiem iniektu. Różnica w gęstościach spowodowała, że różnica współczynników filtracji dla tych mieszanin jest mniejsza, niż wynikałoby to z ilości dodanego iniektu.

W praktyce można przyjąć, że już 25-procentowy dodatek iniektu daje istotną zmianę współczynnika filtracji w porównaniu z piaskiem średnim. Przy mieszaninie pół na pół (100-procentowy dodatek iniektu) wartości są zbliżone do wartości uzyskanych dla samego iniektu na bazie łu Bełchatów. Mieszaniny te można uznać za praktycznie nieprzepuszczalne w warunkach piętrzenia wody przez wały przeciwpowodziowe.

Podobnie duża zmienność występowała w przypadku mieszanin piasku średniego z iniektem na bazie szlamu Bolesławiec. Dodatek iniektu w wysokości 10% nie dawał zadowalających efektów. Powodował on nawet nieznaczne zwiększenie wielkości współczynnika filtracji. Jest to zapewne wynik agregacji ziaren piasku z cząstkami iniektu,

których przy tych proporcjach jest zbyt mało, aby wytworzyć strukturę, która skutecznie ograniczałaby filtrację wody w porach mieszaniny. Istotną zmianę współczynnika filtracji osiągnięto dopiero przy 50-procentowym dodatku iniektu. Przy 100-procentowym dodatku iniektu uzyskano dalsze obniżenie wartości współczynnika filtracji o ponad 100% przy znaczących różnicach gęstości szkieletu gruntowego: $\rho_d = 1,729$ i $\rho_d = 1,439 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ odpowiednio dla 50- i 100-procentowego dodatku iniektu. Sam iniekt na bazie szlamu Bolesławiec wykazał najniższy współczynnik filtracji w porównywanej serii, i to przy bardzo niskiej gęstości: $\rho_d = 0,847 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Wartości współczynnika filtracji uzyskane dla mieszanin piasku średniego z 50-procentowym i większym dodatkiem iniektu na bazie szlamu Bolesławiec można porównać z wartościami uzyskanymi dla piasków gliniastych w różnym stanie zagęszczenia.

Przeprowadzona analiza wskazała jednoznacznie, że korzystniejsze wartości współczynnika filtracji uzyskuje się dla mieszanin z wykorzystaniem iniektu na bazie łu Bełchatów. Mieszanki piasku średniego z iniektem na bazie łu Bełchatów miały zdecydowanie korzystniejsze, z punktu widzenia możliwości ich zastosowania w przesłonach przeciwfiltracyjnych, właściwości filtracyjne niż mieszanki wykonane z wykorzystaniem iniektu na bazie szlamu Bolesławiec. W przypadku zastosowania mieszanin piasku gliniastego z iniektem na bazie łu Bełchatów uzyskano również niższe wartości współczynnika filtracji niż w przypadku mieszanin z iniektem na bazie szlamu Bolesławiec. Różnice nie są jednak tu tak duże jak w przypadku mieszanin z piaskiem średnim. Wynika to z właściwości (współczynnik filtracji, przebieg krzywej uziarnienia i wskaźnik różnoziarnistości) samego piasku gliniastego.

Oprócz oceny poszczególnych badań podjąłem próbę oceny na podstawie równoczesnej analizy kilku kluczowych parametrów. W tym celu wytypowałem po cztery parametry, które dla danego zastosowania miały najbardziej istotne znaczenie. Oszacowano hierarchię ich ważności i każdemu przypisano wagę wyrażoną w skali punktowej. Dla rdzenia, jako przesłony przeciwfiltracyjnej, za najważniejszy czynnik uznano współczynnik filtracji, któremu w 20-punktowej skali przyznano maksymalnie 14 punktów. Na podstawie tak dobranej parametryzacji iniektów przedstawiono wnioski i wytyczne do ich stosowania w praktyce inżynierskiej. Według mojej wiedzy uzyskane przeze mnie wyniki współczynników filtracji zaczynów iniekcyjnych oraz wskazane wielkości ich dodatków i najkorzystniejsze techniki aplikacji są wykorzystywane w praktyce do dziś.

