

**dr inż. Mariusz Cholewa**

załącznik 2

Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki  
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji  
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

# **A U T O R E F E R A T**

**przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych z  
elementami życiorysu  
i opisem jednotematycznego cyklu publikacji**

Kraków, kwiecień 2019 r.

## Spis treści

1. Dane personalne	3
2. Wykształcenie	3
3. Inne formy edukacji	3
4. Przebieg pracy zawodowej	4
5. Przebieg pracy naukowej	4
6. Osiągnięcia w działalności naukowo-badawczej	5
6.1. Kierunki badań i osiągnięcia naukowe przed uzyskaniem stopnia doktora	8
6.2. Kierunki badań i osiągnięcia naukowe po uzyskaniu stopnia doktora	12
7. Wykazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust 2 ustawy z dnia 14 marca 2013 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.)	22
7.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	22
7.2. Wykaz prac dokumentujących osiągnięcia naukowe	22
7.3. Cel badań	23
7.4. Opis uzyskanych wyników	24
7.4.1. Wstęp	24
7.4.2. Wyniki	30
7.4.3. Wskazanie najważniejszych osiągnięć cyklu publikacji stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego	52
7.4.4. Możliwości aplikacyjne uzyskanych wyników	53
8. Podsumowanie	54
9. Spis literatury	55
10. Spis symboli	59

**1. Dane personalne**

Imię i nazwisko habilitanta:	Mariusz Cholewa
Miejsce pracy:	Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków.

**2. Wykształcenie**

IX 1991 – VI 1993	Technik melioracji wodnych, Zespół Szkół Melioracji Wodnych w Krakowie, Policealne Studium Zawodowe.
X 1993 - XI 1998	Magister inżynier specjalność inżynieria środowiska, Jednolite studia magisterskie (5-letnie) na Wydziale Inżynierii Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Kierunek: Inżynieria Środowiska.
II 2005	Stopień doktora nauk rolniczych w zakresie kształtowanie środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej im. Hugona Kołłątaja w Krakowie.

**3. Inne formy edukacji**

19 październik 1999 - 21 maj 2000	Politechnika Krakowska – kurs z przedmiotu „Ochrona powierzchni ziemi” – zaświadczenie
październik 2000 - maj 2001	Studium Pedagogiczne dla Absolwentów Szkół Wyższych, organizatorzy: Centrum Pedagogiki i Psychologii Politechniki Krakowskiej, uzyskanie przygotowania pedagogicznego do prowadzenia zajęć dydaktycznych - dyplom ukończenia.
13-15 wrzesień 2006	Warsztaty Projektanta firmy Fatzer AG Geobrugg Protection Systems obejmujące: System stabilizacji skarp i nasypów TECCO, Koncepcję wymiarowania RUVOLUM. Kraków (certyfikat)
19-20 kwietnia 2012	Seminarium Geotechniczne „EBGEO – Zalecenia dla geotechnicznego projektowania budowli ziemnych ze zbrojeniem geosyntetycznym”, Ożarów Mazowiecki, (certyfikat)
29-30 listopada 2014	Warsztaty: Prowadzenie zajęć dydaktycznych w środowisku multikulturowym. Zajęcia w ramach projektu „Wzmocnienie potencjału dydaktycznego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie”. Kraków, (certyfikat)
7, 14, 21, 28 listopad, 12 grudzień 2016.	Warsztaty: Metody aktywizujące (nauki przyrodnicze). UJ Centrum Doskonalenia Dydaktyki Akademickiej - Ars Docendi UJ, Wydział Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków; 15 godz. warsztaty kończące się zaliczeniem.
11 kwiecień 2017	Warsztaty: Szkoła Mikropali edycja 2017. Organizatorzy: Titan Polska Sp. z o.o., Kraków (certyfikat)
26 - 28 kwiecień 2017	Warsztaty: ENVIREE Krakow Summer School on Rare Earth Elements recovery and environmental issues. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Nuclear Chemistry and Industrial Materials Recycling, Chalmers University of Technology, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków, (certyfikat)

---

16 styczeń 2018	Zmiany prawa budowlanego w 2017r. Założenia kodeksu urbanistyczno-budowlanego. Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa Oddział Małopolski w Krakowie, Ośrodek Rzecznawstwa i Szkolenia Budowlanego PZITB-ORSB, Małopolska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa w Krakowie, Kraków.
3 lipiec - 27 wrzesień 2018	Kurs języka angielskiego Metodą Callana na poziomie Elementarnym wyższym "Stage 4". CALLAN Szkoła języka angielskiego. Kraków. (certyfikat)

---

#### 4. Przebieg pracy zawodowej

---

1999 – 2005	Akademia Rolnicza im. Hugona Koffątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemnego, pracownik naukowo-dydaktyczny, stanowisko: asystent
2005 – nadal	Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Koffątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, pracownik naukowo-dydaktyczny, stanowisko: adiunkt

---

#### 5. Przebieg pracy naukowej

---

25.11.1998	Obrona pracy magisterskiej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej im. H. Koffątaja w Krakowie, specjalizacja; Inżynieria Wodna – mgr inż. inżynierii środowiska. Temat pracy magisterskiej: „Analiza efektów oczyszczania ścieków bytowo-gospodarczych z wiejskich jednostek osadniczych w oczyszczalniach typu ECOLO-CHIEF na przykładzie oczyszczalni w Piekarach k/Krakowa”. Promotor: dr inż. Stanisław Krzanowski.
16.04.2004r.	Otwarcie przewodu doktorskiego przez Radę Wydziału Inżynierii Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Koffątaja w Krakowie - promotor prof. dr hab. inż. Krystyna Skarżyńska
09.02.2005r.	Publiczna obrona rozprawy doktorskiej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Koffątaja w Krakowie, pt.: „Wpływ geosiatek na wodoprzepuszczalność i odkształcalność nasypów z odpadów powęglowych” Promotor: prof. dr hab. inż. Krystyna Skarżyńska Recenzenci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Bednarczyk (Akademia Rolnicza im. Hugona Koffątaja w Krakowie) dr hab. inż. Adam Niedzielski (Akademia Rolnicza w Poznaniu).

---

## 6. Osiągnięcia w działalności naukowo-badawczej

Dorobek naukowy:

Pełny wykaz prac opublikowanych znajduje się w załączniku 4.

W skład dorobku wchodzi **87** prac.

Suma punktów za oryginalne prace twórcze według punktacji MNISW w roku wydania wynosi **342** (tab. 2), z czego udział indywidualny to **208** punktów.

Szczegółowy opis dorobku:

- liczba publikacji w czasopismach naukowych - **38** [A.1.1, B.1.1-B.1.8, B.2.1-B.1.29]
- monografie naukowe - **1**
- oryginalne prace twórcze w materiałach konferencyjnych - **7** (recenzowane)
- doniesienia naukowe, streszczenia referatów i posterów w materiałach konferencyjnych - **21**.
- prace niepublikowane - **20**

Tab. 1. Syntetyczne zestawienie dorobku naukowego

Wyszczególnienie	Przed doktoratem	Po doktoracie	Ogółem
<b>Prace publikowane:</b>			
- oryginalne prace twórcze na podstawie badań własnych	2	65	67
- artykuły popularno-naukowe	0	0	0
<b>Razem:</b>	<b>2</b>	<b>65</b>	<b>67</b>
<b>W tym prace:</b>			
-w czasopismach naukowych w języku angielskim	0	4	4
- w czasopismach naukowych w języku polskim	1	33	34
- w materiałach konferencyjnych recenzowanych	1	6	7
- w streszczeniach materiałów konferencyjnych	0	21	21
- monografie	0	1	1
<b>Razem:</b>	<b>2</b>	<b>65</b>	<b>67</b>
<b>Prace niepublikowane:</b>			
- rozprawy	2	0	2
- sprawozdania końcowe z badań i grantów	1	2	3
- prace projektowe, ekspertyzy, badania zamawiane	5	10	15
<b>Razem:</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>20</b>
<b>Łącznie:</b>	<b>10</b>	<b>77</b>	<b>87</b>

Według stanu do dnia 5 kwietnia 2019 r. liczba prac indeksowanych w bazie Web of Science (Core Collection - Basic Search) wynosiła 8, liczba cytowań 9, indeks H (Hirscha) wynosił 2, natomiast w bazie Web of Science (Core Collection - Cited Reference Search) liczba prac indeksowanych wynosiła 11, liczba cytowań 20.

Sumaryczna liczba prac indeksowanych w bazie Web of Science Basic Search + Cited Reference Search (wyluczając dublety) wynosi 17, liczba cytowań 27, indeks H (Hirscha) wynosi 2.

Według bazy Scopus, liczba prac wynosi 5, moje artykuły były cytowane 5 razy i według tejże bazy, mój indeks H wynosi 1. W bazie Publisch or Perish (według Google Scholar) było indeksowanych 28 prac, cytowane 33 razy a indeks H wynosi 3. Sumaryczny Impact Factor (IF) moich publikacji według listy Journal Citation Reports (JCR) wynosi 2,42.

Tab. 2. Zestawienie dorobku naukowego według oceny punktowej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Wyszczególnienie	Język publikacji	Liczba prac	IF	Punkty wg MNiSW	
				Ind. za czasopismo	Suma
<b>Czasopisma naukowe znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JCR) i indeksowane w bazie Web of Science</b>					
Annual Set The Environment Protection	A	1	0,806	15	15
Annual Set The Environment Protection	P	1	0,806	15	15
Annual Set The Environment Protection	P	1	0,808	15	15
<b>Czasopisma naukowe nie ujęte w bazie Journal Citation Reports (JCR), ale indeksowane w bazie Web of Science</b>					
Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus (od 2015 r. włącznie)	P	4	-	10	40
Journal of Ecological Engineering	P	1	-	12	12
E35 Web of Conference	A	1	-	15	15
<b>Czasopisma naukowe nieposiadające współczynnika wpływu Impact Factor (IF) i nieindeksowane w bazie Web of Science</b>					
Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus (do 2015 r.)	P	3	-	10	30
Acta Scientiarum Polonorum, Seria: Architectura	P	1	-	11	11
Inżynieria Morska i Geotechnika	P	2	-	4/6	10
Przegląd Górniczy	P	4	-	6/7	26
Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych	P	1	-	4	4
Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich	P	6	-	5/10	45
Inżynieria Ekologiczna	P	1	-	9	9
Izolacje	P	4	-	6	24
Drogownictwo	P	1	-	4	4
Górnictwo i Geoinżynieria	P	3	-	6	18
AGH Journal of Mining and Geoengineering	A	1	-	5	5
Inżynieria i Ochrona Środowiska	P	1	-	4	4
Proceedings of 4th Conference and Working Session EUREKA 2016, (ISSN 2464-4595, ISBN 978-80-214-5338-8)	A	1	-	15	15
<b>Razem:</b>		<b>38</b>	<b>2,42</b>		<b>317</b>
Monografie	P	1	-	25	25
Artykuły popularno-naukowe	P	2	-	-	-
<b>Razem:</b>		<b>3</b>	<b>-</b>		<b>25</b>
<b>Ogółem:</b>		<b>41</b>	<b>2,42</b>		<b>342</b>

Mój dorobek obejmuje również 20 opracowań niepublikowanych, których byłem autorem lub współautorem. Zaliczają się do nich: praca magisterska, rozprawa doktorska, prace badawcze finansowane ze środków budżetowych na naukę (sprawozdania końcowe z wieloletnich badań statutowych) [zał. 4: A.4.1–A.4.3, B.3.1–B.3.27, B.5.1, B.5.2], Byłem także współautorem prac projektowych wykonywanych na rzecz gospodarki (finansowanych ze środków pozabudżetowych) [zał. 4: A.5.1–A.5.5, B.6.1 - B.6.10].

Wykonałem 2 recenzje artykułów naukowych dla czasopisma z listy B MNiSW: *Acta Scientiarum Polonorum – Formatio Circumiectus*. Jako recenzent miesięcznika *Izolacje* (<http://www.izolacje.com.pl/recenzenci>) wykonałem 4 recenzje artykułów o charakterze branżowym. Czasopismo jest ujęte na liście B MNiSW.

W okresie przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora na mój dorobek naukowy składały się 2 recenzowane, oryginalne prace naukowe [zał. 4: A.1.1, A.2.1] i 8 prac niepublikowanych [zał. 4: A.4.1–A.4.3, A.5.1–A.5.5,]. Również w tym okresie prowadziłem badania statutowe sporządzając coroczne sprawozdania jako wykonawca [zał. 4: A.4.1].

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora mój dorobek naukowo-badawczy powiększył się o 65 prac opublikowanych, z czego 38, to oryginalne recenzowane prace twórcze zamieszczone w czasopismach i monografiach [zał. 4: B.1.1–1.8, B.2.1–B.2.29, B.4]. Suma punktów według punktacji MNiSW po uzyskaniu stopnia doktora wyniosła 338.

W całym okresie działalności naukowej uczestniczyłem łącznie w 75 konferencjach (w tym 23 międzynarodowych) [zał. 4: Z.1.1-Z.1.4, Z.2.1-Z.2.71] 118 warsztatach i szkoleniach [zał. 5: p.3.2] o zasięgu krajowym i międzynarodowym. Wyniki swoich badań prezentowałem w formie 10 referatów i 30 posterów na konferencjach i seminariach, z tego 9 referatów i 30 posterów prezentowałem po uzyskaniu stopnia doktora [zał. 4: Z.2.1–Z.2.71].

Już po doktoracie, w roku 2008 byłem laureatem stypendium z Rektorskiego Funduszu Stypendialnego Akademii Rolniczej w Krakowie. Temat pracy zrealizowanej w ramach stypendium brzmiał: "Wpływ zastosowania geowłóknin na wodoprzepuszczalność nasypu hydrotechnicznego" [zał. 4: B.5.1].

Również po doktoracie, byłem kierownikiem projektu badawczego finansowanego ze środków Komitetu Badań Naukowych, numer: N N523 610339, nr umowy: 6103/B/T02/2010/39. Tytuł projektu badawczego: "Ocena wpływu uszczelnień skarpowych na filtrację przez nasypy z popioło-żuźli". Termin rozpoczęcia realizacji projektu: 28.09.2010, termin zakończenia realizacji projektu: 27.09.2012, [B.5.2].

Uczestniczyłem także w przygotowaniu i wykonaniu projektu wymian i staży: „Gospodarka wodna na obszarach wiejskich” nr 2010-1-PL1-LEO03-10419 Realizowanego w Turynii w ramach Wspólnotowego Programu Kształcenia i Doskonalenia Zawodowego „Uczenie się przez całe życie –



LLP” 2007-2013, Termin rozpoczęcia realizacji projektu: 09.09.2010, termin zakończenia realizacji projektu 09.02.2011.

### **6.1. Kierunki badań i osiągnięcia naukowe przed uzyskaniem stopnia doktora**

Główne kierunki moich badań realizowane przed uzyskaniem stopnia doktora, były związane z ówczesną tematyką opracowań prowadzonych w Katedrze Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemnego Akademii Rolniczej w Krakowie. Od roku 1999 pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Krystyny Skarżyńskiej, zajmowałem się możliwością wykorzystania odpadów powęglowych w budownictwie ziemnym. Badałem odpady powstające w trakcie wydobycia węgla, procesów flotacji oraz podczas robót przygotowawczych udostępniających złoża. W omawianym okresie (1980-2000) Polska zmniejszyła ilość wydobywanego węgla kamiennego jednak w dalszym ciągu każdej tonie wydobytego surowca towarzyszyło ok. 400 kg odpadów. Największa liczba czynnych jeszcze składowisk znajduje się na terenie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego, i tam zagadnienie utylizacji oraz zagospodarowania odpadów górniczych rysowało się najwyraźniej.

Jednym z najistotniejszych działań na rzecz ochrony środowiska w rejonach eksploatacji węgla kamiennego jest rekultywacja terenów pogórnich. Składa się na nią zespół przedsięwzięć projektowo-technicznych oraz organizacyjno-wykonawczych i biologicznych, których celem jest przywrócenie terenom zdegradowanym właściwości użytkowych i przyrodniczych. Wykorzystanie odpadów powęglowych do gruntowych konstrukcji zbrojonych w szeroko pojętym budownictwie ziemnym stanowiło sposób na ich utylizację.

Miało to aspekt praktyczny z uwagi na stale pogłębiający się deficyt gruntów rodzimych. Jest to również postępowanie proekologiczne wchodzące w zakres recyklingu. W przypadku wznoszenia obwałowań cieków powierzchniowych na terenach objętych szkodami górniczymi istotnego znaczenia nabiera wpływ pionowych odkształceń podłoża na redukcję parametrów wytrzymałościowych materiału. Przy znacznych osiadaniach podłoża w korpusach obwałowań mogą powstać uszkodzenia. Zjawisko to można ograniczyć przez wprowadzenie zbrojenia [4, 36].

W swoich pracach badawczych prowadzonych w Laboratorium Geotechnicznym Katedry Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemnego dla określenia właściwości geotechnicznych nieprzepalonych odpadów powęglowych [zał. 4: A.1.2, A.2.1]. Skupiłem się głównie na parametrach charakteryzujących proces filtracji wody przez nasypy hydrotechniczne. Prowadziłem szeroko zakrojone badania filtracji przez modele nasypów w specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym, starając się odtworzyć warunki najbardziej zbliżone do filtracji przez naturalne obwałowania. Modele o masie kilku ton dawały możliwość wbudowania dodatkowych elementów, takich jak zbrojenie, drenaż oraz zainstalowanie urządzeń pomiarowych.



Również w omawianym okresie moje zainteresowania naukowe obejmowały geosyntetyki [A.1.1]. Stosowałem geosiatki jako poziome warstwy zbrojenia w nasypach hydrotechnicznych. Wykonywałem badania laboratoryjne filtracji przez modele nasypów zbudowanych w skali. Określałem następujące parametry: wielkości wydatku filtracyjnego, zmiany kształtu krzywych depresji, ciśnienia spływowego, przemieszczeń pionowych korony nasypu, modułów odkształceń, zmian gęstości i wilgotności gruntu wbudowanego w nasyp, parametrów uziarnienia.

Zajmowałem się również zagadnieniem wpływu wbudowanych w nasyp poziomych wkładek zbrojenia z geosiatek na wielkość przepływu filtracyjnego przez te budowle. Geosiatki były stosowane do zbrojenia nasypów hydrotechnicznych [A.2.1].

W wyniku przeprowadzonych badań:

- określiłem jak typ wbudowanej geosiatki wpływa na wartość wydatku oraz na kształt krzywych depresji,
- sprawdziłem w jakim zakresie uziarnienia odpady powęglowe mogą poprawnie współpracować z geosiatkami o określonej powierzchni pojedynczego oczka,
- określiłem jak zmieniają się parametry geotechniczne gruntu nasypu hydrotechnicznego na skutek działania filtrującej wody,
- zajmowałem się ciśnieniem spływowym działającym na skarpy nasypów,
- sprawdziłem w jakim zakresie parametry uziarnienia materiału decydują o wodoprzepuszczalności modeli nasypów zbrojonych geosiatkami.

W pewnych warunkach nie zawsze można zastosować właściwe nachylenie skarp z uwagi na ograniczoną powierzchnię pod nasyp. W takich przypadkach aby zapewnić stateczność nasypom można wprowadzić geosiatki tworząc w ten sposób konstrukcje o charakterze gruntu zbrojonego [A.1.1, A.2.1]. W takich budowlach miejscami inicjującymi powstanie deformacji filtracyjnych mogą być strefy kontaktowe pomiędzy materiałem nasypu, a wbudowanym zbrojeniem, stanowiące uprzywilejowane drogi filtracji.

Modelując intensywną filtrację wody przez nasypy z odpadów powęglowych badałem i analizowałem odkształcenia i deformacje skarp oraz wyparcie gruntu czy sufozję, które to zjawiska mają duży wpływ na stateczność i pracę budowli. Odpady powęglowe bezpośrednio z kopalń i z nowych zwałowisk charakteryzowały się wysokim współczynnikiem filtracji rzędu  $10^{-3}$  do  $10^{-4}$   $m \cdot s^{-1}$ . Dla materiału ze zwałowisk wieloletnich współczynnik był bardziej zróżnicowany i wynosił od  $10^{-3}$  do  $10^{-5}$   $m \cdot s^{-1}$ . Wartości współczynnika filtracji zmniejszały się wraz ze wzrostem zagęszczenia materiału i zawartości frakcji mniejszej od 0,2 mm. Od stopnia zagęszczenia i rodzaju gruntu zależała również wielkość filtracji wody przez nasyp.

Wykonywałem badania podstawowych właściwości fizycznych i mechanicznych nieprzepalonych odpadów powęglowych pochodzących z prowadzących działalność wydobywczą kopalni węgla kamiennego KWK Sośnica, pobierając próby w różnym okresie. Określiłem, że pomimo pochodzenia odpadów z tej samej kopalni, różnią się uziarnieniem, a różnica wynika z technologii prowadzenia robót wydobywczych, sposobu zwałowania odpadów na hałdzie oraz okresu składowania. Według klasyfikacji geotechnicznej sklasyfikowano odpady jako żwir i żwir gliniasty.

W wyniku tych badań wykazałem, że grunt antropogeniczny jakim jest odpad powęglowy generalnie cechował się akceptowalnymi dla budownictwa ziemnego właściwościami geotechnicznymi.

Na podstawie przeprowadzonych badań określiłem następujące zależności:

- typ zastosowanej geosiatki, jako zbrojenie nasypów hydrotechnicznych z odpadów powęglowych nie powoduje zwiększa wodoprzepuszczalności całej konstrukcji,
- badania nośności gruntu przez obciążenie korony nasypów płytą o średnicy 30 cm wykazały, że zastosowanie geosiatki ZŁOTY STOK-201 i TENSAR-SS40 zwiększa wytrzymałość konstrukcji w stosunku do nasypów niezbrojonych,
- pomiary pionowych odkształceń korony nasypów zbrojonych i niezbrojonych w czasie całego cyklu badań, wykazały nieznaczne różnice wysokości rzędu jednego milimetra, które mieszczą się w granicach błędów pomiarowych i nie mają istotnego znaczenia,
- parametry uziarnienia materiału (szczególnie zawartość frakcji pyłowej z ilową) z którego zostały zbudowane nasypy mają znaczący wpływ na wielkość uzyskanego wydatku filtracyjnego. Ma to swoje odzwierciedlenie w znacznie mniejszym ustabilizowanym wydatku filtracyjnym i współczynniku filtracji zarówno dla nasypów zbrojonych jak i niezbrojonych. Przykładowo dla nasypów niezbrojonych zawartość frakcji pyłowej z ilową = 5,9% to współczynnik filtracji wynosi  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s, natomiast przy zawartości 13,6% wynosi  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s,
- wartości ciśnienia spływowego obliczone zarówno dla skarpy odwodnej jak i odpowietrznej nie wykazują bezpośredniej zależności od wbudowanego w nasyp zbrojenia. Większy wpływ mają parametry filtracyjne odpadów powęglowych,
- pomiary wahań poziomów wody wewnątrz korpusu modeli bez geosiatek, przy utrzymywaniu stałego poziomu piętrzenia zależne były od uziarnienia odpadów powęglowych,
- wraz ze zmianą wysokości położenia krzywej depresji w korpusie nasypu zmieniają się wartości wydatków, zależność jest odwrotnie proporcjonalna i najsilniej zachodzi dla początkowego odcinka krzywej filtracji w nasypie od strony wody górnej.

Wyniki przeprowadzonych badań modelowych były podstawą do prognozowania zachowania się pełnowymiarowych nasypów z odpadów powęglowych zbrojonych geosiatkami. Jak wykazały badania, zbrojenie wbudowane w nasyp z odpadów powęglowych może wywierać wpływ na parametry fizyczne i mechaniczne kompozytu jakim jest grunt zbrojony. Związane jest to głównie ze strukturą geosiatek i wielkością powierzchni właściwej współpracującej w strefach kontaktu z materiałem wypełnienia. Wiąże się to również z podatnością (sztywnością) geosiatek, małą zawartością frakcji pyłowej i ilowej w odpadach powęglowych. Może to wpływać na powstanie deformacji filtracyjnych.

Ponadto przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora prowadziłem laboratoryjne badania własności gruntów projektowanej zapory w Wilkowicach na potoku Wilkówka k. Bielska. [A.5.1]. W zespole badawczym prowadziłem badania terenowe oraz laboratoryjne oceny stanu technicznego zapór ziemnych zbiornika „Maziarnia” w Wilczej Woli. Sprawdziłem skuteczności prac korekcyjnych, prowadziłem kontrolne pomiary pracy zapór, analizowałem materiał uzyskany z badań oraz opracowałem dokumentację potwierdzającą sprawność zapór. [A.5.2]. Również jeszcze przed uzyskaniem stopnia doktora brałem udział w badaniach w zakresie przydatności popiołów ze składowiska Elektrociepłowni „Łęg” w Krakowie do wnoszenia nasypów drogowych [A.5.3]. Uczestniczyłem w opracowaniach z zakresu rozpoznania podłoża gruntowego pod obiekty punktowe i liniowe [A.5.4]. Brałem udział w badaniach warunków gruntowo-wodnych podłoża pod projektowane ekrany akustyczne wzdłuż ulic: Zielińskiego, Opolskiej i Pasternik w Krakowie [A.5.5]. Rozwinięcie powyższych zagadnień zawiera załącznik 6.

## 6.2. Kierunki badań i osiągnięcia naukowe po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałam tematykę badawczą związaną z wykorzystaniem gruntów antropogenicznych w budownictwie ziemnym. Poszerzyłam również swoją wiedzę teoretyczną i praktyczną w temacie geosyntetyków. Zajmowałam się następującymi problemami badawczymi:

- zagadnienia geotechniczne (w tym mrozoodporność) związane z wykorzystaniem gruntów mineralnych i antropogenicznych do celów budownictwa ziemnego i jako podłoże budowlane [zał. 4: B.2.2, B.2.3, B.2.13, B.2.25, B.2.27],
- wpływ obciążenia na zachowanie się popiołów elektrownianych w różnych warunkach nawodnienia [zał. 4: B.2.4, B.2.21]
- warunki filtracji wody przez korpusy nasypów hydrotechnicznych, wykonanych z gruntów naturalnych i antropogenicznych [zał. 4: B.2.8, B.2.11, B.2.23, B.2.24, B.2.28]
- geotechniczne aspekty budowy składowisk odpadów komunalnych [zał. 4: B.2.7, B.2.10, B.2.14, B.2.16, B.2.20, ]
- zastosowanie geotekstyliów (geowłóknin i geomembran) do budowy składowisk odpadów komunalnych [zał. 4: B.2.17]
- wpływ zjawisk atmosferycznych na zmiany strukturalne geosyntetyków [zał. 4: B.2.1, B.2.6]
- ocena parametrów wytrzymałościowych geosyntetyków [zał. 4: B.2.5]
- badania laboratoryjne różnego typu uszczelnień i drenaży [zał. 4: B.2.9, B.2.18, B.2.19, B.2.26]
- stateczności skarp budowli ziemnych oraz zboczy naturalnych, [zał. 4: B.2.12, B.2.15]
- analiza warunków hydrodynamicznych i geotechnicznych w rejonie przepustu drogowego. [zał. 4: B.2.22, B.2.29]

Pierwszym tematem badawczym, jakim się zajmowałam, były zagadnienia dotyczące **wplywu zjawisk atmosferycznych na zmiany strukturalne geosyntetyków** [zał. 4: B.2.1, B.2.6] Przeprowadzone doświadczenie miało przedstawić wpływ cyklicznego zamrażania i rozmrażania na wytrzymałość geosyntetyków na przebiecie. W badaniu wykorzystałam geosyntetyki przepuszczalne i nieprzepuszczalne. Pierwszą grupę wykorzystanych w badaniach materiałów geosyntetycznych stanowiły cztery geowłókniny. Różniły się grubością (od 0,5 do 4,0 mm), gramaturą (w przedziale od 300 do 500 g · m<sup>-2</sup>) i technologią wytwarzania. Drugą grupę stanowiły geomembrany kalandrowane o różnych grubościach: 1,0, 1,5 i 2,0 mm. Próbkę materiałów - zarówno w formie pojedynczych geosyntetyków, jak i po utworzeniu z nich geokompozytów - poddałam 28 cyklom zamrażania i rozmrażania.

Do badań wykorzystałem próbki geowłóknin o wymiarach 10 x 10 cm, oraz próbki geomembran o wymiarach 5 x 20 cm - zarówno pojedynczo, jak i w formie geokompozytów. Pomiar przeprowadziłem w czterech seriach (w zależności od układu geokompozytów) dla próbek wyjściowych oraz poddanych 28 cyklom zamrażania-rozmrażania. Przy użyciu aparatu Tritech 100, wyposażonego w zmodyfikowany zestaw służący do oznaczania kalifornijskiego wskaźnika nośności (CBR). Wielkości siły przebicia określiłem, stosując dynamometr pierścieniowy oraz czujnik zegarowy do pomiaru przemieszczeń trzpienia.

Stwierdziłem, że geosyntetyki są bardzo dobrym uzupełnieniem lub zamiennikiem gruntów mineralnych w budownictwie ziemnym. Znajdują one zastosowanie przy wzmacnianiu podłoża i konstrukcjach oporowych, uszczelnieniu składowisk odpadów, separacji gruntów o różnym uziarnieniu oraz stabilizacji antyerozyjnej skarp [35, 38, 47, 59, 62]. Wadą geosyntetyków jest ich podatność na przebicie. Przeprowadzone badania wykazały, że wytrzymałość poszczególnych geowłóknin i geomembran była zależna od ich grubości i metody wykonania. Natomiast najskuteczniejszym sposobem na zwiększenie odporności na przebicie okazało się połączenie geomembrany z warstwą ochronną z geowłókniny, dając wzrost wytrzymałości 2-6 razy w zależności od układu. Najlepsze wyniki uzyskano przy połączeniu geomembrany z geowłókniną igłowaną o większej grubości, lub o mniejszej grubości, ale wyższej gramaturze, a także z geowłókniną klejoną. Natomiast najmniejszą odporność na uszkodzenia mechaniczne wykazała geowłóknina igłowana o małej grubości i gramaturze. Dodatkowo geowłókniny, geomembrany oraz utworzone z nich geokompozyty wykazały dużą mrozoodporność. Otrzymane wyniki badań pozwoliły mi ocenić możliwości i efektywność stosowania geosyntetyków w konstrukcjach ziemnych.

Kolejnymi tematami badawczymi, w których wziąłem udział, były zagadnienia związane z **geotechnicznymi aspektami budowy składowisk odpadów komunalnych** [zał. 4: B.2.7, B.2.10, B.2.14, B.2.16, B.2.20]. Badania miały na celu przedstawienie wpływu zmiennych warunków geotechnicznych na uzyskane wyniki współczynnika bezpieczeństwa, a zatem określenie stateczności skarp, na przykładzie składowisk odpadów komunalnych w Chełmku i Brzozowie. Przeanalizowałem także obieg wody w kwaterze i podłożu, w celu określenia możliwości zanieczyszczenia środowiska przez szkodliwe substancje, wymywane ze składowiska [B.2.16].

Na przykładzie składowiska odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne w Chełmku, przeanalizowałem wartość kohezji odpadów komunalnych w odniesieniu do jej wpływu na otrzymane wyniki współczynnika bezpieczeństwa dla skarpy o nachyleniu 1:1, które otrzymałem metodą Felleniusa. W badaniu skupiłem się na kwaterze II (jednej z pięciu na tym obiekcie), z której pobrałem próbki gruntu warstwy rekultywacyjnej oraz podłoża. Określiłem podstawowe parametry geotechniczne, natomiast parametry odpadów przyjąłem w oparciu o dane z opracowań. Badania wykonałem dla dwóch wariantów: dla korzystnych warunków gruntowo-wodnych w podłożu



składowiska, oraz dla wysokiego poziomu zwierciadła wód gruntowych. Wskaźniki bezpieczeństwa obliczyłem w dwóch wariantach dla wartości kohezji równej 6,0 kPa i 12,5 kPa. W wariantcie I, obie powierzchnie poślizgu objęły groblę ograniczającą, ale nie weszły w podłoże, natomiast w wariantcie II krzywe poślizgu objęły fragment podłoża, sięgając 1,5 m w głąb. Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdziłem, że połączenie pewnych określonych wartości parametrów geotechnicznych oraz warunków gruntowo-wodnych ma wpływ na ryzyko utraty stateczności skarpy.

Na tej samej kwaterze przeprowadziłem badania nad wpływem zmian kąta tarcia wewnętrznego odpadów na wyniki współczynnika bezpieczeństwa, określonego metodą Bishopa. Tak jak w poprzednim badaniu, pobrałem w terenie próbki gruntów mineralnych podłoża oraz warstwy rekultywacyjnej do badań laboratoryjnych, i obliczyłem parametry geotechniczne. Założyłem trzy warianty: I dla podstawowych warunków gruntowo-wodnych w podłożu składowiska, II dla wysokiego zwierciadła wód gruntowych w podłożu oraz III, w którym na wysoko uwodnione podłoże nałożyliśmy dodatkowe obciążenie powierzchniowe o wartości  $200 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Dla wszystkich wariantów obliczyłem współczynniki bezpieczeństwa, przy założeniu wartości kąta tarcia wewnętrznego równej  $12,5^\circ$  oraz  $25^\circ$ . Dla pełnego obrazu zachowania się skarpy wykonałem obliczenia zależności współczynnika bezpieczeństwa od wartości kąta tarcia wewnętrznego odpadów [B.2.10], przy założeniu jego wartości w przedziale  $0 - 30^\circ$ . Zachowując stałe wartości pozostałych parametrów geotechnicznych, zmiany wartości  $\phi$  wpływały liniowo na zmianę wartości współczynnika bezpieczeństwa. W przypadku wariantu I ustaliłem, że ryzyko utraty stateczności jest niewielkie, nawet przy minimalnej wartości kąta tarcia wewnętrznego. Przy podwyższonym poziomie wód gruntowych, ryzyko utraty stateczności pojawiło się przy założonej wartości  $\phi$  równej  $12,5^\circ$ . Natomiast dodatkowe obciążenie nawodnionego podłoża spowodowało, że skarpa okazała się niestabilna, bez względu na założone parametry  $\phi$  i  $c$ .

Wpływ wartości spójności na obliczone metodą Felleniusa wartości współczynnika bezpieczeństwa badałem na przykładzie składowiska odpadów komunalnych w Brzozowie [B.2.14]. Pobrałem próbki gruntu podłoża do obliczeń parametrów geotechnicznych i dokonałem pomiarów geodezyjnych. Wyzaczyłem przekrój najmniej korzystny (o większym nachyleniu) oraz taki, w którym nachylenie jest charakterystyczne dla większości skarp. Obliczyłem stateczność sprawdzając, jak zmiany wartości spójności w zakresie  $0 - 30 \text{ kPa}$  wpłyną na wartość współczynnika bezpieczeństwa. Dla każdego przekroju założyłem dwa warianty: bez występowania obciążenia i dodatkowych sił, oraz przy zadaniu obciążenia o wartości  $200 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ . W wyniku doświadczenia stwierdziłem, że dla przekroju o większym nachyleniu może dojść do utraty stateczności przy wartości spójności dla odpadów poniżej 5 kPa lub 22,5 kPa przy dodatkowym obciążeniu. Natomiast dla typowego nachylenia skarp jak w drugim przekroju, uzyskane wyniki współczynnika bezpieczeństwa wskazały znikome ryzyko utraty stateczności.



Na przykładzie składowiska w Chetmku przeprowadziłem również analizę obiegu wody w kwaterze i podłożu, w celu określenia ryzyka skażenia środowiska przez wymywane szkodliwe substancje [B.2.16]. Aby określić maksymalny zasięg rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w gruncie podłoża składowiska, wykonałem badania pozwalające oznaczyć współczynnik filtracji, skład granulometryczny, stopień zagęszczenia, gęstość objętościową, wskaźnik porowatości oraz wilgotność naturalną. Współczynnik filtracji dla odpadów i gruntu w podłożu wyznaczyłem metodą Giryńskiego, a dla piasków w podłożu zastosowałem wzór empiryczny Hazena. Obliczyłem czas, w którym woda przefiltrowała pionowo przez wnętrze kwatery i piaszczyste podłoże, docierając do zwierciadła wody gruntowej, a także oszacowałem na jaką maksymalną odległość mogą rozprzestrzenić się zanieczyszczenia wymywane z kwatery. Analizując otrzymane wyniki stwierdziłem, że wody gruntowe są silnie narażone na zanieczyszczenia, a ich zasięg rozprzestrzeniania się jest znacznie większy niż odległość dzieląca składowisko od pobliskiej rzeki Przemszy, realnie zagrażając środowisku.

Kolejnym zagadnieniem badawczym, nad którym pracowałem, była analiza wpływu zjawisk atmosferycznych na zmiany strukturalne geosyntetyków [zał. 4: B.2.1, B.2.6]. W pracy [B.2.6] przedstawiłem wpływ cyklicznego nasłonecznienia na wytrzymałość wybranych geosyntetyków na przebicie. Do analizy wykorzystałem trzy grupy geosyntetyków, wśród których znalazły się trzy rodzaje geowłóknin, trzy rodzaje geosiatek różniących się technologią wykonania oraz trzy rodzaje geomembran o różnych grubościach. Na potrzeby badania określiłem masę powierzchniową dla wszystkich próbek, zgodnie z normą PN-EN ISO 9864. Materiały poddałem cyklicznemu nasłonecznieniu, wystawiając je łącznie na sto godzin nasłonecznienia w bezchmurne dni w czerwcu i lipcu. Próbkę były odwracane, aby każda strona była wyeksponowana na słońce przez 50 godzin.

Próbki materiałów „świeżych” i wystawionych na cykliczne nasłonecznianie, poddałem w kolejnym kroku próbie wytrzymałościowej z użyciem prasy hydraulicznej typu Tritech Digital 50 kN oraz pierścienia dynamometrycznego, badając z jaką siłą trzpień przebije materiał. Na koniec badania porównałem otrzymane wyniki dla próbek świeżych i poddanych ekspozycji z danego rodzaju geosyntetyku. Stwierdziłem, że w przypadku geowłóknin ekspozycja na słońce miała niekorzystny wpływ na próbkę z włókien ciągłych zgrzewanych termicznie oraz igłowanych, zmniejszając ich odporność na przebicie kolejno o 19,9 i 21,5%. Odnotowałem natomiast 63,8% wzrostu wytrzymałości geowłókniny z włókien ciągłych dzianych, w stosunku do próbki świeżej. Dla próbek geosiatek zgrzewanych termicznie, proces nasłonecznienia miał nieznaczny negatywny wpływ, a dla próbki wzbogaconej pakietem dodatków użytych podczas produkcji zaobserwowałem znikome zmiany. Nieznaczne zmiany wytrzymałości uzyskałem również dla geomembran.

Wyniki, które otrzymałem po przeprowadzeniu doświadczenia pozwalają ocenić, w jakim stopniu promieniowanie słoneczne działa destrukcyjnie na geosyntetyki. Okazało się, że 100-godzinne nasłonecznienie nie spowodowało istotnego osłabienia geosiatek i geomembran.

Kolejnym tematem, którym zajmowałem się w swojej pracy naukowo-badawczej, była **ocena parametrów wytrzymałościowych w geosyntetykach [zał. 4: B.2.5]**. Badanie miało na celu ustalenie, w jakim układzie zastosowane geosyntetyki będą stanowiły geokompozyt o największej wytrzymałości na przebicie przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa eksploatacji oraz opłacalności inwestycji [B.2.5].

Do badania wykorzystałem sześć rodzajów geowłóknin polipropylenowych ciągłych o różnych grubościach: włókna najcieńszej klejone były chemicznie, a grubsze igłowane; dwie geomembrany obustronnie gładkie i kalandrowane o grubości 1 i 2 mm oraz matę bentonitową 3-warstwową. Doświadczenie wykonałem przy pomocy prasy pionowej z zamontowanym zestawem do badania siły przebicia materiałów tekstylnych. Przygotowałem próbki materiałów o wymiarach 30 x 30 mm dla geomembran i geowłóknin oraz 100 x 100 mm dla bentomaty. Część próbek do badań na mokro poddałem hydratacji. Badania przeprowadziłem w czterech seriach uzyskując w sumie 42 próbki i kombinacje geosyntetyków. W pierwszej serii sprawdziłem siłę przebicia na sucho i na mokro, najpierw dla cieńszej geomembrany bez osłony, a następnie w osłonie z kolejnymi sześcioma geowłókninami. Drugą serię wykonałem analogicznie z zastosowaniem grubszej geomembrany. W trzeciej serii testowałem geokompozyt, utworzony z hydratyzowanej bentomaty i cieńszej geomembrany oraz ten sam układ z zastosowaniem osłony z kolejnych geowłóknin. Podobnie w czwartej serii, lecz do kompozytu użyłem grubszej geomembrany.

Analizując uzyskane wyniki stwierdziłem, że wartości sił przebicia dla wszystkich czterech serii rosły proporcjonalnie do grubości geowłóknin, zastosowanych w układzie. W większości przypadków dla próbek hydratyzowanych wartości te były większe w porównaniu z próbkami suchymi. Dla próbek z zastosowaniem geokompozytu uzyskałem wartości sił przebicia większe średnio o 0,73 kN w porównaniu z próbkami dwuwarstwowymi.

W celach porównawczych obliczyłem także wartości przecieku przez ekran z gruntu mineralnego, matę bentonitową oraz geomembranę, zakładając wysokość słupa wody  $h_w = 0,2$  m oraz jednakową powierzchnię uszczelnienia  $A = 11000$  m<sup>2</sup>. Uzyskałem ok. 4-krotnie mniejsze wartości przecieków dla bentomaty i geomembrany niż dla gruntu mineralnego.

Biorąc pod uwagę największą odporność na przebicie, samouszczelniające właściwości maty bentonitowej oraz mniejsze nakłady na kontrolę i likwidację ewentualnych odcieków uznałem, że zastosowanie geokompozytu w osłonie z geowłókniny jest najbardziej korzystnym rozwiązaniem dla zapewnienia bezpiecznej eksploatacji składowiska.

Kontynuując tematykę badawczą, związaną z geosyntetykami, przeprowadziłem pomiary mające na celu określenie **podatności na przebicie syntetyków, układanych w różnych konfiguracjach** [B.2.18]. Aby określić, jaki układ będzie najbardziej odporny na uszkodzenia, poddałem analizie średnice przebić poszczególnych kompozytów.

Do badań wykorzystałem dwa typy geomembran obustronnie gładkich o grubości 1,0 i 2,0 mm, wykonanych technologią kalandrowania, oraz sześć geowłóknin z włókien polipropylenowych o grubościach w przedziale od 0,7 mm do 5,9 mm, wśród których najcieńsza powstała w wyniku łączenia chemicznego, a pozostałe w wyniku procesu igłowania. Z powyższych materiałów przygotowane próbki poddałem przebiciu. Doświadczenie przeprowadziłem w dwóch seriach, oddzielnie dla każdej geomembrany, badając je samodzielnie i w układzie z poszczególnymi geowłókninami, wykorzystując próbki suche i poddane wcześniejszej hydratacji.

Analizując wyniki dla cieńszej geomembrany stwierdziłem, że średnice przebicia jej dolnej strony były niewielkie i zbliżone do siebie, większe dla próbek „mokrych”, natomiast średnice przebicia od strony górnej zmniejszyły się około 3-krotnie przy zastosowaniu osłony z geowłókniny. Różnice między średnicami po stronie górnej w próbkach suchych i hydratyzowanych zmniejszyły się ze wzrostem grubości geowłókniny. Dla grubszej geomembrany średnice przebicia na dolnej stronie okazały się być 2-krotnie mniejsze niż w górnej, i większe dla próbek hydratyzowanych. Średnice na górnej stronie były 2-krotnie mniejsze przy zastosowaniu osłony i zbliżone do siebie dla grubszych geowłóknin. Wielkość uszkodzeń geomembrany na skutek przebicia jest zależna od stosowanej osłony z geowłókniny, dlatego przy budowie dna składowiska na warstwie uszczelnienia mineralnego należy układać geomembranę w osłonie, przy zachowaniu wszystkich zasad jej montażu i łączenia, co skutecznie zmniejsza objętość przesączających się odcieków.

W zakresie mojego obszaru badawczego znajduje się również temat **kolmatacji geowłóknin wywoływanej zawiesiną wodno-gruntową** [B.2.17]. Do badań zastosowałem polipropylenową geowłókninę separacyjną Secutex GRK 151-GRK 3C o gramaturze  $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , umożliwiającą filtrację oraz matę bentonitową Bentofix®NSP 4300 o grubości 6,0 mm, będącą geosyntetyczną barierą uszczelniającą. Grunt mineralny służący do kolmatacji pod względem geotechnicznym odpowiadał ilom piaszczysto-pyłastym, natomiast wartości parametrów zagęszczalności były charakterystyczne dla gruntów mineralnych.

Badania podzieliłem na trzy etapy, w których kolejno przeprowadziłem analizę ścisłości nawodnionych próbek geowłókniny i bentomaty, ich współczynnika wodoprzepuszczalności dla czystej wody oraz dla zawiesiny wodno-gruntowej, posiadającej właściwości kolmatujące.

Badanie ścisłości nawodnionych próbek geosyntetyków przeprowadziłem w edometrach. W przedziale obciążeń 0 - 12,5 kPa otrzymałem moduły ścisłości wynoszące 0,078 MPa dla geowłókniny i 0,336 MPa dla bentomaty, natomiast przy maksymalnym obciążeniu w przedziale 200 -

400 kPa wartości wynosiły odpowiednio 0,463 i 2,688 MPa. Wyższe wartości modułów dla bentomaty w porównaniu z geowłókniną świadczą o jej mniejszej ściśliwości. Rosnące obciążenia spowodowały większe osiadania, z tendencją do stabilizacji w miarę trwania nacisku.

W kolejnym etapie określiłem współczynnik filtracji geosyntetyków poddanych obciążeniom: 12,5; 25; 50; 100; 200 i 400 kPa. Doświadczenie wykonałem przy zmiennym spadku hydraulicznym, przyjmując różne zakresy czasu pomiaru ze względu na wyraźny spadek wodoprzepuszczalności w trakcie badania. Po przeanalizowaniu wyników stwierdziłem, że wodoprzepuszczalność geowłókniny maleje wraz ze wzrostem obciążenia. Przy obciążeniu powyżej 12,5 kPa geowłóknina nie może pełnić funkcji drenażowej dla rurociągów drenażowych z powodu zbyt małego współczynnika wodoprzepuszczalności. Podobnie dla bentomaty, która spełnia funkcję bariery nieprzepuszczalnej w warunkach obciążenia oraz aktywacji bentonitu, ale w jej przypadku jest to cecha porządana.