Syntetyczne podsumowanie dorobku habilitanta

Mój dotychczasowy dorobek naukowy, badawczy i wdrożeniowy obejmuje: 32 opublikowane prace naukowe (w tym przed doktoratem 4), 47 abstraktów, posterów i wystąpień konferencyjnych, 30 opracowań studialno-projektowych i ekspertyz. Wśród 32 prac naukowych znajduje się 10 prac w języku angielskim, 4 artykuły opublikowane zostały w czasopiśmie ze współczynnikiem wpływu (*impact factor*). Łączna liczba punktów MNiSW według roku publikacji wynosi 300 (tab. 2). Zgodnie z Web of Science Core Collection mój indeks Hirscha wynosi 2, a suma cytowań 5 (tab. 1). Sumaryczny *impact factor* publikacji naukowych z listy Journal Citation Reports (JCR) wynosi IF = 6,664 (tab. 3). Wykonałem 3 recenzje artykułów naukowych dla prestiżowego czasopisma „Ecological Engineering” (<http://www.researcherid.com/rid/A-1410-2017>). Mój „ResearcherID” to: A-1410-2017.

Byłem pomysłodawcą i koordynatorem projektu „Geokompozyty sorbuujące wodę – innowacyjne technologie wspomagające wegetację roślin”, POIG, Priorytet 1, Działanie 1.3, Poddziałanie 1.3.1. W ramach projektu opracowano wynalazek „element geokompozytowy, zwłaszcza do wspomagania wegetacji roślin”, na który udzielono patent PL w Polsce oraz 14 krajach UE i w Turcji. W ramach projektu przygotowano i przeprowadzono pierwszą w Polsce komercjalizację wyników badań B+R finansowanych z Programu Operacyjnego „Innowacyjna Gospodarka”. Na podstawie licencji udzielonej przez Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu firma Geotabo sp. z o.o. wytwarza produkty Hydrobox. Są one obecnie stosowane w inżynierii środowiska jako element zabezpieczenia przeciwoerozyjnego skarp oraz w zieleni miejskiej i ogrodnictwie. Produkty Hydrobox dostępne są w kilkuset sklepach na terenie Polski. W 2017 r. firma rozpoczęła ich eksport do Niemiec, Czech, Rosji i RPA.

Weześniej uczestniczyłem, jako główny wykonawca, w przygotowaniu, realizacji i rozliczeniu projektu celowego realizowanego w ramach Sektorowego Programu Operacyjnego „Wzrost konkurencyjności przedsiębiorstw”, z funduszy na lata 2004–2006, nt. „Zastosowanie ultradrobnych spoiw na bazie gliny do wykonywania przesłon hydroizolacyjnych”. Projekt realizowany był w latach 2007–2008. Opracowane przeze mnie wyniki badań w zakresie współczynników filtracji zaczynów iniekcyjnych oraz metod walidacji przydatności wybranych technologii wykonywania przesłon przeciwfiltracyjnych zostały wdrożone do praktyki gospodarczej przez lidera projektu – firmę PRGW G. Janik, R. Kuś sp. j. Byłem także jednym z pomysłodawców i głównym ekspertem w projekcie

„Partnerstwo na rzecz innowacji – wsparciem dla tworzenia Akademickiego Inkubatora Przedsiębiorczości w Legnicy”, realizowanym w ramach działania 2.6. „ZPORR Regionalne Strategie Innowacyjne i transfer wiedzy”. Również jako główny ekspert uczestniczyłem w realizacji projektu „Studium budowy geologicznej doliny Odry od granicy polsko-czeskiej do ujścia rzeki w aspekcie zagrożeń powodziąmi rejonów przyległych”, który realizowany był na zamówienie Ministerstwa Środowiska. Łącznie uczestniczyłem w przygotowaniu, realizacji, rozliczeniu i wdrożeniu projektów badawczych o wartości ponad 8 milionów złotych.

Uczestniczyłem w Narodowym Programie Foresight Polska 2020 jako ekspert zewnętrzny. Od 2005 r. jestem uczestnikiem Międzynarodowej Sieci Naukowej ENVITECH-Net – International Thematic Scientific Network for Environmental Technologies. Jestem również uczestnikiem Polskiego Stowarzyszenia Geosyntetycznego oraz International Geosynthetics Society.

Odbyłem staże i stypendia naukowe w Fachhochschule Schmalkalden, RWTH Aachen University, Instytucie Technologicznym w Roanne oraz Bergische Universität Wuppertal.

Wykonałem 30 ekspertyz i projektów dla gospodarki narodowej, w tym na zamówienie organów państwowych, w zakresie geotechniki, gospodarki odpadami i rekultywacji składowisk.