W ostatnim etapie badałem, w jakim stopniu zmieni się współczynnik filtracji geowłókniny i bentomaty w warunkach kolmatacji. Badanie kolmatacji geomembrany wykonałem przy obciążeniu: 12,5; 25; 50; 100; 200 i 400 kPa, a bentomaty przy obciążeniu; 12,5; 50 i 100 kPa. Filtrację zakolmatowanej geowłókniny badałem przy stałym i zmiennym spadku hydraulicznym, natomiast bentomatę tylko przy stałym spadku. Na podstawie otrzymanych wyników dla obu materiałów, zauważyłem wyraźny spadek współczynnika  $k_{10}$  nawet o 100%, świadczący o zatykaniu porów geowłókniny i potwierdzenie właściwości uszczelniających maty bentonitowej.

Zakres badań **przecieków przez uszkodzone geosyntetyki poszerzyłem o geosyntetyczne bariery ilowe (GBR-C)**. Przedstawione w publikacji [B.2.19] badania miały na celu określenie wpływu spadku hydraulicznego oraz ilości i średnicy przebić na wielkość filtracji przez bentomatę. Wykorzystałem matę bentonitową o grubości 7,4 mm, składającą się z warstwy geotkaniny, warstwy bentonitu sodowego oraz geowłókniny igłowanej. Warstwy zostały ze sobą połączone za pomocą igłowania, co pozwoliło na ściśle osadzenie bentonitu pomiędzy geosyntetykami. Badanie przeprowadziłem w aparacie o przekroju kołowym o średnicy 18,5 cm, posiadającym zawory przelewowe, które stabilizowały poziom wody na wysokości 5, 10 i 15 cm. Doświadczenie prowadziłem dla kolejnych próbek z przebiciami o średnicy 1 mm: najpierw z jednym otworem, następnie z dwoma i z trzema otworami. Każdą z nich zalewałem wodą, zaczynając od napełnienia do poziomu 5 cm, a następnie do 10 i 15 cm. Po każdym napełnieniu - po upływie 24 i 48 godzin - za pomocą naczynia pomiarowego odczytywałem objętościowe natężenie przepływu. Procedurę badania powtórzyłem dla próbek z przebiciami o średnicy 3 i 9 mm, przy czym dla otworu o średnicy 9 mm dokonywałem pomiaru co godzinę, ze względu na dużą objętość przesiąkającej wody.

Analizując otrzymane wyniki pomiarów stwierdziłem brak wyraźnej zależności pomiędzy średnicą i ilością otworów oraz wysokością słupa wody, a otrzymanymi wartościami natężenia przepływu. Niejednoznaczne wyniki wskazywały na częściowe zasklepienie się wykonanych otworów



w wyniku pęcznienia bentonitu i samouszczelniania. Było to szczególnie widoczne przy przebiciu o średnicy 1 mm, kiedy po wykonaniu kolejnych otworów dochodziło do zmniejszania się wydatku. Pomimo, iż nie udało się określić ścisłych zależności pomiędzy badanymi parametrami, określiłem ogólną tendencję. Wraz ze zwiększeniem liczby i średnic wykonanych otworów w macie bentonitowej, a także wzrostem wysokości słupa wody, następowało zwiększenie objętościowego natężenia przepływu. Pomimo dużej odporności mechanicznej bentomaty i jej zdolności do samouszczelniania niewielkich uszkodzeń, trzeba zwrócić uwagę na ewentualne rozdzarcia geosyntetyku, które należy naprawiać przy pomocy właściwie dopasowanej łaty, osadzonej na granulacie bentonitowym.

Kolejną tematyką, poruszaną przeze mnie w badaniach po uzyskaniu stopnia doktora, była **analiza warunków hydrodynamicznych i geotechnicznych w rejonie przepustu drogowego i zniszczonego umocnienia brzegowego**, w której wykonałem badania na pograniczu inżynierii rzecznej i geotechniki [zał. 4: B.2.22, B.2.29]. Badania zmierzały do określenia charakteru i zakresu zmian warunków przepływu na odcinku rzeki Wilgi, i wynikały z przebudowy przepustu drogowego, zlokalizowanego w ciągu drogi powiatowej. Miejsce prowadzenia obserwacji i pomiarów obejmowało koryto rzeki powyżej i poniżej remontowanej budowli. Zmiana konstrukcji przepustu, wielkości i kształtu światła, oraz skośne usytuowanie w stosunku do nurtu rzeki, spowodowały zwiększenie prędkości przepływu rzeki na odcinku koryta powyżej przepustu. Zakres badań obejmował prace terenowe geotechniczne, obmiar geodezyjny i pomiary hydrodynamiczne koryta rzeki. W pracy przeanalizowałem przyczyny destabilizacji brzegów koryta rzeki, przylegającego do przepustu. Sformułowane wnioski oparłem na wynikach badań parametrów hydrodynamicznych i geotechnicznych. Na odcinku od 27,83 do 44,33 m występowało umocnienie podstawy skarpy głazami. Odcinek ten znajdował się na tej samej elewacji co odcinek zagrożony osunięciem się narzutu kamiennego, umacniającego lewy brzeg. Jednakże nie tylko zawężony przekrój poprzeczny powodował obniżanie się dna koryta. Również duży spadek dna koryta wynoszący  $I = 3,02\%$  powodował, że podczas wezbrań można było zaobserwować wysokie wartości przepływu wody. Początkowo, gdy dwa najniższe zlokalizowane przekroje tego odcinka były jeszcze niewyerdowane, spadek ten był mniejszy. Jednakże niesprzyjające zdarzenia, do jakich doszło w odcinku poniżej (takie jak: zawężenie koryta poprzez osunięcie umocnienia, zwiększenie prędkości wody oraz erozja koryta), spowodowały wzrost prędkości i erozję wsteczną koryta.

Na odcinku od 44,33 do 54,38 m stwierdziłem znaczne obniżenie się dna koryta rzeczno. Było to związane z osunięciem się umocnienia brzegowego, co spowodowało zawężenie przekroju o około 1 m. W konsekwencji, podczas wezbrań prędkość wody w tym miejscu była dużo wyższa, niż w odcinkach niezawężonych. Powodowało to wymywanie i uruchamianie zdeponowanego materiału dennego oraz jego transport w dół rzeki, czego konsekwencją była erozja i pogłębienie dna. Po

obniżeniu się dna, w przekrojach zlokalizowanych poniżej odcinka wyerodowanego dna było na wyższej elewacji, a narzut kamienny, umacniający brzeg rzeki, nie uległ w tym miejscu osunięciu. W związku z tym ich wyższe usytuowanie w profilu podłużnym stanowiło częściową barierę dla płynącej powyżej wody powodując, że w odcinku wyerodowanym woda stagnowała lub płynęła z bardzo niską prędkością. Wszystkie te zjawiska świadczyły o negatywnym oddziaływaniu uszkodzonego umocnienia na koryto rzeczne, którego osunięcie spowodowało degradację koryta, jego obniżenie i erozję.

Odcinek od 59,14 do 70,26 m był umocniony: brzeg lewy gabionami, dno kamieniem łamanym, a brzeg prawy narzutem kamiennym. W związku z tym, poprzez przekształcenie tego odcinka - polegające na zmniejszeniu jego szorstkości - oraz zaprojektowaniu i zbudowaniu go z uwzględnieniem dużego spadku wynoszącego  $I = 3,42\%$ , wartości prędkości, a także pozostałych parametrów hydrodynamicznych były najwyższe w całym analizowanym korycie. Badania te miały praktyczny aspekt, a wyniki i wnioski wyciągnięte z badań mogą w przyszłości posłużyć projektantom i wykonawcom z branży drogowej, mostowej i hydrotechnicznej.

Prowadziłem badania laboratoryjne różnego typu uszczelnień i drenaży [zał. 4: B.2.9, B.2.18, B.2.19, B.2.26]. W badaniach z pozycji [B.2.26] wykorzystałem geokompozyt drenażowy Pozidrain 7S250D/NW8, wbudowany w model nasypu hydrotechnicznego. Badanie wielkości objętościowego natężenia przepływu wykonałem na specjalnym stanowisku badawczym, o wymiarach wewnętrznych (dł. x szer. x wys.):  $600 \times 100 \times 120$  cm. Regulację dopływającej wody i pomiar wydatku filtracyjnego umożliwiał odpowiedni system przewodów i przelewów. Przygotowany geodren o wymiarach  $100 \times 110$  cm zabudowałem w gruncie mineralnym o znanych parametrach geotechnicznych. W badaniach założyłem, że współczynnik filtracji gruntu nasypu jest mały i nie ma wpływu na uzyskiwane wartości wydatku filtracyjnego geodrenu.

Pomiary wielkości przepływu przez geodren wykonywano specjalistycznym młynkiem hydrometrycznym Valeport Model 801 Flat EM Flow Meter, umożliwiającym uzyskanie dokładnych odczytów. Przy wysokości napełnienia 0,11 m ponad płaszczyznę geodrenu kilkakrotnie wykonywano pomiary w trzech różnych miejscach. Wartość średnia prędkości przepływu wody przez geodren wyniosła  $0,032 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Elementy drenażowe pełnią w konstrukcjach budowlanych ważną funkcję. Są odpowiedzialne za skuteczne i szybkie odprowadzenie wód opadowych, infiltrujących i napływowych. Potwierdzenie poprawnego funkcjonowania powinno być poparte właściwymi doświadczeniami laboratoryjnymi. Nadmiar wody i jej długotrwałe oddziaływanie prowadzą często do niekorzystnych zjawisk. Należy zwrócić szczególną uwagę na metodykę badań przepływu cieczy w płaszczyźnie geokompozytu. Nie wszystkie metody testowe odzwierciedlają rzeczywiste warunki pracy materiału w gruncie. Często grunt posiada konsystencję twaroplastyczną lub wręcz plastyczną. Produkcyjne doświadczenia



testowe, mają pokazywały rzeczywistą wartość przepływu cieczy w geokompozycie pod naciskiem gruntu. Badania modelowe w skali półtechnicznej mogą stanowić poparcie właściwych koncepcji badawczych. Eksperymenty, w których geosyntetyk jest w bezpośrednim kontakcie z konkretnym gruntem, mogą dać wyniki bliskie warunkom rzeczywistym [zał. 4: B.2.26].

## 7. Wykazanie osiągnięcia naukowego 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. nr 65, poz. 595 ze zm.)

### 7.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Za moje najważniejsze osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę do złożenia wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego, uważam jednotematyczny cykl ośmiu publikacji z lat 2008 - 2015 przedstawiony pod wspólnym tytułem:

#### „Interakcja mieszanek popiołowo-żuźlowych z geosyntetykami w modelach konstrukcji ziemnych”

### 7.2 Wykaz prac dokumentujących osiągnięcia naukowe

- B.1.1 **Cholewa M.** 2008: Modelowe badania filtracji przez nasypy hydrotechniczne wykonane z gruntów antropogenicznych. *Przegląd Górniczy*. 11-12, 49-55. [udział własny 100%] [IF - 0; MNiSW - 6 pkt.].
- B.1.2 **Cholewa M.** 2012: Analysis of the stability of the slope of the hydraulic embankment made of the ash-slag mixture, *AGH Journal of Mining and Geoengineering*, Wyd. AGH, Kraków. z. 1, s. 81-87. [udział własny 100%] [IF - 0; MNiSW - 5 pkt.].
- B.1.3 **Cholewa M.** 2012: Oddziaływanie chemiczne mieszanki popiołowo-żuźlowej na wytrzymałość geowłóknin igłowanych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. 3/IV, s. 167-177. [udział własny 100%] [IF - 0; MNiSW - 5 pkt.].
- B.1.4 **Cholewa M.**, Baran P. 2013: Modeling of permeability flow in embankments formed from ash-slag mixture. *Annual Set The Environment Protection. Rocznik Ochrona Środowiska*. 15/1, s. 479 - 491. [udział własny 60%] [IF - 0,808; MNiSW - 15 pkt.].
- B.1.5 **Cholewa M.**, Zydroń T., Pelc Ł. 2013: Badania wybranych parametrów wytrzymałości geowłóknin ułożonych na podłożu odkształcalnym i nieodkształcalnym. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. 1/IV, s. 129-141. [udział własny 60%] [IF - 0; MNiSW - 10 pkt.].
- B.1.6 **Cholewa M.**, Zydroń T. 2013: Badania współczynnika tarcia na kontakcie mieszaniny popiołowo-żuźlowej z geowłókninami. *Acta Scientiarum Polonorum seria Formatio Circumiectus*. 12 (2), s. 33 - 42. [udział własny 50%] [IF - 0; MNiSW - 10 pkt.].
- B.1.7 **Cholewa M.**, Szwałec A., Mundała P. 2014: Ocena właściwości chemicznych i geotechnicznych mieszaniny popiołowo-żuźlowej z Elektrowni Skawina S.A. w modelowym badaniu zapory ziemnej. *Acta Scientiarum Polonorum seria Formatio Circumiectus*. 13 (4), s. 45 - 54. [udział własny 60%] [IF - 0; MNiSW - 10 pkt.].
- B.1.8 Baran P., **Cholewa M.** 2015: Ustalenie parametrów wytrzymałościowych popioło-żuźła i piasku pylastego z wykorzystaniem niszczących badań modelowych. *Annual Set The Environment Protection. Rocznik Ochrona Środowiska*. 17, s. 1463 - 1483. [udział własny 40%] [IF - 0,806; MNiSW - 15 pkt.].

Sumaryczny Impact Factor (zgodny z rokiem opublikowania) tych prac wynosi 1,614, sumaryczna liczba punktów wg MNISW to 76, a mój udział własny stanowi 71%. W siedmiu publikacjach jestem pierwszym autorem. Oświadczenia współautorów zamieszczono w załączniku nr 7.

### **7.3. Cel badań:**

Celem badań przeprowadzonych w cyklu prac B.1.1 - B.1.8 była ocena współpracy gruntu antropogenicznego jakim jest mieszanka popiołowo-żuźłowa z geosyntetykami. Szczególnie skupiłem się na geowłókninach, które są często stosowane w budownictwie. Zmierzałem w swojej pracy do opracowania nowych metod badawczych dostosowanych do szczegółowej kontroli powyższych materiałów.

#### **Wydzieliłem następujące cele szczegółowe:**

1. Ocena mieszanki popiołowo-żuźłowej w aspekcie jej przydatności do budownictwa ziemnego.
  - określenie parametrów geotechnicznych,
  - ocena funkcjonowania nasypu modelowego po wbudowaniu elementów geosyntetycznych w postaci geowłókniny, geomembrany, geodrenu i geokompozytu drenażowego,
  - określenie czy zastosowany rodzaj geosyntetycznych materiałów uszczelniających i drenujących oraz sposób ich zabudowania zapewnią bezpieczne warunki pracy budowli,
  - opracowanie niestandardowych metod badawczych wynikających z potrzeb firm wykonawczych i projektowych.
2. Określenie współczynnika stateczności dla skarpy z mieszanki popiołowo-żuźłowej w różnych przypadkach eksploatacyjnych.
3. Zbadanie właściwości chemicznych mieszaniny popiołowo-żuźłowej, zmienności w czasie oraz oddziaływania na geosyntetyki.
  - ustalenie wpływu pH popioło-żuźli na zmianę wybranych parametrów wytrzymałościowych geowłóknin.
4. Ustalenie wartości siły przebicia geowłókniny rozłożonej na zagęszczonym podłożu z mieszanki popiołowo-żuźłowej. Wpływu zagęszczenia podłoża na proces przebicia geowłóknin.
5. Określenie charakterystyki tarcia pomiędzy mieszaniną popiołowo-żuźłową a geowłókniną.

Celem praktycznym badań było przedstawienie możliwości współdziałania w konstrukcji ziemnej dwóch materiałów antropogenicznych; geosyntetyków i popioło-żużli. Dostarczenie informacji przydatnych do wykorzystania w konkretnych warunkach wykonawczych i projektowych. Zalecenia technologiczne oparte na przedstawionych badaniach uzupełniają dotychczasową wiedzę dotyczącą mieszanek popiołowo-żużlowych, ich oddziaływania w różnych aspektach na zabudowane geosyntetyki. Opracowanie i rozwinięcie metod badawczych dostosowanych do określonych przypadków stosowania materiałów antropogenicznych (geosyntetyków, popioło-żużli)

Badania zmierzające do realizacji postawionych celów obejmowały okres 2008 – 2015. Zrealizowane zostały na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych w Laboratorium Geotechnicznym Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki oraz pomiarów na stanowiskach terenowych. Prace obejmowały badania modelowe wykonane w skali półtechnicznej na prototypowych aparatach średniowymiarowych.

## **7.4 Opis uzyskanych wyników**

### **7.4.1 Wstęp**

Na rynek światowy geosyntetyki zostały wprowadzone po II wojnie światowej. Od tej pory następuje ich rozwój, polepszanie właściwości fizycznych i mechanicznych. Zostają one coraz szerzej wprowadzane w konstrukcje inżynierskie i zastępują do tej pory używane materiały nieodnawialne, takie jak piasek czy żwir [2, 4, 6, 21, 22]. Rozkwit przemysłu tworzyw sztucznych i poszukiwanie nowych rynków rozpoczął się w latach sześćdziesiątych, a w międzyczasie rozpoczęto budowę autostrad, które wiązały się z ogromnymi budowlami ziemnymi, prowadzonymi często w trudnych warunkach gruntowych i klimatycznych. W związku z tym rozpoczęto poszukiwania nowych sposobów usprawniających rozwiązania techniczne, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów robót. Sposobem tym okazało się zastosowanie geotekstyliów. Pierwsze próby i doświadczenia związane z zastosowaniem geotekstyliów w budownictwie ziemnym były bardzo obiecujące, okazało się, że można je stosować jako:

- warstwy odcinające, chroniące przed zanieczyszczeniem kruszywa na gruntach gliniastych, pylastych, filtry chroniące materiał przepuszczalny przed zanieczyszczeniem [31],
- dreny odprowadzające wodę z gruntu [34, 45, 58],
- wzmocnienia gruntu, poprawiające jego nośność, wzmocnienie nawierzchni, polepszające jej wytrzymałość na rozciąganie [35, 36, 56, 57, 60].

Często geotekstylia jednocześnie spełniają wszystkie wymienione zadania [38]. Szerokie zastosowanie geotekstyliów jest możliwe również dzięki takim zaletom jak:

- wysoka jakość, wytrzymałość, trwałość, odporność na czynniki chemiczne [73, 77, 78, 85];
- dobra współpraca z gruntem: moduły sprężystości geotekstyliów można dopasować do modułów sprężystości gruntów, podobnie z modułami deformacji, można dopasować również przepuszczalność tych dwóch materiałów;
- duża odkształcalność geotekstyliów pozwala je stosować na gruntach bardzo podatnych (np. torfach) i ściśliwych (np. mułach);
- ekonomia transportu: geotekstylia o gęstości  $250 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  mogą zastąpić warstwę kruszywa 15 cm grubości o gęstości  $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; prostota i niezawodność metod wbudowywania geotekstyliów.

Geotekstylia są produkowane i stosowane przez firmy budowlane wszystkich krajów. Stosunkowo najbardziej zaawansowane w dziedzinie aplikowania geotekstyliów są Stany Zjednoczone Ameryki Północnej, wykorzystujące rocznie ok. 70 mln  $\text{m}^2$  tych wyrobów. Produkcja światowa włókien chemicznych [30] w roku 1984 wyniosła 15,3 mln ton, w tym: włókien syntetycznych 12 mln ton, włókien celulozowych 3,3 mln ton. W tym samym roku w Polsce produkcja włókien syntetycznych wyniosła 230 tys. ton, czyli 1,5% produkcji światowej. W roku 2014 sumaryczne zużycie geosyntetyków w samej tylko Europie przekroczyło 370 mln  $\text{m}^3$ . Dla wybranych grup było odpowiednio: geotkaniny 180 mln  $\text{m}^3$ , geowłókniny 75 mln  $\text{m}^3$ , geosiatki 35 mln  $\text{m}^3$ , geomembrany 45 mln  $\text{m}^3$ .

Próby zastosowania geotekstyliów w Polsce w budownictwie ziemnym przypadają na początek lat siedemdziesiątych. Początkowo stosowano geotekstylia sprowadzane z zagranicy. Instytut Badawczy Dróg i Mostów był w tym czasie jednostką wiodącą w dziedzinie budownictwa drogowego, który już w latach sześćdziesiątych podjął prace badawcze nad zastosowaniem włókien przy budowie dróg. Instytut Budownictwa Melioracyjnego SGGW-AR w Warszawie pracował nad zastosowaniem geotekstyliów w budownictwie rolniczym (melioracje, drogi rolnicze i leśne).

Przeglądając bazy wniosków patentowych i publikacje, napotykamy na coraz nowsze i nawet wręcz nieoczekiwane zastosowania geosyntetyków, zarówno w branży budowlanej, jak też w przemyśle spożywczym, odzieżowym, samochodowym, stoczniowym, medycznym [50, 51, 54, 59, 69, 70, 44]. Polski Komitet Normalizacyjny zgodnie z Międzynarodową Klasyfikacją Norm wprowadził grupę ICS: 59.080.70 - Geotekstylia, w której zawarto ok. 70 norm publikowanych zarówno w języku polskim jak i angielskim.

Geotekstylia, w celu zwiększenia ich nieprzepuszczalności lub odporności na niszczące działanie środowiska (agresywne odcieki, promienie UV) [13, 14, 32, 73], muszą zostać

uszlachetnione. W tym celu do produkcji większości wyrobów stosuje się różne dodatki, wypełniacze i zmiękczacze. Komponenty te powodują wzrost odporności na promieniowanie ultrafioletowe, odporności biologicznej, opóźniają zapalność materiału, powiększają antystatyczność i uplastyczniają tworzywa [33]. Stosuje się także natrysk warstwą asfaltu lub żywicami (poliuretanem, żywicą akrylową).

Właściwości geotekstyliów uzależnione są głównie od właściwości włókien, które je tworzą oraz od technologii połączenia. Właściwe projektowanie geotekstyliów jest możliwe tylko przez dobre rozpoznanie właściwości materiałów, z których są wykonane [61], a także technologii łączenia włókien w procesie produkcji. Materiały stosowane obecnie w produkcji geosyntetyków to przede wszystkim surowce pochodzące z procesów przetwarzania ropy naftowej oraz surowce pochodzące z recyklingu.

Tworzywa polimeryczne są to materiały składające się z polimerów syntetycznych, wytworzonych sztucznie przez człowieka i niewystępujących w naturze lub zmodyfikowanych polimerów naturalnych. Modyfikacja następuje poprzez dodatek innych składników: napelnaczy (włókna mineralne, węglowe i grafitowe, proszki metaliczne, sproszkowane tlenki i sole, grafit, sadza krzemionka, mika itp.), fotostabilizatorów, stabilizatorów termicznych, antyutleniaczy i antyozonantów, antystatyków, środków uniepalniających, plastyfikatorów, środków barwiących, dodatków innych polimerów tworzących mieszanki lub roztwory i stopy.

Najczęściej używane w produkcji surowce to:

- polipropylen (PP) jest tworzywem termoplastycznym otrzymywanym w wyniku niskociśnieniowej polimeryzacji propenu. Ma lepsze właściwości mechaniczne niż PE, jednak, nie modyfikowany, już w temperaturze 0°C staje się kruchy. Dlatego wzmacnia się go włóknem szklanym lub azbestowym, przez co uzyskuje się materiał znoszący największe obciążenie termiczne spośród wszystkich tworzyw sztucznych.
- polietylen (PE) otrzymywany jest przez polimeryzację etylenu. Ma właściwości pośrednie między elastomerami i plastomerami. Rozróżnia się: HDPE- niskociśnieniowy PE o dużej gęstości: 0,94-0,97 g · cm<sup>-3</sup>, MDPE- polietylen o średniej gęstości: 0,926-0,940 g · cm<sup>-3</sup>, LDPE - wysokociśnieniowy PE o niskiej gęstości: 0,915-0,935 g · cm<sup>-3</sup>, LLDPE - wysokociśnieniowy liniowy PE o niskiej gęstości.

Są to materiały zarówno nieprzepuszczalne dla wody – geomembrany, bentomaty oraz przepuszczalne, do których należą geowłókniny, geotkaniny, geosiatki, georuszty i materiały złożone jak geokompozyty.

Geosyntetyki spełniają szereg funkcji, które możemy podzielić na dwa rodzaje: hydrauliczne i mechaniczne. W zależności od rodzaju zastosowanego materiału oraz przykładu użycia w danej



konstrukcji, mogą spełniać kilka funkcji równocześnie. Do funkcji hydraulicznych geosyntetyków należy:

- filtracja, polega na kontrolowanym przepływie cząsteczek cieczy i gazów, przy jednoczesnym zatrzymywaniu cząsteczek gruntu rodzimego,
- drenaż, zbieranie i transportowanie cieczy w płaszczyźnie wyrobu [93].

Prawidłowo zaprojektowany drenaż musi posiadać zabezpieczenia w postaci filtrów odwrotnych (filtr żwirowo-piaskowy wokół rury drenarskiej). Wymaga to zastosowania w mieszance 2-3 typów obsypki o różnej granulacji [96]. Dlatego wskazane jest zastosowanie geowłóknin jako warstw filtracyjnych, eliminujących potrzebę kosztownego doboru mieszanek. Zastosowanie geosyntetyków w zabiegach odwadniających za pomocą drenażu w znacznym stopniu ułatwia wbudowywanie przewodów w gruncie, jednocześnie upraszczając i skracając czas realizacji inwestycji.

Geotekstylia tkane i nietkane posiadają dużą wodoprzepuszczalność [95], zapewniają swobodny przepływ wody, a jednocześnie zatrzymują cząsteczki gruntu, zapobiegając zamuleniu drenu [86, 88, 90]. Dzięki tym właściwościom geotekstylia znajdują zastosowanie w drenażach: rolniczych, boisk sportowych i terenów rekreacyjnych, zapór ziemnych i betonowych, wałów przeciwpowodziowych, przyczółków mostowych, dróg i poboczy, fundamentów i piwnic, nasypów oraz ścian oporowych, warstwy powierzchniowej i dennej składowisk odpadów komunalnych. Zastosowane geowłókniny w warstwie dennej składowiska powinny charakteryzować się wysoką wytrzymałością na rozciąganie, przebicie, dobrymi właściwościami hydraulicznymi oraz długoterminową odpornością na rozciąganie [1, 7, 100].

Geotekstylia coraz częściej stosuje się w drogowych urządzeniach odwadniających, np. jako sączki w poboczach. Przepuszczający materiał (tłuczeń, żwir, gruby piasek) otacza się geotekstyliami, które działają jak filtr, chroniąc kruszywo przed zamuleniem, zabrudzeniem lub wymieszaniami z otaczającym gruntem.

Dren otoczony geowłókniną usuwa potrzebę sprowadzania dużych ilości materiałów filtracyjnych, zmniejsza koszty wykopów pod rurociągi drenarskie przez zmniejszenie szerokości, pozwala na wykorzystanie wykopanego gruntu do zasypania drenu, zmniejszając przy tym koszty wywozu.

Geotekstylia często stosuje się jako warstwy odcinające (izolacyjne, separacyjne), które chronią wyżej leżące warstwy przed zabrudzeniem oraz przenikaniem do nich drobnych cząstek gruntu. Najczęściej stosuje się takie materiały przy budowie nawierzchni drogowych, na podbudowie z kruszywa, na podłożu gliniastym i ilastym oraz na placach składowych, gdzie pełnią funkcję ochronną składowanych materiałów przed zanieczyszczeniem. Geosyntetyki znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie składowisk komunalnych i przemysłowych [18, 20, 24, 27, 48, 66, 75, 100].

Do funkcji mechanicznych, jakie spełniają geosyntetyki, należy zaliczyć: wzmocnienie konstrukcji ziemnych, umocnienie przeciwerozyjne, uszczelnienie, separacja, ochrona [8, 9, 62, 71, 76].

Geosyntetyki posiadają wysoką wytrzymałość mechaniczną oraz dobrą odporność biologiczną i chemiczną. Wadą włókien jest mała odporność na działanie promieniowania UV. Dlatego też należy chronić geowłókniny przed kontaktem ze światłem słonecznym w przypadku wykonywania robót ziemnych na otwartych przestrzeniach. Włókna poliestrowe są również mało odporne na działanie alkaliów np. cementu, przez co ich wytrzymałość jest ograniczona przy kontakcie z betonem.

Odpowiedni dobór geotekstyliów jest dość skomplikowany ze względu na ich różnorodne funkcje oraz liczne kryteria (gramatura, wytrzymałość, przepuszczalność). Nieprawidłowe zastosowanie geotekstyliów niesie ze sobą ryzyko uszkodzenia konstrukcji, którą miały chronić, straty finansowe inwestora, wykonawcy [52, 54, 82, 89].

Aby określić przydatność geotekstyliów do projektowanych konstrukcji, należy przeanalizować ich właściwości. Również właściwości gruntów i innych materiałów, w otoczeniu których mają pracować materiały geosyntetyczne, warunki gruntowo-wodne konstrukcji ziemnej, naprężenia, jakim mogą być poddane geotekstyli wbudowane w konstrukcję [17, 25, 64, 98].

W zależności od tego jak będą użyte geotekstyli, przy ich wyborze można kierować się poniższymi wskazówkami:

- zbrojenie gruntu wymaga, aby geotekstyli wykazywały przede wszystkim dużą wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużalność przy budowach o przewidywanych dużych odkształceniach (np. nasypy na torfach) [26, 37, 41, 43, 46],
- odwodnienie, geotekstyli stosowane na dreny oraz warstwy odsączające powinny wykazywać przepuszczalność podłużną i poprzeczną materiału. Z tego względu na dreny nie nadają się materiały obrabiane termicznie lub chemicznie,
- filtry, geotekstyli powinny spełniać dwa warunki: mieć dostatecznie małe pory, aby mogły zatrzymywać drobne cząstki gruntu, być dostatecznie przepuszczalne, aby przepuszczały wodę i nie zamulały się [42, 49, 67]. O przydatności decydują w takim wypadku badania laboratoryjne geotekstyliów i gruntów,
- warstwy odcinające (separacyjne) - materiały stosowane na warstwy separacyjne powinny mieć właściwości filtracyjne takie jak geotekstyli używane na filtry. Jednak zazwyczaj pracują one w takim wypadku na granicy gruntu słabego (drobnoziarnistego) oraz gruntu gruboziarnistego, istotna jest również w tym przypadku dobra odporność na przebicie [39, 40],

- wzmocnienia skarp, w celu wzmocnienia skarp i ochrony przed erozją, stosuje się geotekstylię o odpowiedniej wytrzymałości na rozciąganie i zerwanie. Muszą także być odporne na działanie mikroorganizmów i światła słonecznego [10, 12, 81, 94, 97].

Stosowanie mieszanek popiołowo-żuźlowych w budownictwie wynika z konieczności zagospodarowania dużych zasobów tego materiału i odpowiedniego zapotrzebowania na rynku. Powstający w piecach elektrowniowych odpad paleniskowy z węgla przyjmuje postać mieszanki popiołów i żużli. Ze względu na dużą produkcję tego materiału jest on obecnie stosowany w różnych dziedzinach budownictwa ziemnego jako wartościowy grunt antropogeniczny. Dobre właściwości zagęszczające sprawiają, że często używa się go przy budowaniu nasypów. Warunkiem wykorzystania mieszanki popiołowo-żuźlowej do tego typu konstrukcji jest jej staranne zabezpieczenie przed wpływem wody. Nieodpowiednio dobrane parametry projektowe mogą doprowadzić do utraty stateczności skarp wykonanej budowli [23,29]. Odpady nazywane „Ubocznymi Produktami Spalania” UPS posiadają również bardzo dobre cechy doziarniające. Popioły często zostają wykorzystywane do poprawy i stabilizacji gruntów spoistych, które charakteryzują się dużym stopniem plastyczności oraz gruntów organicznych. Możliwe jest również mieszanie popiołów z grubookruchowymi odpadami powęglowymi, dzięki czemu uzyskuje się materiał o bardzo dobrych parametrach fizycznych i mechanicznych [3, 29]. Struktura gruntu naturalnego poprzez dodatek, np. popiołu lotnego ulega zmianie, czego efektem jest wzrost wytrzymałości na ścinanie i zmniejszenie odkształcalności. Znajomość właściwości geotechnicznych gruntów naturalnych i antropogenicznych jest niezbędna do ekonomicznego i bezpiecznego projektowania budowli ziemnych. Należy podkreślić, iż obliczenia stateczności podłoża, skarp, a także parcia gruntu na konstrukcje oporowe, nie byłoby możliwe bez znajomości parametrów określających tę wytrzymałość [63].

Warunkiem koniecznym do użycia odpadów paleniskowych jako materiału budowlanego jest sprawdzenie, czy materiał nadaje się do konkretnego celu. Przed wykorzystaniem odpadów należy przeprowadzić szereg badań – najpierw laboratoryjnych, a potem modelowych. Ważna jest powtarzalność przeprowadzanych testów, a także porównanie badań modeli fizycznych z modelami numerycznymi.

## 7.4.2 Wyniki

W ramach realizacji pierwszego celu, jaki założyłem w punkcie 7.3, podjąłem próbę odpowiedzi na pytanie: W jakim zakresie mieszanki popiołowo-żużlowe nadają się do stosowania w budownictwie ziemnym. Jako pierwszy materiał badawczy wykorzystano odpady pochodzące z osadników popiołów i żużli spółki Mittal Steel Poland S.A., Oddział w Krakowie, zlokalizowanych w miejscowości Pleszów. Oznaczenie geotechnicznych parametrów fizycznych i mechanicznych wykorzystanej mieszanki przeprowadziłem w laboratorium Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie [B.1.1, B.1.3, B.1.4].

Określiłem parametry uziarnienia. Zawartość frakcji żwirowej wynosiła 0,60%, piaskowej 87,35%, pyłowej 9,10%, ilowej 2,95%. Według obowiązującej w tym okresie normy, grunt został sklasyfikowany jako piasek gliniasty. Gęstość właściwa badanego materiału  $2,36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , wilgotność optymalna 32,5 %, maksymalna gęstość objętościowa szkieletu  $1,285 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , parametry mechaniczne jak kąt tarcia wewnętrznego, kohezja, oznaczono przy wskaźniku zagęszczenia  $I_s=0,95$ , uzyskując odpowiednio  $\phi = 37,90^\circ$ ,  $c = 36,10 \text{ kPa}$ .

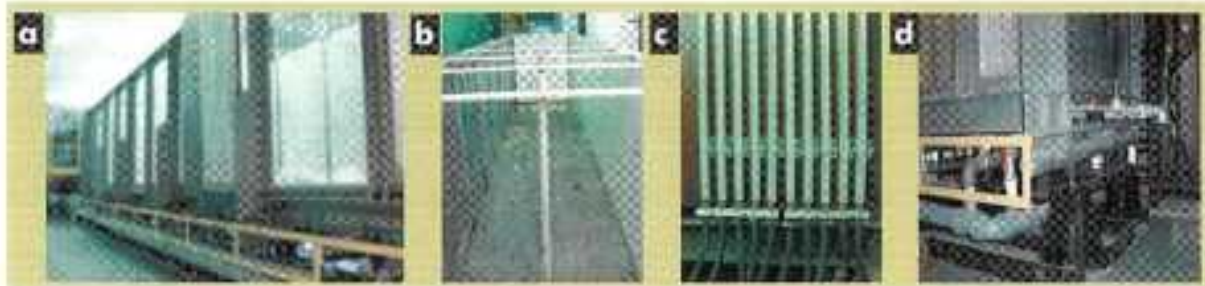
Drugi materiał który wykorzystałem do badań pochodził z Elektrowni Skawina. Był to odpad paleniskowy z procesu spalania węgla kamiennego, który jest głównym paliwem elektrowni. Z uwagi na wymagania prawne podczas spalania stosowało się w tym okresie dziesięcioprocentowy dodatek biomasy w postaci trocin, peletu słonecznikowego oraz ziaren zbóż, które wpływają na właściwości fizyczne i chemiczne odpadów paleniskowych. Materiały są zróżnicowane – różnice zależą od właściwości wykorzystanego surowca energetycznego, technologii spalania, rodzaju transportu i składowania. Oznaczenie parametrów fizycznych i mechanicznych wykorzystanej mieszanki – przeprowadziłem również w laboratorium Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

Określiłem parametry uziarnienia [B.1.2, B.1.4]. Zawartość frakcji żwirowej wynosiła 19,36%, piaskowej 55,77%, pyłowej 22,38%, ilowej 2,49%. Według obowiązującej w tym okresie normy [PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009] popioło-żużel został sklasyfikowany jako piasek pylasty (slSa), natomiast wg poprzednich wytycznych [PN-B-02481:1998] jako pospółka (Po). Gęstość objętościowa szkieletu badanego materiału  $1,078 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , wilgotność optymalna 35 %, maksymalna gęstość objętościowa szkieletu  $1,135 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , parametry mechaniczne jak kąt tarcia wewnętrznego, kohezja, oznaczono przy wskaźniku zagęszczenia  $I_s=0,95$ . Wyniosły odpowiednio  $\phi = 36,0^\circ$ ,  $c = 47,0 \text{ kPa}$ .

Wykorzystując pierwszy materiał pochodzący z Mittal Steel Poland S.A. przeprowadziłem badania modelowe w prototypowym średniowymiarowym aparacie do badania filtracji przez modele nasypów który dla uproszczenia nazywam w dalszej części tekstu korytem hydraulicznym [B.1.1].



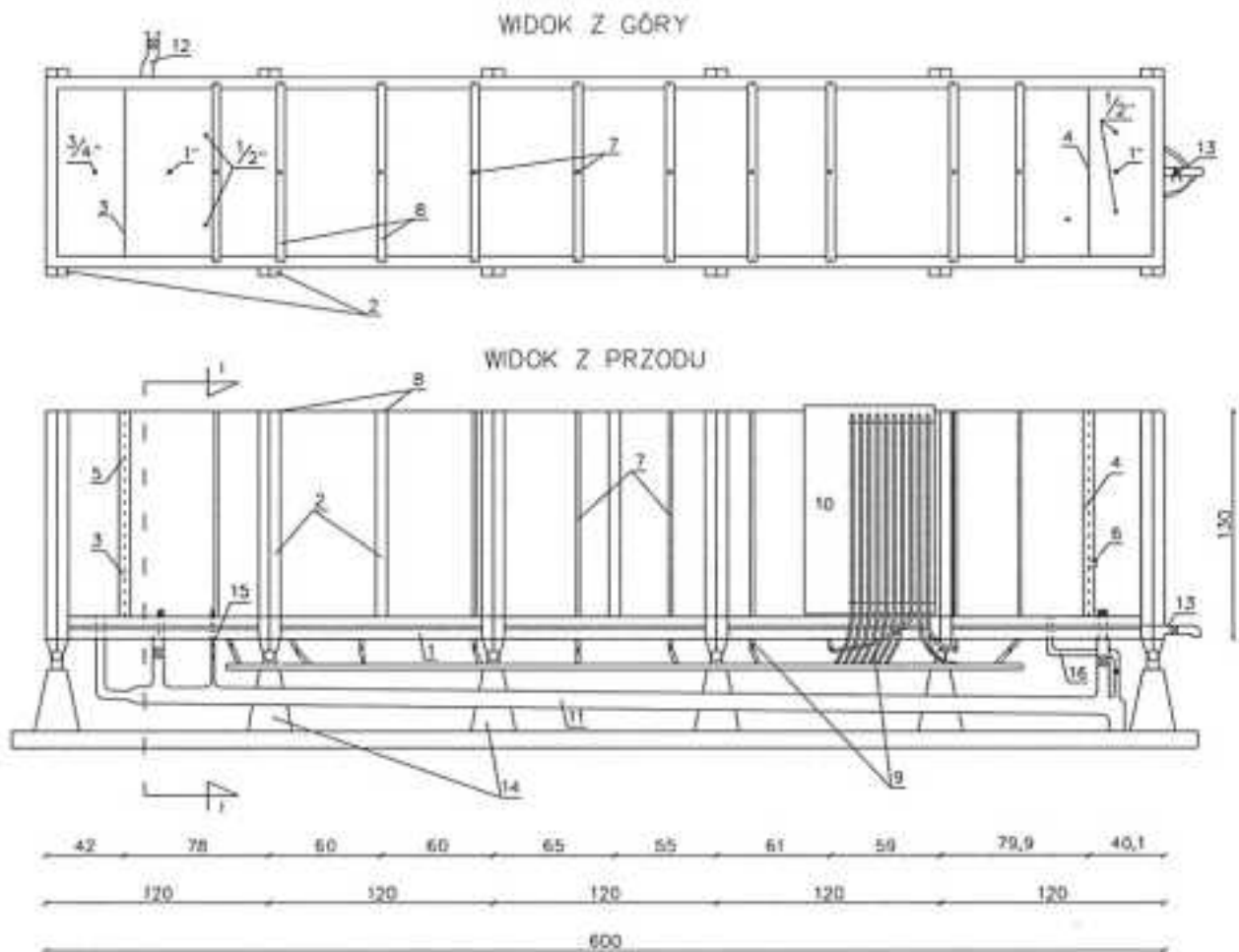
Wymiary wewnętrzne aparatu wynoszą odpowiednio: długość 6,0 m, szerokość 1,0 m, wysokość 1,2 m. Widok ogólny koryta i jego elementy konstrukcyjne przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Średniowymiarowy aparat do badania filtracji przez modele nasypów; a) widok ściany czołowej, b) wnętrze aparatu z widocznym łożowym uszczelnieniem przydennym, c) tablica pomiarowa, d) zawory pomiarowo-upustowe

Wewnątrz koryta umieszczono przegrody przelewowe, umożliwiające dowolną regulację poziomu wody górnej i dolnej, oraz rurki piezometryczne do pomiaru poziomu wody wewnątrz obwałowania (rys. 2). Odpowiedni system przewodów i przelewów umożliwiał ręczną regulację dopływającej wody i pomiar wydatku filtracyjnego przez nasyp.

Zanim rozpocząłem badanie mieszanek popiołowo-żużlowych w aparacie średniowymiarowym zmodernizowałem dotychczasowy system pomiarowy wymagający stałej obecności osoby dokonującej odczytów. Odczyty wykonywano wykorzystując tablicę zbiorczą z rurkami piezometrycznymi i przewody pomiarowe wydatku filtracji, gdzie objętość mierzono cylindrem pomiarowym. Pomiary wymagały stałej obecności osoby notującej wyniki, co ograniczało zakres zbieranych danych.



Rys.2. Schemat konstrukcyjny koryta hydraulicznego:

1 – podstawa z metalowych kształtowników, 2 – konstrukcja oporowa ścian bocznych, 3 – ścianka działowa wody górnej, 4 – ścianka działowa wody dolnej, 5 – przelew wody górnej, 6 – przelew wody dolnej, 7 – piezometry, 8 – płaskowniki stabilizujące rozstaw ścian bocznych, 9 – przewody piezometryczne z zaworami, 10 – tablica zbiorcza z rurkami piezometrycznymi, 11 – odpływ, 12 – przewód doprowadzający wodę, 13 – przewody pomiarowe wydatku filtracji, 14 – nogi ze śrubowymi sworzniami regulującymi spadek dna koryta, 15 – przewód spustowy wody górnej, 16 – przewód spustowy wody dolnej; wymiary w cm.

Analizując zaistniałe potrzeby badań ciągłych w systemie 24-ro godzinnym przez 365 dni w roku opracowałem i zrealizowałem innowacyjny system oprzyrządowania pomiarowego. Według własnej koncepcji wyposażylem stanowisko w prototypowy system pomiarowy oparty o zaawansowane systemy rejestrujące :





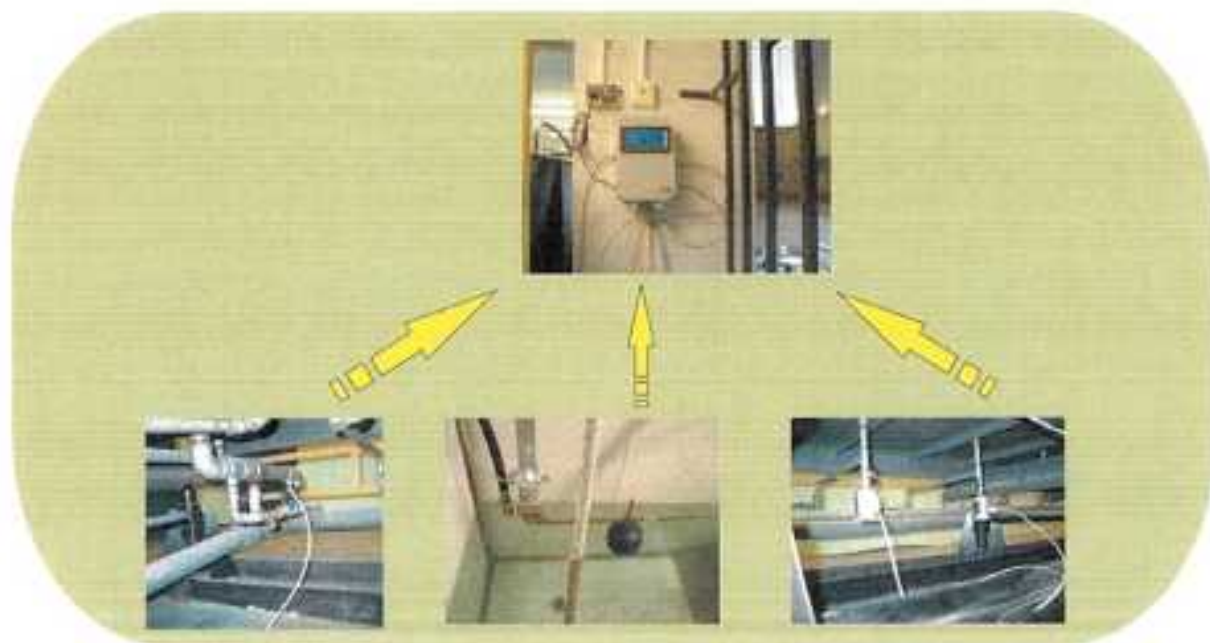
Rys.3. Czujnik temperatury - TRP-Pt100-NA-Y30-A/3p

- czujnik temperatury TRP-Pt100-NA-Y30-A/3p (rys. 3) o zakresie pomiarowym  $-50 \div +50$  °C,
- czujnik temperatury wody dolnej o charakterystyce j.w.,
- miernik poziomu ciągłego, zamontowałem w dolnej części piezometrów (rys. 4). Doprowadzenie wody wykonane z perforowanych rurek stalowych owiniętych z zewnątrz siatką z tworzywa sztucznego pełniącą funkcję filtracyjną. Rozmieszczenie piezometrów w osi podłużnej koryta oraz ich położenie w modelu nasypu przedstawia ryc. 1b i 2. Dla prowadzenia odczytów zmian poziomów zwierciadła wody w korpusie nasypu dolne końce piezometrów połączyłem z przetwornikami poziomu. Czujniki po odpowiedniej kalibracji rejestrowały poziom wody wewnątrz nasypów. Poziom monitorowany był w sposób ciągły i przekazywany do rejestratora. Zainstalowałem cztery mierniki poziomu dla pomiaru położenia zwierciadła wody w piezometrach: P1, P3, P4, P5 (ryc. 4),



Rys.4. Miernik poziomu ciągłego (przetwornik) - NPS133H/G2DFXXG

- przepływomierz turbinowy LWGY-6-A-05-E-5, o zakresie pomiarowym 0...10 l/min, zamontowałem na przewodzie spustowym komory przelewowej,
- rejestrator elektroniczny - MPI-8-P-1-0/SD2GB/DR15-24/RAPORT

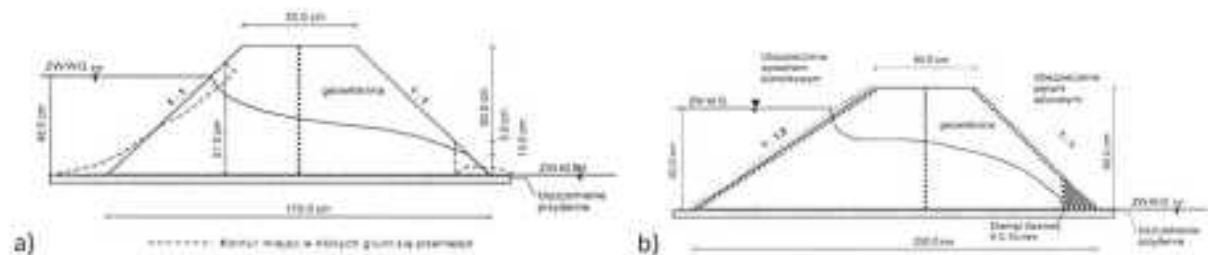


Rys.5. Czujniki pomiarowe przekazujące dane do rejestratora MPI-8-P-1-0/SD2GB/DR15-24/RAPORT

Wszystkie urządzenia zestawu pomiarowego połączyłem z rejestratorem elektronicznym MPI-8-P-1-0/SD2GB/DR15-24/RAPORT (rys. 5). Rejestrator zapisywał przesyłane dane umożliwiając jednocześnie ich bieżące przeglądanie i archiwizację. W zależności od potrzeb metrologicznych zapis danych można ustawić w przedziale od 3 s do 24 h.