Za prowadzoną działalność wynalazczą otrzymałem nagrodę i dyplom od Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Opracowany w ramach projektu, którego byłem koordynatorem, wynalazek był przeze mnie prezentowany na międzynarodowych targach wynalazczości. W Kuala Lumpur, na 25th International Invention, Innovation & Technology Exhibition, otrzymał główną nagrodę dla wynalazku spoza Malezji – Best Invention Overseas oraz złoty medal. Na 62. wystawie The World Exhibition of Inventions, Research and New Technologies – Brussels Innova w Brukseli wynalazek otrzymał dwa złote medale. Wynalazek otrzymał też nagrodę Grand Prix w konkursie INFRAEKO 2014 w Krakowie za najlepsze rozwiązanie produktowe, technologię, wdrożenie i zrealizowaną inwestycję.

Za działalność badawczą i organizacyjną otrzymałem pięć nagród Rektora Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu – I, II i III stopnia.

Wyniki swoich badań prezentowałem na konferencjach krajowych i zagranicznych na czterech kontynentach. Na konferencji International Conference on Natural Science and Environment (ICNSE 2014) w Dubaju prezentowany przeze mnie artykuł otrzymał nagrodę Best Paper Award. Jestem współautorem prezentacji, która otrzymała nagrodę Review Panel

Reward for the Education Session podczas Environmental Connection Conference 2015 w Portland, USA.

Byłem pomysłodawcą i głównym organizatorem czterech konferencji promujących wyniki projektu „Geokompozyty sorbujące wodę – innowacyjne technologie wspomagające wegetację roślin”. W ramach działalności popularyzującej naukę wielokrotnie prezentowałem uzyskane w ramach tego projektu wyniki w środkach masowego przekazu, m.in. w telewizji Polsat, TVN, TVN24, TVP, miesięczniku „Warzywa” czy na antenie Polskiego Radia. Geokompozyty sorbujące wodę prezentowałem również w programach popularno-naukowych: „Laboratorium europejskie”, „Laboratorium pomysłów” i „Innowacyjnie, czyli jak?”

W trakcie pracy na UPWr prowadziłem lub prowadzę zajęcia z 10 przedmiotów na 4 kierunkach studiów, w tym wykłady i ćwiczenia z 2 przedmiotów w języku angielskim. Byłem opiekunem 21 prac magisterskich i 1 pracy inżynierskiej.

Szczegółowe informacje na temat mojego dorobku naukowo-badawczego oraz pozostałych osiągnięć w zakresie działalności dydaktycznej, organizacyjnej i popularyzującej naukę oraz zestawienie prac zastosowanych w praktyce przedstawiono w załącznikach 3-6.

Tabela 1. Cytowania publikacji habilitanta

Baza	Suma cytowań	H-index
Web of Science Core Collection	5	2
Web of Science – Cited Reference Search	20	–
Google Scholar	36	3

Tabela 2. Wykaz publikacji habilitanta

Czasopismo	<i>Impact factor</i> (IF)	Liczba publikacji	Punkty*
Czasopisma naukowe posiadające współczynnik <i>impact factor</i> (IF) wraz z liczbą punktów według roku publikacji; dla publikacji z 2016 r. posłużono się IF z 2015 r.			
Geosynthetics International	2,066	1	25
Fibres & Textiles in Eastern Europe	0,566	1	25
Desalination and Water Treatment	1,272	1	20
Environmental Science and Pollution Research	2,760	1	30
Suma	6,664	4	100
Czasopisma naukowe nieposiadające współczynnika <i>impact factor</i> (IF) wraz z liczbą punktów według roku publikacji; w nawiasach publikacje sprzed doktoratu			
Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu		2 (1)	4
Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., PAN		(1)	6
Archives of Environmental Protection		1	9
Architektura Krajobrazu		1	4
Woda, Środowisko, Obszary Wiejskie		1	6
Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich		5	28
Inżynieria Morska i Geotechnika		1	6
Suma		12	63
Monografie naukowe**			
Monografie			
• autorstwo monografii naukowej		4	88
• rozdział w monografii naukowej		8 (2)	34
Suma		12	122
Inne publikacje			
Publikacja naukowa w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej, uwzględnionych w uznanej bazie publikacji naukowych o zasięgu międzynarodowym		1	15
Recenzowane publikacje naukowe w czasopismach lub materiałach konferencyjnych nieuwzględnionych w wykazie czasopism punktowanych		1	0
Suma		2	15
Razem (wszystkie publikacje)	6,664	30	300

* Zgodnie z Uchwałą nr 30/833/2015 Rady Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu z dnia 22.04.2015 r. dla publikacji wydanych przed rokiem 2010 ma zastosowanie lista MNiSW z dnia 25.06.2010 r.