Pragnę podkreślić, że cały system opracowałem samodzielnie, szczegółowo analizując zaistniałe potrzeby pomiarowe. Konsultowałem swoje koncepcje z dostawcami aparatury, aby uzyskać odpowiedni sposób montażu, wielkość, wagę, zakres pomiarowy, warunki eksploatacji i możliwość modernizacji. Moim zdaniem wkładem praktycznym jest również to, że zrealizowałem własnoręcznie montaż urządzeń pomiarowych i połączeń elektrycznych. Zaprojektowałem konieczne przyłącza technologiczne i wsporniki wspomagające zakres pomiarowy. Prace były okresowo kontrolowane przez dostawcę aparatury pod względem spełnienia wymogów bezpieczeństwa.

Korzystając z tak przygotowanego stanowiska badawczego wykonałem nasypy modelowe z mieszanki popiołowo-żużlowej o wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,95$  [B.1.1]. Na rysunku 6 przedstawiłem ogólny przekrój poprzeczny nasypów z podaniem ich poszczególnych wymiarów. Szerokość budowli wynosiła 1 m, masa 800 - 900 kg. Modele wykonałem w celu symulacji pracy nasypu z mieszanki popiołowo-żużlowej z wbudowanymi geosyntetykami w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Pomiary prowadziłem przy piętrzeniu wody do uzyskania stabilizacji przepływu filtracyjnego bądź wystąpienia oznak przebiccia hydraulicznego.



Rys. 6. Przekroje poprzeczne modeli nasypów z mieszanki popiołowo-żużlowej; a) model 1, b) model 2

W modelach z popioło-żużli wbudowałem dwa rodzaje geowłókniny [B.1.1]. W osi modelu 1 w założeniu prostopadle do kierunku przepływu filtrującej wody wbudowałem geowłókninę o gramaturze  $814 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  (rys. 6a). Produkowana jako wyrób dwuwarstwowy, pierwsza warstwa z włókien PE, druga warstwa z włókien PP, łączna grubość 6,6 mm. Starłem się ustalić wpływ zabudowanej geowłókniny na przebieg krzywej filtracji i stateczność konstrukcji. Natomiast w modelu 2 dodatkowo jeszcze na skarpie odwodnej i odpowietrznej, ułożyłem geowłókninę z włókien polipropylenowych. Wyrób został wyprodukowany w procesie igłowania uzyskując gramaturę  $400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  i grubość 3,3 mm.

Model 1 wykonany z popioło-żużla z zabudowaną w osi geowłókniną ulegał w trakcie badania szybkim deformacjom. Już w trakcie piętrzenia wody górnej wystąpiło nasilające się w miarę upływu czasu obsuwanie materiału skarpy odwodnej (rys. 6a). Maksymalna wysokość do jakiej sięgało obsunięcie popioło-żużla wyniosła 51,0 cm. Po trzech godzinach piętrzenia woda przefiltrowała przez całą długość nasypu i pojawiła się u podstawy skarpy odpowietrznej. Od tego momentu rozpoczął się proces upłynnienia popioło-żużla w dolnej części skarpy. Upłynniony materiał wypływał z podstawy skarpy, a powstałe ubytki początkowały kolejne obrywy i wymywania. Po 2 godzinach trwania takiego procesu powstał obryw o wysokości 15 cm (rys. 6a). Dla bezpieczeństwa badania i uniknięcia całkowitego rozmycia modelu, piętrzenie wody górnej przerwałem, rozpoczynając obniżanie poziomu wody. Nie odnotowałem wyraźnego wpływu zabudowanej w osi geowłókniny na krzywą filtracji, która wytworzyła się podczas piętrzenia wody. Wykreślona na podstawie pomiarów piezometrycznych krzywa filtracji przecinała linię skarpy odpowietrznej na wysokości 10 cm (rys. 6a). Wbudowana w osi geowłóknina nie wywołała zauważalnych efektów.



Model 2 powstał na bazie modelu 1 [B.1.1]. Z powierzchni skarpy odwodnej usunąłem z naddatkiem rozluźniony materiał i wykonałem jej rekonstrukcję przy wskaźniku zagęszczenia jak dla całości, jednocześnie zmieniając pochylenie z 1:1 na 1:1,5 (rys. 6b), co sugerowała geometria skarpy po uszkodzeniu (rys. 6a). Dla zabezpieczenia powierzchni skarpy przed falowaniem ułożyłem na niej geowłókninę, którą następnie przykryłem systemem komórkowym. Na skarpie odpowietrznej wykonałem prace polegające na usunięciu materiału, który został wymyty i rozluźniony (rys. 6a). W miejsce usuniętego popioło-żuźla wbudowałem drenaż żwirowy, podścielony geowłókniną sięgającą do korony modelu (rys. 6b). Cała powierzchnia skarpy została dociążona ażurowymi płytami betonowymi dającymi nacisk normalny 2,3 kPa. Tak przebudowany model spiętrzył wodę na stanowisku górnym do wysokości 50,0 cm i utrzymywał ten poziom przez 30 dni [B.1.1]. Zastosowane pochylenie i ubezpieczenie skarpy odwodnej zabezpieczyło ją przed uszkodzeniami, skarpa była stateczna przez cały czas badania jak również podczas szybkiego obniżania zwierciadła wody górnej po zakończeniu pomiarów. Również sposób modernizacji skarpy odpowietrznej był na tyle skuteczny, że pomimo spadku hydraulicznego nawet nieznacznie większego niż w modelu 1, skarpa była stateczna, a wykreślona na podstawie pomiarów piezometrycznych krzywa filtracji wchodziła w drenaż. Zabudowana w osi geowłóknia nie wpłynęła na zmiany kształtu krzywej filtracji, które notowano w dodatkowych piezometrach zainstalowanych w odległości 10 cm przed i za płaszczyzną geowłókniny.

Dla modelu 1 nie uzyskałem wyniku wydatku filtracyjnego, który by pozwolił na obliczenie współczynnika filtracji. Postępujący szybko proces rozmywania podstawy skarpy odpowietrznej powodował niszczenie modelu, co zmusiło do przerwania piętżenia. Analogiczne zjawisko opisują doświadczenia prowadzone przez innych autorów [5, 23, 29]. Dla modelu 2 współczynnik filtracji ustabilizował się szybko i utrzymywał prawie stałą wartość przez cały okres badania. Jako wartość charakterystyczną przyjęto wynik uzyskany pomiędzy 20 a 30 dobą badania  $k_{10} = 1,70 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Badania modelowe filtracji przez nasypy dają możliwość określenia przebiegu krzywych filtracji w korpusie modelu a pośrednio przez pomiar wydatku filtracyjnego i parametrów geometrycznych obliczenie współczynnika filtracji. W przypadku nasypów z materiału jednorodnego określenie przebiegu filtracji jest znacznie prostsze w porównaniu do nasypów, w których zabudowano geosyntetyki [15, 16, 28, 74]. Dodatkowe wkładki anizotropują ośrodek przez który filtruje woda, co może zmieniać warunki pracy całego nasypu [84]. Również filtracja w gruntach antropogenicznych jest stosunkowo nowym zagadnieniem [53].

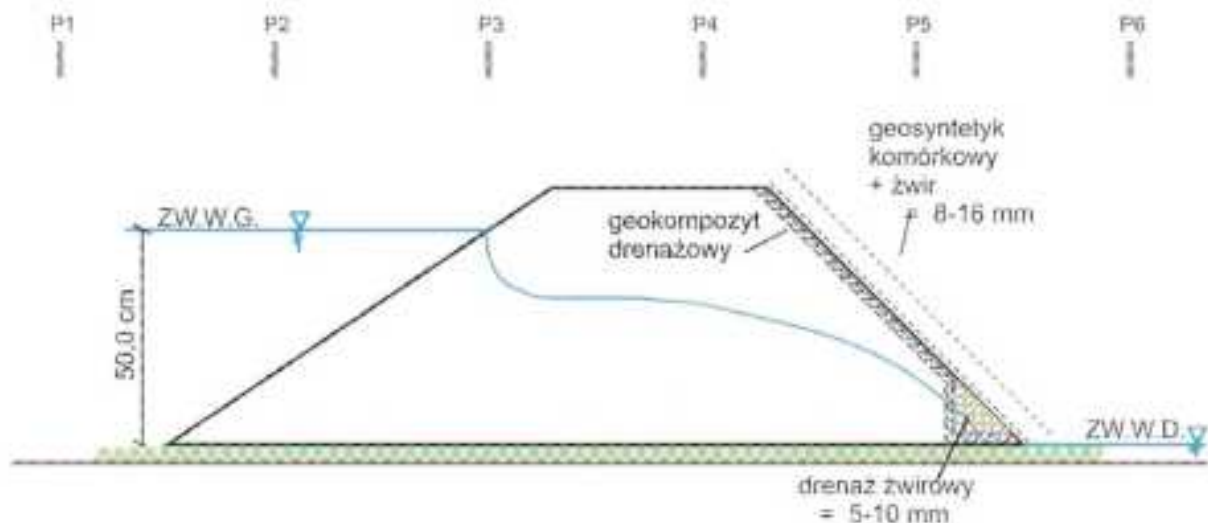
Model 1 wykonany z popioło-żuźła okazał się bardzo wrażliwy na przepływ filtracyjny i procesy sufozyjne. Już po kilku godzinach przepływu wody, przy niewielkim spadku hydraulicznym pojawiły się zniszczenia zagrażające stateczności zarówno skarpy odwodnej jak i odpowietrznej. Popioło-żuźel charakteryzując się małą gęstością, szybko ulegał upłynnieniu, a co za tym idzie wymywaniu z obrysu

modelu. Geowłóknina wbudowana w osi ulegała powolnej kolmatacji, jednak nie miało to istotnego wpływu dla całej konstrukcji.

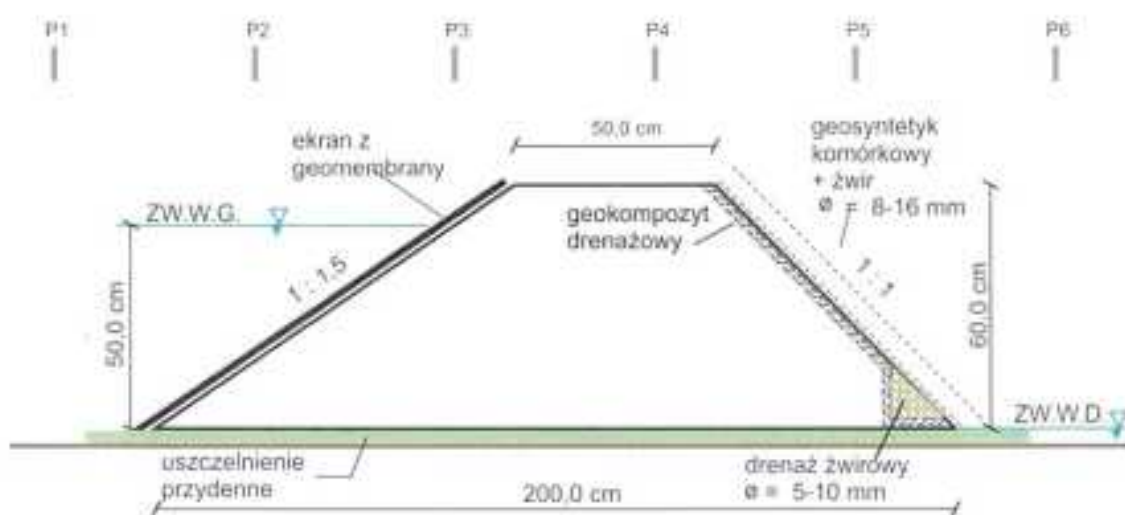
Zmiana pochylenia skarpy odwodnej w modelu 2 nie wpłynęła na zmniejszenie spadku hydraulicznego, ponieważ utrzymywałem piętrzenie na wyższym poziomie. Spadek hydrauliczny był nawet nieznacznie większy niż w modelu 1. Dlatego stateczność i brak niekorzystnych zjawisk filtracyjnych przypisuję zastosowanym geosyntetycznym materiałom drenującym i stabilizującym. Płyty ażurowe ułożone na skarpie odpowietrznej powodowały stosunkowo niewielkie obciążenie normalne na powierzchnię skarpy, elementem znacznie ważniejszym był zastosowany drenaż geosyntetyczny i żwirowy.

Obliczony współczynnik filtracji dla konstrukcji z mieszanki popiołowo-żużlowej wynosił  $k_{10} = 1,70 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Zabudowanie geowłókniny w osi modeli z popiołożużla nie wpłynęło na zmianę położenia krzywej depresji. Natomiast zabudowanie geowłóknin, pełniących funkcje drenujące i separujące na skarpach modelu 2 dało oczekiwane pozytywne rezultaty.

Badania kontynuowałem wykorzystując drugi materiał antropogeniczny. Z przebadanej mieszanki popiołowo-żużlowej z elektrowni Skawina S.A. wykonałem kolejny nasyp modelowy w średniowymiarowym aparacie do badania filtracji. Model uformowałem w tej samej technologii i wymiarach [B.1.1] uwzględniając zmianę parametrów geotechnicznych [B.1.2, B.1.3]. Dla odniesienia zrealizowany model nie posiadał żadnych elementów geosyntetycznych. Utrzymując piętrzenie rejestrowałem położenie poziomu wody na stanowisku górnym oraz poziom krzywej filtracji wewnątrz nasypu. Pomiary prowadziłem do wystąpienia widocznych oznak przebicia hydraulicznego. Po zakończeniu badania obniżyłem zwierciadło wody górnej i obserwowałem zachowanie się skarpy odwodnej. Odnotowałem takie same uszkodzenia filtracyjne [B.1.2, B.1.4] jak w przypadku wcześniejszej mieszanki popiołowo-żużlowej (rys.6a) [B.1.1] pochodzącej z Mittal Steel Poland S.A.



Rys. 7. Przekrój poprzeczny przez model nasypu 4 (P1–P6 — piezometry)



Rys. 8. Przekrój poprzeczny przez model nasypu 5 (P1–P6 — piezometry)

Model 4 zmodernizowałem w oparciu o analizę uszkodzeń filtracyjnych i obliczeń stateczności modelu 3. Na powierzchni skarpy odpowietrznej położyłem geokompozyt drenażowy (rys. 7) uzupełniony w podstawie drenażem żwirowym o przekroju trójkątnym 15 × 15 cm. Całą powierzchnię skarpy przykryłem geosyntetykiem komórkowym (rys. 7) i zasypałem żwirem o granulacji 8–16 mm [B.1.4]. Pełny poziom piętzenia dla modelu został osiągnięty po 5 godzinach. Czas przejścia wody przez nasyp wyniósł 8 godzin 5 minut. Wypływająca w podstawie drenażu woda nie wymywała cząstek popiołu-żużla. Ustabilizowana krzywa filtracji przecinała wykonany w podstawie drenaż żwirowy. Wydatek filtracyjny zawierał się w przedziale 1700–1900 cm<sup>3</sup>/godz.

Korzystając z programu „GeoStudio 2007” wykonałem analizę filtracji przy użyciu aplikacji „SEEP”. Parametry geometryczne i geotechniczne przyjąłem takie jak dla nasypu fizycznego wykonanego w korycie hydraulicznym. Wykres linii jednakowych ciśnień wskazuje na dużą korelację z rezultatem badań laboratoryjnych [B.1.4]. Uzyskane zbieżności umożliwiły prowadzenie symulacji dla konstrukcji o wymiarach rzeczywistych. Realizacja założonej częstotliwości pomiarów była możliwa dzięki zamontowanej aparaturze pomiarowej. Układ rejestrujący dał możliwość pełnego monitoringu w trakcie badania.

Kolejna konstrukcja nr 5 posiadała wszystkie elementy modelu 4, ale została uzupełniona o ekran uszczelniający (rys. 8). Skarpa odwodna została wyłożona obustronnie gładką geosyntetyczną barierą polimerową GBR-P o grubości 2 mm. Zabudowanie geomembrany miało na celu uszczelnienie nasypu i zabezpieczenie skarpy przed erozją wodną. Piętzenie wody na stanowisku górnym do założonego poziomu 50 cm trwało 5 godzin. Odczyt poziomu wody w piezometrach rejestrowałem co 6 minut. Po ustabilizowaniu poziomu odczyty rejestrowałem co 24 godziny, sprawdzając ewentualne przecieki. Zastosowana geosyntetyczna bariera polimerowa okazała się całkowicie nieprzepuszczalna dla piętzonej wody. Krzywa depresji nie uformowała się z uwagi na brak filtracji.



Przeprowadzone badania, wykonane obliczenia oraz analiza wyników pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

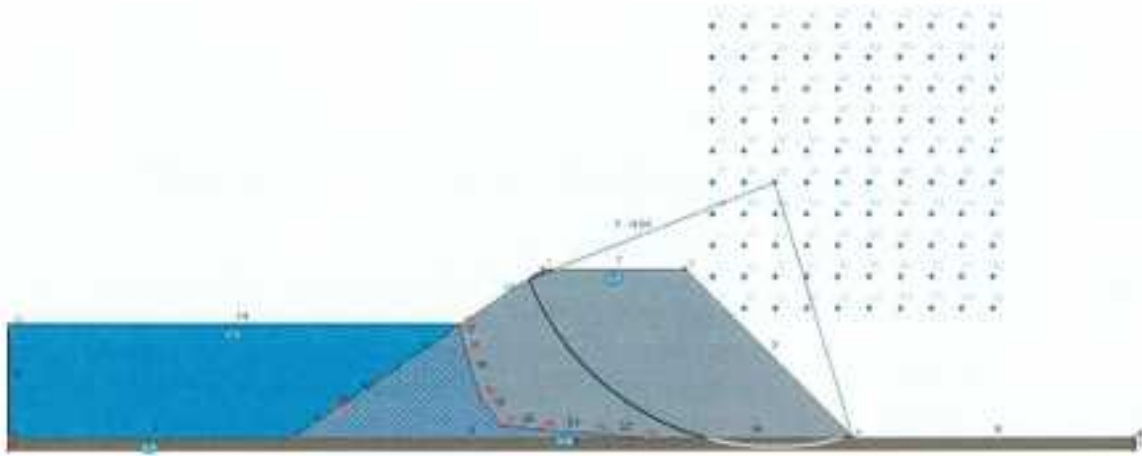
- mieszanka popiołowo-żuźłowa z uwagi na swoje parametry geotechniczne, bez odpowiednich zabiegów wzmacniających i uszczelniających, nie powinna być wykorzystywana do budowy nasypów hydrotechnicznych, formowania skarp,
- główne uszkodzenia w modelu 1 i 3 spowodowane były wymywaniem cząsteczek gruntu z podstawy skarpy odpowietrznej przez filtrującą wodę. Skarpa odwodna przy nachyleniu 1:1,5 nie wykazywała znaczących uszkodzeń nawet po szybkim obniżeniu zwierciadła wody górnej. Uszkodzenia obserwowano przy pochyleniu 1:1,
- zabudowanie w podstawie skarpy odpowietrznej drenażu żwirowego (modele 2, 4 i 5) pozwala zapobiec zjawiskom sufozji i upłynniania. Zastosowanie geosyntetyku drenażowego systemu komórkowego, płyt ażurowych wypełnionych żwirem na skarpie odpowietrznej stabilizuje skarpe oraz zapobiega jej rozmywaniu,
- zastosowanie geomembrany GBR-P blokuje przepływ wody przez nasyp (model 5), a także zabezpiecza skarpe odwodną przed rozmyciem. Zabudowanie jej w formie ekranu w skarpie odwodnej może być zabiegiem doszczelniającym.

Wyniki przeprowadzonych badań modelowych mogą być podstawą do prognozowania przebiegu pracy nasypów popiołowo-żuźłowych współpracujących z geosyntetykami. Stosowane w praktyce wymiary geometryczne przekrojów poprzecznych nasypów, poziom piętrzenia i wartości spadku hydraulicznego są na ogół znacznie bezpieczniejsze niż przyjęte w prezentowanych badaniach modelowych. Dlatego przedstawione wyniki posiadają duży zapas bezpieczeństwa w stosunku do spodziewanych wartości w obiektach rzeczywistych.

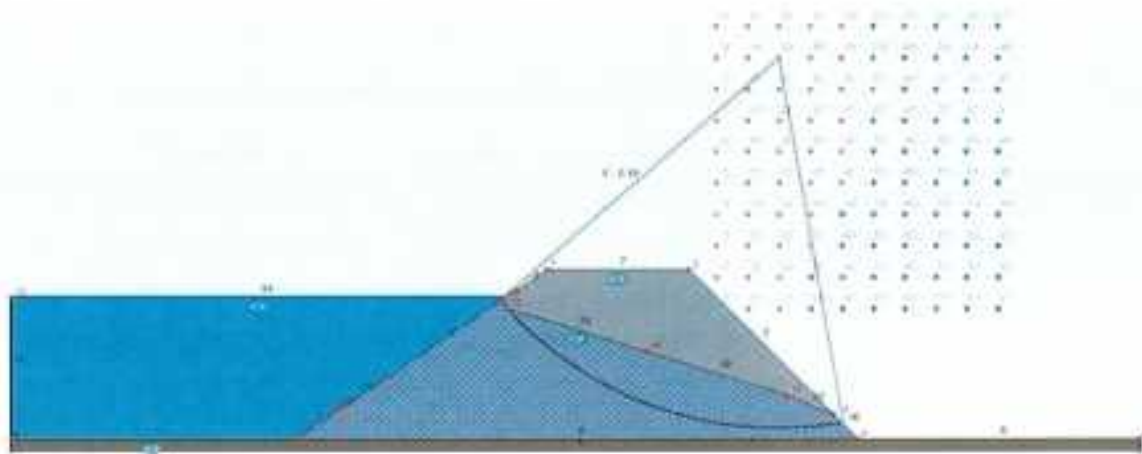
Ważne jest określenie wpływu geosyntetyków wbudowanych w nasyp hydrotechniczny na charakter przepływu filtracyjnego przez te budowle. Temat ten jest aktualny ze względu na wzrastające potrzeby wykonywania obiektów w tej technologii [65, 92]. Badania procesu filtracji przez modele nasypów wykonanych w skali półtechnicznej prowadzi się sporadycznie ze względu na ich dużą pracochłonność. Wyniki badań modelowych filtracji które przeprowadziłem są najbardziej zbliżone do warunków filtracji przez rzeczywiste konstrukcje. Modele dają możliwość wbudowania dodatkowych elementów, takich jak elementy doszczelniające, drenażowe, oraz zainstalowania urządzeń pomiarowych [91].

Kolejnym zagadnieniem, jakie zbadałem, była stateczność skarp wykonanych z mieszanek popiołowo-żuźłowych. W celu potwierdzenia wyników uzyskanych w badaniach laboratoryjnych przeprowadziłem analizę numeryczną stateczności skarpy odpowietrznej. Zastosowałem w

obliczeniach metodę blokową Bishopa. Następnie zdefiniowałem model numeryczny o wymiarach dziesięciokrotnie większych w stosunku do modelu fizycznego wykonanego w korycie hydraulicznym [B.1.2]. W obrębie korpusu nasypu wydzieliłem warstwy poniżej i powyżej krzywej filtracji. Parametry geotechniczne mieszanki popioło-żużlowej przyjąłem z oznaczeń wykonanych w laboratorium [B.1.2, B.1.4]. Założone w obliczeniach numerycznych poziomy zwierciadła wody w korpusie nasypu wprowadziłem z badań modelowych. Oprzyrządowanie pomiarowe modelu pozwalało na rejestrację poziomów zwierciadła wody wewnątrz konstrukcji. Obliczenia współczynnika stateczności przeprowadziłem dla sześciu schematów różniących się wysokością piętrzenia i położeniem krzywej filtracji w korpusie nasypu [B.1.2].



Rys. 9. Schemat obliczeniowy stateczności dla poziomego piętrzenia 40 cm



Rys. 10. Schemat obliczeniowy stateczności dla poziomego piętrzenia 50 cm

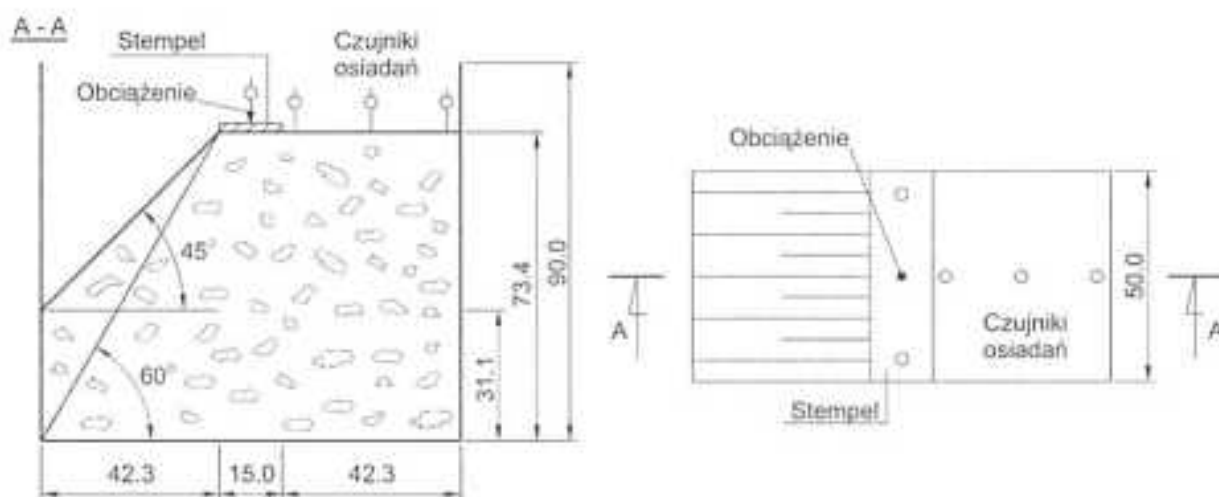
Rezultaty przedstawiały się następująco: przy niższych poziomach piętrzenia (10, 20, 30, 40 cm) wykonany z popioło-żużla nasyp hydrotechniczny o założonych wymiarach geometrycznych był konstrukcją stateczną (rys. 9). Sytuacja pogorszyła się w momencie wysokiego piętrzenia (rys. 10), którego efektem był wysoki przebieg krzywej filtracji przy niekorzystnej wartości spadku hydraulicznego. Przeprowadzone badania oraz wykonane obliczenia dały wyniki zgodne w kwestii braku stateczności modelu przy pełnym piętrzeniu (rys. 10). Wpływ na taką sytuację miało wiele czynników. Głównym z nich jest woda, która infiltrując do środka korpusu, powoduje jego rozmywanie, a w następstwie uszkodzenie skarpy odpowietrznej. Kolejnym czynnikiem jest mała gęstość objętościowa gruntu, która jest bardzo niekorzystna w przypadku pracy pod wodą. Wyliczona wartość  $F = 0,18$  znajduje odzwierciedlenie w zachowaniu się modelu fizycznego. Materiał skarpy odpowietrznej, zawilgocony do wysokości 15 cm od podstawy, stawał się rozluźniony i zaczynał się upływać, obserwowano zjawisko sufozji.

Obliczony współczynnik bezpieczeństwa dla przypadku szóstego – przy zredukowanych parametrach wytrzymałościowych  $\phi$  i  $c$  – wyniósł 0,18 [B.1.2]. Ustalone metodą analizy wstecznej wartości parametrów mechanicznych, przy których możliwe jest uzyskanie współczynnika stateczności powyżej 1,3, to  $8^\circ$  dla kąta tarcia i 8 kPa dla spójności.

Zjawiska filtracji wody badane w modelach nasypów wykonanych w skali półtechnicznej, są najbardziej zbliżone do procesów filtracji przez rzeczywiste obiekty. Wyniki takich badań mogą stanowić informację o przewidywanym przebiegu pracy nasypów popioło-żużlowych czy też innych gruntów o zbliżonych parametrach. Modele tego rodzaju dają możliwość obserwacji zjawisk filtracyjnych – nawet tych krytycznych – bez obawy o konsekwencje całego eksperymentu. Osuwisko asekwentne, jakie zaczynało powstawać, jest jednym z prostszych przypadków – tworzy się w jednorodnych gruntach nieuwarstwionych, powierzchnia poślizgu ma w przybliżeniu kształt powierzchni kołowo-walcowej. Piętrzona woda infiltruje do zbocza i nawadnia korpus nasypu stopniowo, redukując parametry wytrzymałościowe gruntu w strefie saturacji. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że stosowane w praktyce wykonawczej wymiary geometryczne nasypów, poziomy piętrzenia oraz wartości spadku hydraulicznego są na ogół znacznie korzystniejsze, niż przyjęte w prezentowanych badaniach modelowych. Zastosowana metoda badawcza oparta o kalibrację modelu numerycznego dała zadowalające efekty. Wymagany komplet danych pozyskałem stosując opracowany system pomiarowo-kontrolny.

Obliczenia stateczności skarpy odpowietrznej przeprowadziłem [B.1.4] również w przypadku braku infiltracji przez nasyp (stosując ekran geomembrany). Uzyskałem współczynnik bezpieczeństwa  $F = 4,05$ , stanowiło to potwierdzenie wyników badań modelowych, gdzie stateczność również została zachowana.

Kolejne badania, związane tym razem ze statecznością skarpy obciążonej, przeprowadzono w skrzyni modelowej (rys. 11) o długości 99,9 cm, szerokości 50,4 cm i wysokości ok. 100 cm [B.1.8]. Skrzynię wykonano ze stalowej konstrukcji pokrytej blachą z elementami plexi. Materiałem badawczym był popioło-żużel – odpad paleniskowy o dużym zróżnicowaniu właściwości fizycznych i chemicznych pochodzący z Elektrowni Skawina. W skrzyni modelowej uformowano skarpy modelowe (pierwsza o nachyleniu  $45^\circ$  a druga  $60^\circ$ ), które uzbrojono w aparaturę pomiarową do mierzenia przemieszczeń. Przykładając coraz większe obciążenie w konkretnych odstępach czasowych, doprowadzono do oberwania się skarpy nasypu modelowego. Jako wynik badań niszczących uzyskano przebieg płaszczyzny poślizgu i wartość obciążenia granicznego przyłożonego na krawędzi naziomu w chwili zainicjowania się mechanizmu ścicia. Te dane pozwoliły przejść do wykonania obliczeń metodą analizy wstecznej, adoptując jedną z metod służących do oceny stateczności skarp.



Rys. 11. Schemat skrzyni modelowej

Nasypy modelowe formowano warstwami [B. 1.8]. Przy założonym wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,95$  i wilgotności optymalnej, a pomiędzy formowane warstwy wprowadzono na wąskim odcinku paski barwionego popiołu w celu łatwiejszej identyfikacji przebiegu krzywej poślizgu.

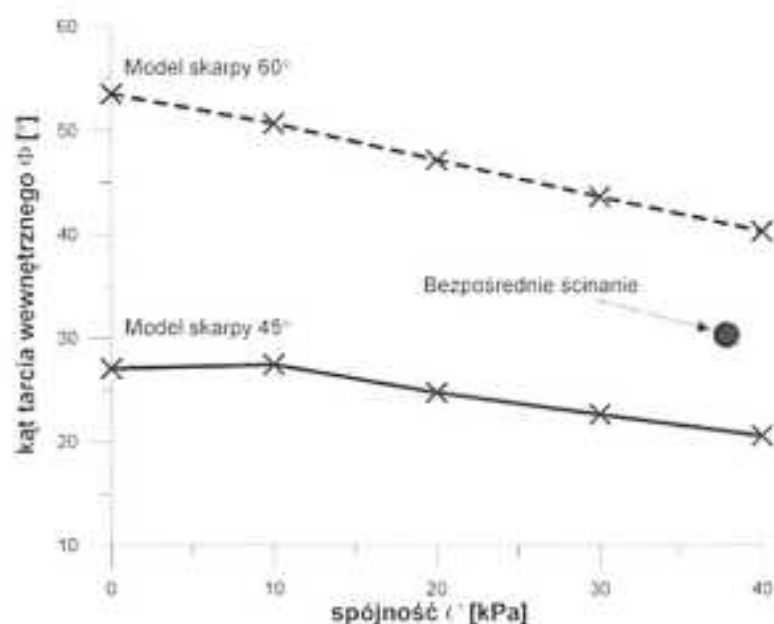
Badanie trwało do chwili utraty stateczności przy przyłożonym naprężeniu pionowym równym  $722,8 \text{ kPa}$  dla nasypu o nachyleniu skarpy  $45^\circ$ , oraz  $598,9 \text{ kPa}$  dla nasypu o nachyleniu skarpy  $60^\circ$ . Po utracie stateczności badany model w płaszczyźnie przechodzącej przez jego środek został rozkopany, aby dostać się do pasków barwionego popiołu. Na podstawie pomiaru ich przemieszczeń poziomych oraz widocznego obsunięcia się nasypu, dokonano analizy deformacji, określając przebieg płaszczyzny poślizgu.

W wyniku przeprowadzonych badań niszczących można stwierdzić, że popioło-żużel charakteryzuje się znaczną możliwością przeniesienia obciążeń zewnętrznych. Analizując kształt

krzywej poślizgu w przypadku skarpy o nachyleniu 45° była ona płytsza i przebiega znacznie łagodniej niż w przypadku skarpy o nachyleniu 60°, gdzie wspomniana płaszczyzna sięga znacznie głębiej i jest ostrzej nachylona – zwłaszcza w strefie blisko naziomu. Może to świadczyć, iż mechanizm zniszczenia propaguje się w tym samym kierunku, niezależnie od rodzaju materiału, pod warunkiem, że ten jest jednorodny.

Współczynnik stateczności skarp modelowych wyznaczono w następujący sposób:

- założono przedział wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności dla popioło-żuźla:  $\Phi = 10\text{--}50^\circ$  (skarpa 45°),  $\Phi = 20\text{--}60^\circ$  (skarpa 60°),  $c = 0\text{--}40$  kPa,
- dla wszystkich kombinacji  $\Phi$  i  $c$  z wyżej wymienionych przedziałów określono współczynnik bezpieczeństwa  $F$  [B. 1.8],
- na podstawie określonych wartości  $F$  znaleziono takie pary  $\Phi$  i  $c$  dla których  $F = 1$  (wartości graniczne parametrów wytrzymałościowych) i na ich podstawie wykreślono krzywe graniczne dla modeli (rys. 12).



Rys. 12. Krzywe graniczne dla skarpy nasypu z popioło-żuźla

Mniejsze obciążenie niszczące nasyp modelowy (rys. 12), pociąga za sobą powstanie większych wartości granicznego kąta tarcia wewnętrznego przy odpowiednio mniejszej spójności granicznej. Zakres wartości granicznego kąta tarcia wewnętrznego jest w tym przypadku większy, niż dla gruntu mogącego przenieść większe obciążenie naziomu (krzywa graniczna jest ostrzej nachylona). Widoczne jest również, że grunt mogący przenieść większe obciążenie niszczące,



charakteryzuje się mniejszym przedziałem wartości granicznego kąta tarcia wewnętrznego (krzywa graniczna jest łagodniej nachylona). Z punktu widzenia metod równowagi granicznej, wykorzystujących kryterium wytrzymałościowe gruntu, warunki stateczności odpowiadające stanowi granicznemu ( $F=1$ ), uzyska się dla dowolnej konfiguracji granicznych parametrów wytrzymałościowych, pod warunkiem, że dana konfiguracja kąta tarcia wewnętrznego i spójności leży na krzywej granicznej.

Analiza wyników przeprowadzonych badań dostarczyła następujące informacje:

- brak przecięcia się krzywych granicznych w jednym punkcie dla nachylenia skarpy  $45^\circ$  i  $60^\circ$ , uniemożliwił ustalenie wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie, które by były wspólne w różnych konfiguracjach nachylenia skarp,
- stosując w analizie wstecznej metody równowagi granicznej do ustalenia parametrów wytrzymałości na ścinanie gruntu, uzyskuje się docelowo zbiór tych parametrów, leżących na krzywej granicznej, wykreślonej dla konkretnego mechanizmu zniszczenia skarpy budowli ziemnej,
- grunty pochodzenia antropogenicznego (w tym UPS) powinny być badane z punktu widzenia wytrzymałości na ścinanie przy użyciu testów niszczących, modelujących warunki pracy, zwłaszcza jeżeli docelowa budowla będzie pracować pod obciążeniem zewnętrznym,
- zastosowana metoda oznaczania parametrów wytrzymałości na ścinanie, mimo znacznego wykorzystania materiału gruntowego, powinna być stosowana tam, gdzie zależy projektantowi na uzyskaniu właściwości mechanicznych gruntu pracującego w warunkach obciążenia zewnętrznego.

Dla zrealizowania trzeciego celu wykorzystałem wyciągi wodne pobrane w trakcie badań modelowych popioło-zuzli z Elektrowni Skawina S.A.. Wyciągi wodne z odpadów energetycznych charakteryzuje na ogół silna zasadowość, pH 9,0–12,0 [B.1.7]]. Jednakże bardzo wysoka wartość pH występuje tylko w początkowym okresie składowania emulgatów popiołowo-wodnych. Na składowiskach zachodzą bowiem procesy zobojętniania, które w konsekwencji zmieniają charakter wyciągów wodnych wynoszonych do środowiska. Wartość pH wraz z upływem czasu składowania obniża się.

Filtraty z popiołów charakteryzują się na ogół wysoką zawartością soli – w ich składzie występują głównie siarczany: wapnia, magnezu, potasu oraz w mniejszej ilości sodu. Sole te są łatwo i szybko wypłukiwane, ale na ogół nie stanowią zagrożenia dla człowieka, mogą jednak ujemnie wpływać na środowisko gruntowo wodne. W publikacji B.1.7 oznaczono zawartości metali alkalicznych (Ca, Na, K, Mg) oraz śladowych (Cd, Pb, Cr, Cu) a także pH i przewodności elektrolitycznej. Zawartości metali oznaczono metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej FASA na aparacie Solaar M6 firmy Unicam.

Przewodność elektrolityczną oznaczono konduktometrycznie, a pH potencjometrycznie [B.1.7] w laboratorium Zakładu Ekologicznych Podstaw Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

Prowadzone badania odczynu odcieków pobranych z piezometrów umieszczonych w modelu zapory [B.1.7] wykazały po 1-dobowej ekspozycji zróżnicowanie o amplitudzie 0,9. Najniższym odczynem (pH = 6,7), charakteryzowała się próbka pobrana w korpusie zapory, wyższym i w miarę wyrównanym odczynem charakteryzowały się próbki pobrane od strony wody górnej (pH = 7,3) oraz wody dolnej, (pH = 7,6). Obniżony odczyn w odcieku z korpusu zapory może być spowodowany wpływem wykorzystanego materiału. W badaniach prowadzonych na eluatach uzyskanych z mieszanki popiołowo-żużlowej z tego samego źródła, wykazano, iż charakteryzują się one stosunkowo niskim odczynem (pH = 6,5). Obniżony i bardzo wyrównany odczyn rejestrowany był także we wszystkich próbkach pobranych po ekspozycji 25-dobowej.

Wszystkie oznaczone zawartości kadmu i chromu były bardzo niskie i nie przekroczyły progu oznaczalności użytego spektrofotometru tj. dla kadmu  $0,29 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$  i dla chromu  $2,5 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Zawartości ołowiu charakteryzowały się zmiennością w zakresie  $1,25\text{--}3,7 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Zawartości Cd, Cr i Pb spełniały normy dopuszczalne dla wód powierzchniowych i podziemnych oraz wymagania dla ścieków wprowadzanych do wód lub gruntu.

Większość pierwiastków śladowych w popiołach koncentruje się w strukturach stabilnych faz glinokrzemianowych, które nie ulegają lub tylko w niewielkim stopniu ulegają wylugowaniu w wodzie, w związku z czym ich zawartość w eluacie jest zwykle na granicy wykrywalności spektrofotometru i tylko w nielicznych przypadkach przekracza granice dopuszczalne dla wód pitnych i powierzchniowych [B.1.7]. W wodnym eluacie z popiołów świeżych obserwuje się wyższe zawartości pierwiastków takich jak kadm, kobalt, chrom, mangan, nikiel i cynk w porównaniu z popiołem składowanym przez rok. Można stwierdzić, że dla takich pierwiastków jak: Cd, Co, Cr, Ti, Zn odczyn pH nie ma wyraźnego wpływu na zdolność lugowania ich z popiołów. Z kolei odczyn lekko kwaśny (pH = 5), sprzyja wymywaniu z popiołów związków ołowiu i żelaza, a związki miedzi są intensywnie lugowane do roztworu przy pH = 7–8.

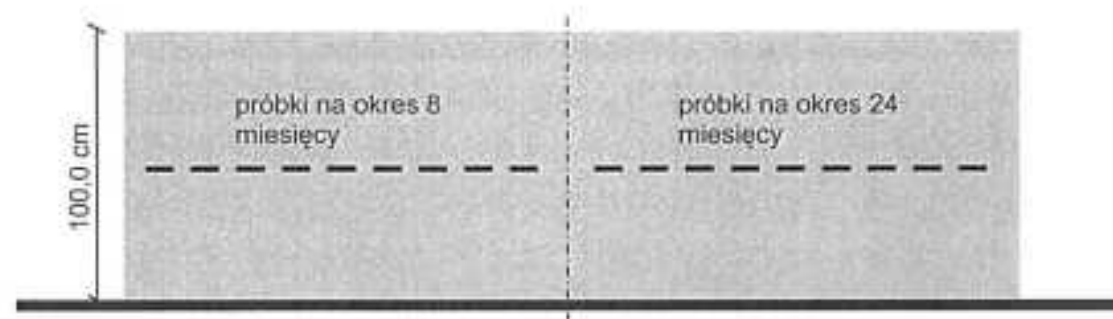
Kolejne zagadnienie jakie poruszyłem w cyklu publikacji dotyczyło oddziaływania chemicznego mieszanki popiołowo-żużlowej na wytrzymałość struktury geowłóknin igłowanych [B.1.3]. Geowłókniny igłowane stosowane w pracach ziemnych i hydrotechnicznych spełniają wiele funkcji (określonych w normie PN-EN 13251:2002/A1:2006): wzmacniającą, filtracyjną, drenażową, separacyjną, ochronną. W procesie ich produkcji, podczas spłóśniania geowłóknin, w celu ułatwienia ich splątania dodawany jest rozcieńczony kwas siarkowy, który później zostaje zneutralizowany poprzez płukanie. Wartość pH pozostaje na poziomie neutralnym lub lekko kwasowym dla zapewnienia odporności na starzenie oraz odpowiedniej elastyczności i wytrzymałości włókien. Jeżeli

wartość pH geowłókniny ma odczyn zasadowy przez dłuższy okres, istnieje ryzyko uszkodzenia włókien i rozwoju mikroorganizmów. Normy DIN 61206 ustalają wartość pH na poziomie 5–8 w przypadku geowłóknin o gęstości  $0,36 \text{ g/cm}^3$  lub mniejszej oraz pH 4–8 dla gęstości  $0,37 \text{ g/cm}^3$  lub większej. Mieszanki popiołowo-żużlowe są cennym gruntem antropogenicznym. Dla oceny przydatności popioło-żużli w budownictwie, oprócz parametrów geotechnicznych, konieczne bywa również sprawdzenie oddziaływania na stosowane geosyntetyki, a szczególnie geowłókniny, wrażliwe na środowisko chemiczne, w jakim są zabudowane.

Materiał popiołowo-żużłowy wykorzystany w tej serii badań pobrałem ze składowiska Huty Mittal Steel Poland S.A. w Krakowie Nowej Hucie. Charakterystyka chemiczna wykazała silnie zasadowy odczyn pH, który może oddziaływać destrukcyjnie na strukturę włókien stykającej się geowłókniny, a przez to na parametry wytrzymałościowe wyrobu. W laboratorium Zakładu Ekologicznych Podstaw Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie określono odczyn pH popioło-żużli. Badanie wykonano przy wykorzystaniu dwóch metod: jednomolowego roztworu KCL i metody roztworu wodnego, uzyskując odpowiednio wartości pH 10,3 i 9,9.

To badanie wstępne, poprzedziło wykonanie polowego stanowiska badawczego. Wybudowałem nasyp doświadczalny z mieszanki popiołowo-żużłowej, w którym wbudowałem geowłókniny (rys. 13). Konstrukcja i lokalizacja nasypu umożliwiały oddziaływanie warunków atmosferycznych (opady, temperatura). Nasyp był zabezpieczony przed podsiękiem wody gruntowej. Próbkę geowłóknin wbudowałem na głębokości 0,5 m, tak aby obie strony wyrobu były w bezpośrednim kontakcie z mieszanką popiołowo-żużłową, z zaznaczeniem górnej powierzchni. Konstrukcja funkcjonowała przez okres 24 miesięcy.

Po wydobyciu geowłóknin z nasypu wyciąłem próbki o średnicy 260 mm, z zachowaniem orientacji góra-dół. Prowadziłem ocenę większej ilości materiału, aby stwierdzić, czy jest on jednorodny na całej swojej powierzchni.



Rys. 13. Stanowisko, na którym zabudowano próbki geowłóknin

Tak przygotowane próby poddałem badaniom siły przebicia, zgodnie z normą [PN-EN ISO 12236:2007 Geosyntetyki – Badanie statycznego przebicia (metoda CBR).]