** Zgodnie z Uchwałą nr 30/833/2015 Rady Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu z dnia 22.04.2015 r. w odniesieniu do monografii (rozdziałów w monografii) stosuje się zasady obowiązujące w przepisach dotyczących oceny parametrycznej jednostek naukowych. Dla monografii wydanych przed rokiem 2009 przyjmuje się zasady jak w latach 2009–2012.

Bibliografia

1. Stephenson D.B. 2008. Definition, diagnosis and origin of extreme weather and climate events (Chapter 1). In: *Climate Extremes and Society*. R.J. Murnane & H.F. Diaz (eds.). Cambridge University Press. 348.
2. IPCC. *Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press. 881.
3. Frich P., Alexander L.V., Dell-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G., Peterson T. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research* 19 (3). 193–212.
4. Miętus M. 2005. *Ekstremalne zjawiska klimatyczne z perspektywy IPCC*. PTFG, IMGW. Warszawa.
5. Fiałkiewicz W., Burszta-Adamiak E., Malinowski P., Kolonko A. 2013. Urban Water Footprint – city water management monitoring and evaluation system. *Och. Sr.* 35 (3). 9–12.
6. Buchholz F.L., Graham T. 1997. *Modern Superabsorbent Polymer Technology*. New York: Wiley-VCH. 304.
7. Li X., He J.Z., Hughes J.M., Liu Y.R., Zheng Y.M. 2014. Effects of super-absorbent polymers on a soil-wheat (*Triticum aestivum L.*) system in the field. *Applied Soil Ecology* 73. 58–63.
8. Caló E., Khutoryanskiy V.V. 2015. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal* 65. 252–267.
9. Zohuriaan-Mehr M.J., Omidian H., Doroudiani S., Kabiri K. 2010. Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials. *Journal of Materials Science* 45 (21). 5711–5735.
10. Justs J., Wyrzykowski M., Winnefeld F., Bajare D., Lura P. 2014. Influence of superabsorbent polymers on hydration of cement pastes with low water-to-binder ratio. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 115 (1). 425–432.
11. Orts W.J., Roa-Espinosa A., Sojka R.E., Glenn G.M., Imam S.H., Erlacher K. 2007. Use of synthetic polymers and biopolymers for soil stabilization in agricultural, construction, and military applications. *Journal of Materials in Civil Engineering* 19 (1). 58–66.

12. Yang L.X., Yang Y., Chen Z., Guo C.X., Li S.C. 2014. Influence of super absorbent polymer on soil water retention, seed germination and plant survivals for rocky slopes eco-engineering. *Ecological Engineering* 62. 27–32.
13. Bakass M., Mokhlisse A., Lallemand M. 2002. Absorption and desorption of liquid water by a superabsorbent polymer: Effect of polymer in the drying of the soil and the quality of certain plants. *Journal of Applied Polymer Science* 83(2). 234–243.
14. Liang R., Liu M.Z., Wu L. 2007. Controlled release NPK compound fertilizer with the function of water retention. *Reactive & Functional Polymers* 67 (9). 769–779.
15. Rudzinski W.E., Dave A.M., Vaishnav U.H., Kumbar S.G., Kulkarni A.R., Aminabhavi T.M. 2002. Hydrogels as controlled release devices in agriculture. *Designed Monomers and Polymers* 5 (1). 39–65.
16. Wei Y., Durian D.J. 2013. Effect of hydrogel particle additives on water-accessible pore structure of sandy soils: A custom pressure plate apparatus and capillary bundle model. *Physical Review E*. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.053013.
17. Johnson M.S., Veltkamp C.J. 1985. Structure and functioning of water-storing agricultural polyacrylamides. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 36 (9). 789–793.
18. Kiatkamjornwong S. 2007. Superabsorbent polymers and superabsorbent polymer composites. *Science Asia* 33 (1). 39–43.
19. Sojka R.E., Lentz R.D., Westermann D.T. 1998. Water and erosion management with multiple applications of polyacrylamide in furrow irrigation. *Soil Science Society of America Journal* 62 (6). 1672–1680.
20. Hejduk S. 2010. Evaluation of rootzone mixes and water retentive amendment materials in sports surface constructions. Dunsford: Stapledon Memorial Trust. Available from: <http://www.stapledontrust.org.uk/documents/HEJDUK-SMT-Report-2010.pdf>
21. Paluszek J. 2003. Kształtowanie syntetycznymi polimerami właściwości gleb erodowanych terenów lessowych. *Rozprawy naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie, zeszyt 277*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie.
22. Orzeszyna H., Garlikowski P., Pawłowski A. 2004. Geokompozyt z superabsorbentem w ubezpieczeniach biotechnicznych. *Materiały Budowlane* 8. 40–42.