Jeśli chodzi o geowłókniny w badaniach wykorzystano wyroby igłowane jednego producenta o nazwach handlowych Secutex i Terrafix. Geowłókniny separacyjne Secutex GRK 151-GRK 3C, 401-GRK 5C – koloru białego, wykonane z polipropylenu (PP) – mają zabezpieczać przed mieszaniem się różnych warstw gruntowych. Produkty te znalazły zastosowanie w budownictwie drogowym i kolejowym (podłoża i podbudowy drogowe, nasypy, drogi tymczasowe, podtorza kolejowe i tramwajowe) oraz w budownictwie ogólnym. Geowłókniny ochronne Secutex R 404, R 1024 – o barwie szarobrunatnej, wykonane z recyklowanych włókien polipropylenu (PP) – chronią geomembrany przed uszkodzeniami mechanicznymi. Znalazły zastosowanie przy budowie składowisk odpadów. Geowłókniny filtracyjne Terrafix 813 – dwuwarstwowe, wykonane z włókien odcinkowych syntetycznych PP/PES (wchodzący w skład wyrobu polieterosulfon stosowany jest tam, gdzie wymagane są bardzo dobre i stabilne właściwości mechaniczne i chemiczne) – wykorzystywane są w szerokim zakresie w budownictwie hydrotechnicznym jako pojedyncze lub wielowarstwowe filtry tekstylne, maty obciążone piaskiem.

Przebadalem łącznie 75 próbek geowłóknin. Każdy z materiałów był reprezentowany przez 5 próbek nowo wytworzonego produktu, 5 próbek po 8 miesiącach i 5 próbek po 24 miesiącach zabudowania w nasypie z mieszanki popiołowo-żuźłowej. Dla poszczególnych typów geowłóknin uzyskałem następujące wyniki:

- w przypadku geowłókniny Secutex 151-GRK 3C maksymalna siła, jaka została osiągnięta podczas badania próbek świeżego produktu, wynosiła 1,91 kN. Podczas badania próbek po 8 miesiącach zabudowania w popioło-żuźlu maksymalna siła wynosiła 1,97 kN. W próbkach materiału zabudowanego przez 24 miesiące wartość siły przebicia spadła do 1,62 kN,
- w przypadku geowłókniny Secutex 401-GRK 5C, charakteryzującej się większą masą powierzchniową, maksymalna siła, jaka została osiągnięta podczas badania próbek nieeksploatowanego materiału, wynosiła 4,72 kN. Podczas badania próbek po 8 miesiącach zabudowania maksymalna siła wynosiła 4,87 kN. Próbkę zabudowaną przez 24 miesiące charakteryzowała się wytrzymałością 4,06 kN,
- w przypadku geowłókniny Secutex R 404 maksymalna siła, jaka została osiągnięta podczas badania próbek materiału nowo wytworzonego, wynosiła 2,16 kN. Podczas badania próbek po 8 i 24 miesiącach zabudowania maksymalna siła wynosiła odpowiednio 2,28 i 1,75 kN,
- w przypadku geowłókniny Secutex R 1204 maksymalna siła dla próbek świeżego produktu wynosiła 7,37 kN, po 8 i 24 miesiącach zabudowania maksymalna siła wynosiła odpowiednio 7,81 i 6,12 kN,



– w przypadku geowłókniny Terrafix 813 maksymalna siła, jaka została osiągnięta podczas badania próbek wyjściowych, wynosiła 3,87 kN. Podczas badania próbek po 8 miesiącach zabudowania w nasypie maksymalna siła wynosiła 3,95 kN, natomiast po 24 miesiącach – 3,19 kN.

Przeprowadzone badania i analiza otrzymanych wyników pozwoliły mi określić następujące zależności:

– ośmiomiesięczny okres zabudowania geowłóknin w nasypie z mieszanki popiołowo-żuźlowej o zasadowym odczynie nie wpłynął istotnie na ich wytrzymałość na przebicie. Dla żadnego z typów geowłóknin nie zanotowano zmniejszenia wartości siły przebijającej,

– po okresie 24 miesięcy zalegania w nasypie z mieszanki popiołowo-żuźlowej geowłókniny GRK 151 i 401 z włókien polipropylenowych utraciły 15–16% wytrzymałości na przebicie statyczne, natomiast geowłókniny R 404, 1024 i Terrafix z recyklowanych włókien polipropylenu utraciły 17–19% wytrzymałości.

Dla realizacji czwartego celu badań wykonałem w warunkach laboratoryjnych symulowane uszkodzenia geosyntetyków, jakie mogą wystąpić w budowlach ziemnych [B.1.5]. Opracowałem metodykę badań dla kontroli siły przebicia geowłóknin na zagęszczonym podłożu gruntowym. Przeprowadziłem próby z kilkoma rodzajami przewodników elektrycznych. Uzyskując możliwość zamknięcia obwodu elektrycznego przy znikomym wpływie elementu stykowego na wyniki badania. Procedury normowe powinny odzwierciedlać współpracę geosyntetyku z podłożem gruntowym [5, 6, 7, 11, 22, 30, 79]. Zwraca się uwagę na konieczność udoskonalania metod badawczych w celu zapewnienia warunków pomiaru odzwierciedlających rzeczywistą pracę geosyntetyków w budowlach ziemnych. Zagęszczenie mieszaniny popiołowo-żuźlowej wpływa nie tylko na jej parametry geotechniczne [B.2.3], ale również na cechy wytrzymałościowe współpracującego z gruntem geosyntetyku. Wyniki wartości siły przebicia na podłożu gruntowym które jest jednak odkształcalne są wyraźnie różne od normowych badań klasyfikacyjnych na podłożu nieodkształcalnym.

Stosując opracowaną metodykę wykonałem badania laboratoryjne [B.1.5] wytrzymałości na przebicie piramidką wybranych geowłóknin igłowanych o gramaturze od 150 do 1200 g · m<sup>-2</sup>. Porównałem wartości siły przebicia geosyntetyków ułożonych na podłożu nieodkształcalnym z wartościami uzyskanymi na podłożu odkształcalnym. Podłoże nieodkształcalne zgodnie z PN-EN 14574:2006P stanowiła płytka aluminiowa. Jako podłoże odkształcalne użyłem mieszanki popiołowo-żuźlowej zagęszczonej w cylindrze do trzech wartości wskaźnika zagęszczenia: 0,90, 0,95 i 1,00. Wykorzystana w badaniach mieszanka popiołowo-żuźłowa została pobrana z wydzielonej części osadnika popiołów i żużli Elektrowni Skawina. Zastosowana metoda miała symulować oddziaływanie ostrych i sztywnych elementów podczas obciążenia geosyntetyków zabezpieczających geomembrany. Wykonałem ogółem 75 próbek podłoża gruntowego. Zbadałem 5 rodzajów geowłóknin, które



przebijałem najpierw na sztywnym podłożu, a następnie na podłożu gruntowym o zmiennej wartości wskaźnika zagęszczenia.

Uzyskane wyniki wskazały, że siła przebicia geowłóknin jest najmniejsza na podłożu nieodkształcalnym. Wartość siły przebicia wzrasta wraz z gramaturą geowłóknin. Na podłożu nieodkształcalnym minimalna wartość siły wyniosła 137 N – dla geowłókniny Secutex 151-GRK 3C. Maksymalną wartość siły, 1360 N, odnotowano dla geowłókniny o największej gramaturze.

Dla podłoża odkształcalnego wartości siły mieściły się w przedziale od 202 N do 1870 N. Wartość siły potrzebnej do przebicia badanej próbki wzrastała wraz ze spadkiem wskaźnika zagęszczenia podłoża gruntowego. Maksymalną siłę przebicia na podłożu odkształcalnym uzyskałem dla geowłókniny Secutex R 1204. Wyniosła ona 1870 N (przy  $I_s = 0,95$ ). Minimalna wartość siły na podłożu odkształcalnym wyniosła 202 N (przy  $I_s = 1,00$ ). Uzyskałem ją dla geowłókniny Secutex 151-GRK 3C. Przy zagęszczeniu  $I_s = 0,90$  nie udało się przebić najgrubszej geowłókniny – Secutex R 1204. Element przebijający zagłębiał się do dna cylindra, w którym znajdował się grunt, lecz nie odnotowano sygnału przebicia. Siła potrzebna do przebicia geowłóknin na podłożu gruntowym o wskaźniku zagęszczenia równym 1,0 była większa od siły potrzebnej do przebicia na płycie aluminiowej (podłożo nieodkształcalne). Dla geowłóknin GRK 151-GRK 3C i R 1024 różnica wyniosła odpowiednio 47 i 23%, dla pozostałych – 80%. Po zmniejszeniu wartości wskaźnika zagęszczenia z 1,00 do 0,95 wartości sił wzrosły od 8 do 20%. Wartości sił wzrosły również po zmniejszeniu wartości wskaźnika zagęszczenia z 0,95 do 0,90 – mieściły się w przedziale od 7 do 27%.

W mojej metodyce badawczej wraz z pomiarem siły wykonywałem również odczyt zagłębienia piramidki przebijającej. Określiłem, na jaką głębokość trzpień musi wbić się z geowłókniną w grunt, by doszło do przebicia. Wielkości przemieszczeń przy przebijaniu geowłóknin nie powinny przekraczać maksymalnego wydłużenia. Można wtedy oczekiwać, że pomimo braku przebicia sygnalizowanego zamknięciem obwodu elektrycznego może dojść do rozerwania materiału geowłókniny na skutek przekroczenia wartości granicznego wydłużenia. Analizując uzyskane wartości stwierdziłem:

- wraz ze wzrostem zagęszczenia gruntu maleje zagłębienie trzpienia w chwili przebicia próbki;
- maksymalne zagłębienie, przekraczające 18 mm, zanotowałem dla geowłókniny Secutex R 1204, przy zagęszczeniu  $I_s = 0,90$ ;
- minimalne zagłębienie, równe 2,7 mm, zanotowałem dla geowłókniny Secutex 151-GRK 3C, przy zagęszczeniu  $I_s = 1,00$ .

Zaobserwowałem, że wartości siły przebicia na podłożu nieodkształcalnym wzrastają proporcjonalnie do gramatury geowłóknin [B.1.5]. Wartość siły potrzebnej do przebicia badanej próbki na gruntowym podłożu odkształcalnym maleje wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia.

Przebicie geowłóknin ułożonych na podłożu odkształcalnym wymagało użycia większych sił w porównaniu do podłoża nieodkształcalnego i powodowało duże odkształcenia geowłóknin.

Moim zdaniem stosując opracowaną metodykę badawczą uzyskałem możliwość pomiaru nowego aspektu współpracy geowłóknin z podłożem gruntowym. Określiłem zależność pomiędzy zagęszczeniem danego rodzaju gruntu a wartością siły przebicia dla geowłóknin. Taki sposób badawczy nie był dotychczas opisywany w literaturze.

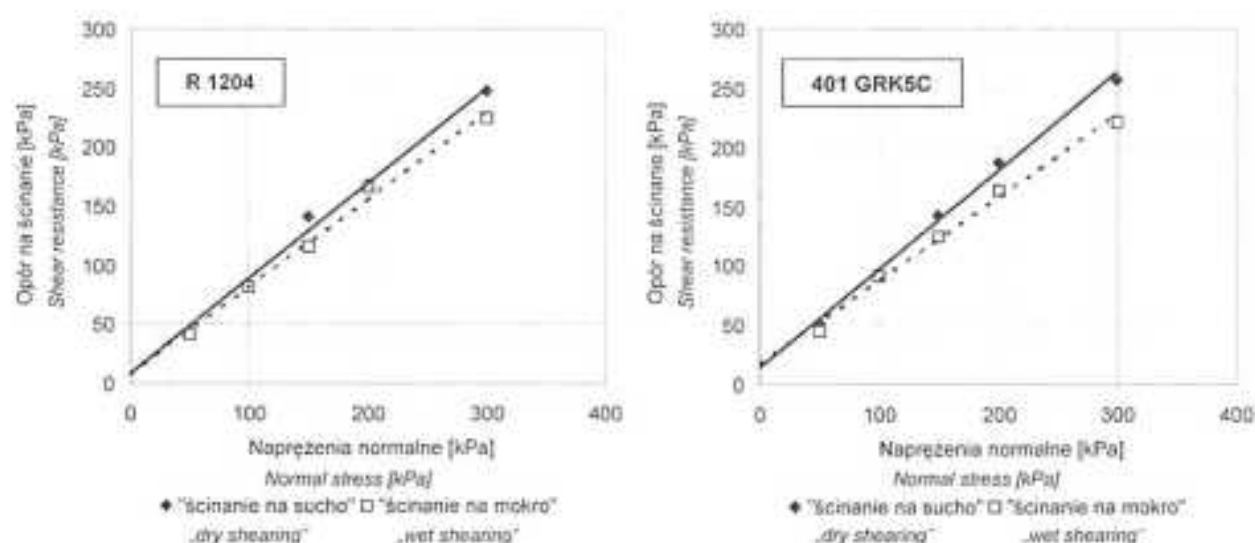
Piąty cel badawczy dotyczył charakterystyki tarcia pomiędzy mieszaniną popiołowo-żuźlową a geowłókniną [B.1.6]. Do określenia tarcia na kontakcie mieszanina-geosyntetyk wykorzystano dwa rodzaje geowłóknin igłowanych wyprodukowanych z włókien polipropylenowych. Materiały różniły się między sobą parametrami fizycznymi oraz mechanicznymi. Był to wynik różnej gramatury oraz różnego pochodzenia włókien polipropylenowych. Geowłóknina R 1204 o gramaturze  $1200 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  jest wytworzona z włókien recyklowanych, w odróżnieniu od 401GRK5C produkowanej z włókien nieprzetwarzanych o gramaturze  $400 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . Produkty znalazły zastosowanie w budownictwie drogowym i kolejowym (podłoża i podbudowy drogowe, nasypy, drogi tymczasowe, podtorza kolejowe i tramwajowe) oraz w budownictwie ogólnym.

Badania współczynnika tarcia i adhezji pomiędzy materiałem zasyпки, a geowłókninami przeprowadzono w standardowym aparacie bezpośredniego ścinania o wymiarach skrzynki  $12 \times 12 \times 7,8 \text{ cm}$ . Materiał zasyпки czyli mieszanina popiołowo-żuźłowa pochodziła z wydzielonej części osadnika Pleszów Huty Mittal Steel Poland S.A. Grunt formowano przy wilgotności optymalnej do uzyskania wskaźnika zagęszczenia  $I_s=1,00$ . Przed ścięciem próbki poddawano obciążaniu pionowemu w zakresie wartości  $50\text{--}300 \text{ kPa}$ , a następnie ścinano przy prędkości  $1,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Kryterium ścięcia odpowiadało maksymalnej wartości oporu na ścinanie w zakresie względnego odkształcenia próbki  $0\div 10\%$ . Na podstawie wyników badań określono wartości współczynnika tarcia występujące na kontakcie geosyntetyk-grunt. Badania przeprowadzono dla każdej z geowłóknin w dwóch seriach:

- w pierwszej serii badano geosyntetyki w stanie powietrznie-suchym („na sucho”),
- w drugiej serii 24 godziny przed badaniem geosyntetyki były hydratyzowane („na mokro”).

Przyjęta metodyka prac miała na celu określenie wpływu warunków wodnych na wielkość współczynnika tarcia.

W rysunku 14 przedstawiono wyniki oznaczeń wytrzymałości na ścinanie w strefie kontaktu geowłóknin z mieszaniną popiołowo-żuźłową. Porównując uzyskane wartości oporu na ścinanie na kontakcie grunt-geowłóknina „na sucho”, można stwierdzić, że nieco większą wartość tego parametru uzyskano dla geowłókniny Secutex 401 GRK5C, a odwrotną zależność uzyskano podczas badań geosyntetyków nasączonych wodą.



Rys. 14. Wartości oporu tarcia pomiędzy mieszaniną popiołowo-żużłowa a geowłókniną

Biorąc pod uwagę wartości składowych współczynnika tarcia na kontakcie geosyntetyków i gruntu ścinanych „na sucho” można stwierdzić, że wartości kąta tarcia uzyskane dla obu geowłóknin były bardzo podobne, natomiast większe wartości adhezji uzyskano dla geowłókniny Secutex 401 GRK5C. Z kolei w przypadku próbek badanych „na mokro” większe wartości kąta tarcia, a mniejsze wartości adhezji uzyskano dla geowłókniny R 1204. Należy zwrócić uwagę, że nawodnienie geosyntetyków spowodowało zmniejszenie parametrów tarcia, przy czym większą redukcję wartości tych parametrów uzyskano dla materiału Secutex 401GRK5C.

Analizując wyniki badań można również stwierdzić, że wartości kąta tarcia na kontakcie geosyntetyk-grunt są nieznacznie mniejsze od wartości kąta tarcia wewnętrznego materiału zasypki, natomiast istnieje duża różnica pomiędzy uzyskanymi wartościami spójności zasypki, a wartościami adhezji. Wartości współczynnika tarcia określono przy założeniu, że na kontakcie zasypka-zbrojenie nie występują siły adhezji. Z obliczeń tych wynika, że wartości współczynnika tarcia  $\mu$  w przypadku geowłókniny 401 GRK5C wynoszą 0,70-0,83, a dla materiału R 1204 zawierają się one w nieco mniejszym zakresie wartości (0,74-0,81), przy czym zauważalne jest, że mniejsze wartości współczynnika tarcia uzyskano dla geosyntetyków nawodnionych. Współczynnik tarcia zmniejsza się wraz ze wzrostem naprężeń normalnych, co wynika z adhezji występującej w strefie kontaktowej geosyntetyk-grunt.

Moim zdaniem uzyskane wyniki wnoszą informacje rozwijające zagadnienie współpracy geowłóknin z mieszankami popiołowo-żużłowymi. Tarcie w strefie kontaktu geowłóknina - grunt jest istotne w przypadku instalacji na skarpach.

### 7.4.3. Wskazanie najważniejszych osiągnięć cyklu publikacji stanowiącej podstawę postępowania habilitacyjnego

Za najważniejsze osiągnięcia, uzyskane w cyklu publikacji pt. „Interakcja mieszanek popiołowo-żużlowych z geosyntetykami w modelach konstrukcji ziemnych”, które stanowią mój wkład w rozwój dyscypliny ochrona i kształtowanie środowiska uważam:

- rozwinięcie koncepcji stosowania systemów grunt geosyntetyk jako docelowych układów służących budownictwu ziemnemu,
- poznanie procesów uszkodzeń filtracyjnych w nasypach z popioło-żużli,
- określenie wpływu stosowania poszczególnych typów geowłóknin w konstrukcjach z mieszankami popiołowo-żużłowymi,
- opracowanie nowej metodyki badawczej modeli nasypów w aparacie średniowymiarowym,
- wykonanie prototypowej instalacji oprzyrządowania pomiarowego średniowymiarowego aparatu do badania filtracji w zakresie; pomiaru temperatury, poziomów wody, objętościowego natężenia przepływu w oparciu o cyfrowe urządzenia pomiarowe i systemy rejestrujące,
- weryfikacja obecnych poglądów związanych z poziomem zanieczyszczeń wmywanych z popioło-żużli,
- wskazanie i rozwinięcie problemu utylizacji odpadów poenergetycznych poprzez ich wykorzystanie w budownictwie,
- poszerzenie współczesnej wiedzy na temat długości czasu eksploatacji układów popioło-żużel geosyntetyk oraz weryfikacja poglądów dotyczących wpływu długoletniego wbudowania geosyntetyków w budowlę ziemne z mieszanek popiołowo-żużlowych,
- opracowanie innowacyjnej metody badania wytrzymałości na przebicie geowłóknin na zagęszczonym podłożu gruntowym.

Celem praktycznym badań było przedstawienie możliwości wspólnej zabudowy w konstrukcji ziemnej dwóch materiałów antropogenicznych; geosyntetyków i popioło-żużli. Opracowanie nowych metod badawczych, dostarczających informacji przydatnych do wykorzystania w konkretnych warunkach wykonawczych i projektowych. Zalecenia technologiczne oparte na przedstawionych badaniach uzupełniają dotychczasową wiedzę dotyczącą mieszanek popiołowo-żużlowych, ich oddziaływania w różnych aspektach na zabudowane geosyntetyki.

#### 7.4.4. Możliwości aplikacyjne uzyskanych wyników

Wyniki przedstawione w publikacjach stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego mają znaczenie praktyczne, gdyż:

1. Wykonując badania modelowe w skali półtechnicznej, wykazałem, że mieszanka popioło-żużłowa z uwagi na swoje parametry geotechniczne – bez odpowiednich zabiegów wzmacniających i uszczelniających nie powinna być wykorzystywana samodzielnie do budowy nasypów, formowania skarp [B.1.1, B.1.2, B.1.4].
2. Wykazałem, że wbudowanie materiałów geosyntetycznych pozwala wzmocnić konstrukcję nasypu z mieszanki popiołowo-żużłowej, zapobiec zjawiskom sufozji i upłynnienia. Zastosowanie geosyntetyku drenażowego, systemu komórkowego, płyt ażurowych wypełnionych żwirem na skarpię odpowietrznej stabilizuje skarpe oraz zapobiega jej rozmywaniu [B.1.2, B.1.4].
3. Wykazałem, że ośmiomiesięczny okres zabudowania geowłóknin w nasypie z mieszanki popiołowo-żużłowej nie wpłynął istotnie na ich wytrzymałość na przebicie. Dla żadnego z typów geowłóknin nie zanotowano zmniejszenia wartości siły przebijającej. Natomiast po okresie 24 miesięcy zabudowania w nasypie z mieszanki popiołowo-żużłowej geowłókniny z włókien polipropylenowych utraciły już kilkanaście procent wytrzymałości na przebicie statyczne, [B.1.3, B.1.7]. Kluczowym czynnikiem degradującym jest w tym wypadku odczyn pH mieszanki.
4. Udowodniłem, że wartości siły przebicia geowłóknin na podłożu nieodkształcalnym wzrastają proporcjonalnie do ich gramatury [B.1.5]. Wartość siły potrzebnej do przebicia badanej geowłókniny na gruntowym podłożu odkształcalnym maleje wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia mieszanki popiołowo-żużłowej. Przebicie geowłóknin ułożonych na podłożu odkształcalnym wymagało użycia większych sił w porównaniu do podłoża nieodkształcalnego i powodowało duże rozciągnięcie geowłóknin.
5. Wykazano, że wartości kąta tarcia na kontakcie geosyntetyk - mieszanka popiołowo-żużłowa są nieznacznie mniejsze od wartości kąta tarcia wewnętrznego materiału gruntowego, natomiast istnieje duża różnica pomiędzy uzyskanymi wartościami spójności zasypki, a wartościami adhezji [B.1.6].
6. Opracowany system pomiarowo-rejestrujący wykonany w średniowymiarowym aparacie do badania filtracji został wykorzystany przy współpracy z firmą projektowo-wykonawczą Geotica Sp. z o.o. Wykonałem na stanowisku badawczym testy w których geosyntetyk był w bezpośrednim kontakcie z gruntem. Ustaliłem rzeczywistą wartości przepływu cieczy w geosyntetyku pod naciskiem gruntu, oraz pod obciążeniem zewnętrznym wywołanym płytą obciążającą. Badania modelowe w skali półtechnicznej stanowiły poparcie właściwej koncepcji projektowej, jako rzeczywiste odzwierciedlenie pracy geosyntetyku w gruncie. Wyniki badań



uzupełniły parametry hydrauliczne geosyntetyku dając podstawę do zatwierdzenia karty aplikacji produktu o zasięgu krajowym.

Ważne jest określenie możliwości współpracy mieszanek popiołowo-żużlowych z geosyntetykami w konstrukcjach budownictwa ziemnego. Temat ten jest aktualny ze względu na wzrastające potrzeby wykonywania obiektów w tej technologii. Badania modelowe nasypów wykonanych w skali póltechnicznej prowadzi się sporadycznie ze względu na ich dużą pracochłonność. Wyniki badań modelowych są najbardziej zbliżone do warunków pracy w rzeczywistych konstrukcjach budownictwa ziemnego. Modele dają możliwość wbudowania dodatkowych elementów, takich jak elementy doszczelniające, drenażowe, oraz zainstalowania urządzeń pomiarowych. Dlatego wyniki przedstawionych badań mogą być podstawą do prognozowania współpracy mieszanek popiołowo-żużlowych z geosyntetykami.

## **8. Podsumowanie**

Przedstawiony autoreferat obejmuje samoocenę mojej aktywności naukowo-badawczej wraz z cyklem publikacji jednotematycznych stanowiących mój wkład w rozwój dyscypliny ochrona i kształtowanie środowiska. W treści autoreferatu przedstawiłem mój rozwój naukowy zarówno przed, jak i po uzyskaniu stopnia doktora nauk rolniczych w zakresie ochrona i kształtowanie środowiska. Główny obszar mojej aktywności naukowej jest zorientowany na zagadnienia związane z zastosowaniem geosyntetyków w budownictwie ziemnym, gdzie głównym materiałem konstrukcyjnym są mieszanki popiołowo-żużłowe. Moja aktywność naukowa i zawodowa jest wieloaspektowa, dotyczy zagadnień budownictwa ziemnego, materiałów geosyntetycznych, metod badawczych, aparatury pomiarowej, a wyniki moich badań mają charakter aplikacyjny i mogą być wykorzystane w praktyce.

## 9. Spis literatury

1. Allen T. M., Bathurst R. J. (1996). Combined allowable strength reduction factor for geosynthetic creep and installation damage. *Geosynthetics International*, 3(3), 407-439.
2. Alvarez I. E., Rubio R., Ricalde H. (2007): Beach Restoration with Geotextile Tubes as Submerged Breakwaters in Yucatan, Mexico. *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 4-5, p. 233-241.
3. Baran P., Cholewa M., Zawisza E., Kulasik K. (2013): Problem jednoznacznego ustalenia parametrów wytrzymałości na ścinanie odpadów powęglowych i poenergetycznych. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection)* 15, s. 2071-2089 (2013).
4. Barrett R. K. (1988). *Geotextiles in Earth Reinforcement*. *Geotechnical Fabrics Report*, Mar/Apr, Vol. 3, No. 2, 15-99.
5. Bera A. K., Chandra S. N., Ghosh A., Ghosh A. (2009): Unconfined Compressive Strength of Fly Ash Reinforced with Jute Geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 5, p. 391-398.
6. Bezuijen A., Vastenburg E.W. (2013). *Geosystems: Design Rules and Applications*, 1 st ed. CRC Press/Balkema.
7. Bolt A., Duszyńska A., Piotrowska M. (2004): Badania laboratoryjne symulujące uszkodzenia mechaniczne geotekstyliów i wyrobów pokrewnych w budowach ziemnych, II Problemowa Konferencja Geotechniki, Białystok – Białowieża, s. 201-210.
8. Borys M. (2007): Określenie parametrów tarcia na styku geosyntetyków i gruntów pod kątem budowy ekranów przeciwpowodziowych w wałach przeciwpowodziowych. III Konferencja Naukowa „Woda-Środowisko- Obszary wiejskie”, IMUZ Falenty, s. 41-42.
9. Brachman R. W. I., Gudina S. (2008): Gravel Contacts and Geomembrane Strains for a GM/CCL Composite Liner. *Geotextiles and Geomembranes*, V 26, 6, p. 448-459.
10. Broda J., Grzybowska-Pietras J., Gawłowski A., Rom M., Przybyło S., Laszczak R. (2017). Application of Wool Geotextiles for the Protection of Steep Slopes. *Procedia Engineering*, Vol. 200, p. 112-119.
11. Bueno B. S., Costanzi M. A., Zornberg J. G. (2005). Conventional and accelerated creep tests on nonwoven needle-punched geotextiles. *Geosynthetics International*, 12(6), 276-287.
12. Campbell D. H., et al. (1985). *Erosion Objective: Storm Water Drainage Channel Needs Erosion Protection*. *Geotechnical Fabrics Report*, 20.
13. Carneiro J.R., Almedia P.J., Lopes M.L. (2014). Some synergisms in the laboratory degradation of a polypropylene geotextile. *Constr. Build. Mater.* 73, p. 596-691.
14. Carneiro J.R., Morais M., Lopes M.L. (2018). Degradation of polypropylene geotextiles with different chemical stabilisations in marine environments. *Construction and Building Materials*, vol. 165, p. 877-886.
15. Chalfen M., Dąbrowska J., Molski T. (2008): Filtracja wody przez nowy i modernizowany wał przeciwpowodziowy Odry w Kozanowie, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, nr 7, s. 31-44.
16. Chalfen M., Molski T. (2007): Wpływ przesłony przeciwpowodziowej na warunki filtracji ziemnych budowli hydrotechnicznych. *XXX ZSMGG, Prace Nauk. Inst. Geo. i Hydro.* 76, seria Konferencje, 42, 2007, s. 131-143.
17. Chen H. T., Hung W. Y., Chang C. C., Chen Y. J., Lee C. J. (2007): Centrifuge Modeling Test of a Geotextile-Reinforced Wall with a Very Wet Clayey Backfill. *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 6, p. 346-359.
18. Chen Z., Gong H, Zhang M., Wu W., Liu Y., Feng J. (2011): Impact of Using High-Density Polyethylene Geomembrane Layer as Landfill Intermediate Cover on Landfill Gas Extraction. *Waste Management*, V 31, 5, p. 1059-1064.
19. Ching-Chuan Huang, Chun-Chang Liao, (2007): Abrasion damage of geogrids induced by turbid flow, *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 2, p. 128-138.
20. Christopher B. R., Holtz R. D. (1984). *Geotextile Engineering Manual*. Report No. FHWA-TS-86/203, STS Consultants Ltd, Northbrook, Ill under contract FHWA No. DTFH61-83-C-00094.
21. *Civil Works Construction Guide Specification*, No. CW 02215 (1986). Plastic Filter Fabric. Department of the Army Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, Washington, DC. Couch F. B., Jr.(1982). *Geotextile Applications to Slope Protection for the Tennessee-Tombigbee Waterway Divide Cut*. Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Nev. Duncan JM, Wright SG (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons inc.
22. DAAF (1995): *Engineering Use of Geotextiles: Technical Manual*. Departments of the Army and the Air Force, Washington [online] dostęp 2011-04-20: <[http://armypubs.army.mil/eng/DR\\_pubs/DR\\_a/pdf/tm5\\_818\\_8.pdf](http://armypubs.army.mil/eng/DR_pubs/DR_a/pdf/tm5_818_8.pdf)>.

23. Das A., Jayashree C., Viswanadham B. V. S. (2009): Effect of Randomly Distributed Geofibers on the Piping Behaviour of Embankments Constructed with Fly Ash as a Fill Material. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 5, p. 341–349.
24. Du Y. J., Shen S. L., Liu S. Y., Hayashi S. (2009): Contaminant Mitigating Performance of Chinese Standard Municipal Solid Waste Landfill Liner Systems. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 3, p. 232–239.
25. Engineering and Design No. 1110-2-286 (1984). Use of Geotextiles Under Riprap. Engineer Technical Letter, Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
26. Fangyue Luo, Ga Zhang, Yang Liu, Changhui Ma (2018). Centrifuge modeling of the geotextile reinforced slope subject to drawdown. *Geotextiles and Geomembranes*. vol. 46, issue 1, p.11-21.
27. Gallagher E.M., Tonks D.M., Shevelan J., Belton A.R., Blackmore R.E. (2016). Investigations of geomembrane integrity within a 25-year old landfill capping. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 44, issue 5, p. 770-780.
28. Gassner F. (2009): Field Observation of GCL Shrinkage at a Site in Melbourne Australia. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 5, p. 406–408.
29. Ghosh A., Dey U. (2009): Bearing Ratio of Reinforced Fly Ash Overlying Soft Soil and Deformation Modulus of Fly Ash. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 4, p. 313–320.
30. Girou J. P. (2008). The Geosynthetics Discipline: Achievements and Challenges, Keynote Lecture, Proc. the First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition, 2-5 March 2008, Cancun, Mexico, 1-3.
31. Giroud J. P. (1982). Filter Criteria for Geotextiles. *Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles*, Vol. I, pp. 103-108.
32. Greenwood J.H., Brady K.C. (1992). Geotextiles in aggressive soils. *Construction and Building Materials*, vol. 6, issue 1, p.15-18.
33. Gruin I. (2003): Materiały polimerowe, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
34. Hara D., Tobisu Y., Tatsuoka F., Hirakawa D. (2007). Effects of compaction on drain strength and deformation of saturated gravelly soil. Proc. 43th National Conference on Geotechnical Engineering, JGS, Hiroshima (in Japanese).
35. Hegde A. (2017). Geocell reinforced foundation beds-past findings, present trends and future prospects: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, vol. 154, p. 658-674.
36. Hirakawa D., Nojiri M., Aizawa H., Nishikiori H., Tatsuoka F., Tateyama M., Watanabe, K. (2007). Effects of the tensile resistance of reinforcement embedded in the backfill on the seismic stability of GRS integral bridge, Proc. of 5th Int. Sym. on Earth Reinforcement (IS Kyushu) (Ochiai et al., eds.), 811817.
37. Hosseininia E.S., Ashjaee A. (2018). Numerical simulation of two-tier geosynthetic-reinforced-soil walls using two-phase approach. *Computers and Geotechnics*, vol. 100, p. 15-29.
38. Hsieh C.W. (2016). 23 - Geotextiles in agriculture and aquaculture. Editor(s): R.M. Koerner,
39. Huang C. C., Liao C. C. (2007): Abrasion Damage of Geogrids Induced by Turbid Flow. *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 2, April, 2007, p. 128–138.
40. Huang C. C., Tzeng Y. S., Liao C. J. (2007): Laboratory Tests for Simulating Abrasion Damage of a Woven Geotextile. *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 4–5, p. 293–301.
41. Huang Y., Sawada K., Moriguchi S., Yashima A., Zhang F. (2006): Numerical Assessment of the Effect of Reinforcement on the Performance of Reinforced Soil Dikes. *Geotextiles and Geomembranes*, V 24, 3, p. 169–174.
42. Instruction for Use of Construction Specification No. 210 (1981). Plastic Filter Cloth. Department of the Army Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, Washington, DC.
43. Jeon H. Y., Kim S. H., Lyoo W. S., Yoo C., Koerner G. R. (2006): Evaluation of the Long-Term Performance of Geosynthetic Reinforcements From Their Reduction Factors. *Polymer Testing*, V 25, 3, p. 289–295.
44. Johnson N.A.G., Wood E.J., Ingham P.E. (2003). Wool as a technical fibre. *Journal of the Textile Institute* 94, p.26-41.
45. Junqueira F. F., Silva A. R. L., Palmeira E. M. (2006): Performance of Drainage Systems Incorporating Geosynthetics and Their Effect on Leachate Properties. *Geotextiles and Geomembranes*, V 24, 5, p. 311–324.
46. Kazimierowicz-Frankowska K. (2007): Influence of Geosynthetic Reinforcement on the Load-Settlement Characteristics of Two-Layer Subgrade. *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 6, p. 366–376.
47. Kazuya Yasuhara, Juan Recio-Molina, (2007): Geosynthetic-wrap around revetments for shore protection, *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 4-5, p. 221-232.
48. Koerner G. R., Koerner R. M. (2006): Long-Term Temperature Monitoring of Geomembranes at Dry and Wet Landfills. *Geotextiles and Geomembranes*, V 24, 1, p. 72–77.

49. Koerner R. M., Bove J. A. (1983). In-Plane Hydraulic Properties of Geotextiles. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 6, No. 4, 190-195.
50. Koerner R. M. (2005): *Designing with Geosynthetics*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.
51. Koffler A., Choura M., Bendriss A., Zengerink E. (2008): Geosynthetics in Protection Against Erosion for River and Coastal Banks and Marine and Hydraulic Construction. *Journal of Coastal Conservation*, V 12, 1, p. 11-17.
52. Kongkitkul W., Hirakawa D., Tatsuoka F., Uchimura T. (2004). Viscous deformation of geosynthetic reinforcement under cyclic loading conditions and its model simulation. *Geosynthetics International*, 11(2), 73-99.
53. Kulma R., Zdechlik R. (2009): *Modelowanie procesów filtracji*, Wydawnictwa AGH, Kraków. (TAK/NIE)
54. Le Hello B., Villard P. (2009): Embankments Reinforced by Piles and Geosynthetics — Numerical and Experimental Studies Dealing with the Transfer of Load on the Soil Embankment. *Engineering Geology* V 106, 1-2, p. 78-91.
55. Lee K. Y., Jeon H. Y. (2008): Evaluation of Clogging Effects on Nonwoven Geotextile Filters by Negative-Ion Treatment. *Fibers and Polymers*, V 9, 3, p. 365-373.
56. Leshchinsky D. (1984). *Geotextile Reinforced Earth, Part I & II*. Research Report Nos. CE 84-44/45, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, Del.
57. Leshchinsky D., Boedeker R. H. (1989). Geosynthetic Reinforced Soil Structures. *Journal of the Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers*, Vol. 115, No. 10, 1459-1478.
58. Liu H., Chu J. (2009): A New Type of Prefabricated Vertical Drain with Improved Properties. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 2, p. 152-155.
59. Lupo J. F., Morrison K. F. (2007): Geosynthetic Design and Construction Approaches in the Mining Industry. *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 2, p. 96-108.
60. Madhavi Latha G., Somwanshi A. (2009): Effect of Reinforcement Form on the Bearing Capacity of Square Footings on Sand. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 6, p. 409-422.
61. Maier C., Calafut T. (1998). *Polypropylene-The Definitive User's Guide and Databook*. Plastics Design Library, New York.
62. McWatters R.S., Rutter A., Rowe R.K. (2016). Geomembrane applications for controlling diffusive migration of petroleum hydrocarbons in cold region environments. *Journal of Environmental Management*, vol. 181, p. 80-94.
63. Oh W. T., Vanapalli S. K. (2010): Influence of Rain Infiltration on the Stability of Compacted Soil Slopes. *Computers and Geotechnics*, V 37, 5, p. 649-657.
64. Palmeira E. M., Pereira J. H. F., da Silva, A. R. L. (1998): Backanalyses of Geosynthetic Reinforced Embankments on Soft Soils. *Geotextiles and Geomembranes*, V 16, 5, p. 273-292.
65. Palmeira, E. M. (2009): Soil-Geosynthetic Interaction: Modelling and Analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 5, p. 368-390.
66. Parastar F., Hejazi S.M., Sheikhzadeh M., Alirezazadeh A. (2017). A parametric study on hydraulic conductivity and self-healing properties of geotextile clay liners used in landfills. *Journal of Environmental Management*, vol. 202, part 1, p.29-37.
67. Pilarczyk K.W. (2000). *Geosynthetics and Geosystems In Hydraulic and Coastal Engineering*, 1 st ed. Balkema A.A.
68. Pitanga H. N., Gourc J. P., Vilar D. M. (2009): Interface Shear Strength of Geosynthetics: Evaluation and Analysis of Inclined Plane Tests. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 6, p. 435-446.
69. Pritchard M., Sarsby R.A., Richard Horrocks A., Subhash Anand (1999). *Handbook of technical textiles*. Textile Institute, Manchester (England).
70. *Proceedings of the First Canadian Symposium on Geotextiles (1980)*. Published by the, 700 EIC Bldg, 2050 Mansfield St., Montreal, Quebec, Canada.
71. Rankilor P. R. (1981). *Membranes in Ground Engineering*. Wiley, Chichester, United Kingdom.
72. Rembeza L. (2007): Nieustalony przepływ filtracyjny przez wał przeciwpowodziowy z uszczelnieniami. *Gosp.Wod.* 9, s.380-382.
73. Richaud E., Farcas F., Divet L., Benneton J. P. (2008): Accelerated Ageing of Polypropylene Geotextiles, the Effect of Temperature, Oxygen Pressure and Aqueous Media on Fibers — Methodological Aspects. *Geotextiles and Geomembranes*, V 26, 1, p. 71-81.
74. Riya Bhowmik, J.T. Shahu, Manoj Datta (2018). Failure analysis of a geomembrane lined reservoir embankment, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 46, issue 1, p. 52-65.
75. Rowe R. K., Sangam H. (2002): Durability of HDPE geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*, V 20, 2, p. 77-95.



76. Rowe R. K., Islam M. Z. (2009): Impact of Landfill Liner Time-Temperature History on the service Life of HDPE Geomembranes. *Waste Management*, V 29, 10, p. 2689–2699.
77. Rowe R. K., Rimal S., Sangam H. (2009): Ageing of HDPE Geomembrane Exposed to Air, Water and Leachate at Different Temperatures. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 2, p. 137–151.
78. Ruhl J.L., Daniel D.E. (1997). Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123 (4), 369-381.
79. Saathoff F., Oumeraci H., Restall S. (2007): Australian and German Experiences on the Use of Geotextile Containers. *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 4–5, p. 251–263.
80. Scott R. A. (2005): *Textiles for Protection*. Woodhead Publishing, Limited, Cambridge.
81. Seida T., Tatsuoka F., Hirakawa D. (2008). Deformation and strengths characteristics of highly compacted Inagi sand by drained plane strain compression test. Proc. 43th National Conference on Geotechnical Engineering, the JGS, Hiroshima [in Japanese].
82. Shukla S.K., Yin J.-H. (2006). *Fundamentals of Geosynthetics Engineering*. Taylor & Francis.
83. Silva Vieira C., Pereira P.M., Lopes M.L. (2016). Recycled Construction and Demolition Wastes as filling material for geosynthetic reinforced structures. Interface properties. *Journal of Cleaner Production*, vol. 124, p. 299-311.
84. Southen J. M., Kerry Rowe R. (2007): Evaluation of the Water Retention Curve for Geosynthetic Clay Liners. *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 1, p. 2–9.
85. Stessel R. I., Hodge J. S. (1995): Chemical Resistance Testing of Geomembrane Liners. *Journal of Hazardous Materials*, V 42, 3, p. 265–287.
86. Strzelecki T., Kostecki S., Żak S. (2008): *Modelowanie przepływów przez ośrodki porowate*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.
87. Suvorova Y. V., Alekseeva S. I. (2010): Experimental and Analytical Methods for Estimating Durability of Geosynthetic Materials. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, V 39, 4, p. 391–395.
88. Szymkiewicz R. (2003): *Metody numeryczne w inżynierii wodnej*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
89. Tatsuoka F. (2008): *Geosynthetics Engineering, Combining Two Engineering Disciplines*. Special Lecture, 4th GeoSynthetics Asia, Shanghai, June 2008.
90. Thuo J.N., Yang K.H., Huang C.C. (2015). Infiltration into unsaturated reinforced slopes with nonwoven geotextile drains sandwiched in sand layers. *Geosynth. Int.* 22 (06), p. 457-474.
91. Tolooiyan A., Abustan, I., Selamat M. R., Ghaffari S. (2009): A Comprehensive Method for Analyzing the Effect of Geotextile Layers on Embankment Stability. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 5, p. 399–405.
92. Vishnudas S., Savenije H.H.G., Anil K.R., Balan K. (2006). The protective and attractive covering of a vegetated embankment using coir geotextiles. *Hydrol. EarthSyst. Sci.* 10, p. 565–574.
93. Weimar R. D., Jr. (1983). Mechanism of the Geotextile Performance in Soil-Fabric Systems for Drainage and Erosion Control. *Transportation Research Record No. 916*, 37-40.
94. Won M. S., Kim Y. S. (2007): Internal Deformation Behavior of Geosynthetic-Reinforced Soil Walls. *Geotextiles and Geomembranes*, V 25, 1, p. 10–22.
95. Wu C. S., Hong Y. S., Wang R. H. (2008): The Influence of Uniaxial Tensile Strain on the Pore Size and Filtration Characteristics of Geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, V 26, 3, p. 250–262.
96. Wu C. S., Hong Y. S., Yan Y. W., Chang B. S. (2006): Soil-Nonwoven Geotextile Filtration Behavior under Contact with Drainage Materials. *Geotextiles and Geomembranes*, V 24, 1, p. 1–10.
97. Yang G., Zhang B., Lv P., Zhou Q. Y. (2009): Behaviour of Geogrid Reinforced Soil Retaining Wall with Concrete-Rigid Facing. *Geotextiles and Geomembranes*, V 27, 5, p. 350–356.
98. Yang K.H., Ng'ang'a Thuo J., Vo Duyen Anh Huynh, Thanh Son Nguyen, Martins Portelinha F.H. (2018). Numerical evaluation of reinforced slopes with various backfill-reinforcement-drainage systems subject to rainfall infiltration. *Computers and Geotechnics*, vol. 96, p. 25-39.
99. Yang Yang, Jianying Yang, Tingning Zhao, Xuewen Huang, Ping Zhao (2016). Ecological restoration of highway slope by covering with straw-mat and seeding with grass-legume mixture. *Ecological Engineering*, vol. 90, p. 68-76.
100. Yoon Y. W., Heo S. B., Kim K. S. (2008): Geotechnical Performance of Waste Tires for Soil Reinforcement From Chamber Tests. *Geotextiles and Geomembranes*, V 26, 1, p. 100–107.
101. Zabielska-Adamska K. (2006): Shear Strength Parameters of Compacted Fly Ash-HDPE Geomembrane Interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, V 24, 2, p. 91–102.
102. Zadroga B., Ołańczuk-Neyman K., (2001): *Ochrona i rekultywacja podłoża gruntowego*, Wydawnictwo PG, Gdańsk.



103. Zimmie T. F., Pamuk A., Adalier K., Mahmud M. B. (2005): Retrofit-Reinforcement of Cohesive Soil Slopes Using High Strength Geotextiles with Drainage Capability. Geotechnical and Geological Engineering, V 23, 4, p. 447–459.

## 10. Spis symboli

- $e$  - wskaźnik porowatości [-]
- $g$  - przyspieszenie ziemskie [ $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]
- $h$  - wysokość piezometryczna [m]
- $l$  - spadek hydrauliczny [-]
- $k$  - współczynnik filtracji [ $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ]
- $n$  - porowatość gruntu [-]
- $Q$  - natężenie filtracji (przepływu) wody [ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ]
- $S$  - współczynnik zasobności [-]
- $S_0$  - współczynnik pojemności sprężystej ośrodka [ $\text{m}^{-1}$ ]
- $S_r$  - stopień wilgotności [-]
- $V$  - prędkość filtracji [ $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ]
- $w$  - wilgotność gruntu [%]
- $x, y, z$  - współrzędne [m]
- $\gamma$  - ciężar objętościowy gruntu [ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\gamma'$  - ciężar objętościowy gruntu pod wodą [ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\gamma_s$  - ciężar objętościowy szkieletu gruntowego [ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\gamma_s$  - ciężar właściwy gruntu [ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\gamma_{sat}$  - ciężar objętościowy gruntu nawodnionego [ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\gamma_w$  - ciężar właściwy wody [ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\rho$  - gęstość objętościowa gruntu [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
- $\rho_s$  - gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
- $\rho_s$  - gęstość właściwa gruntu [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
- $\rho_w$  - gęstość właściwa wody [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
- $Q_0$  - objętość przepływu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $F$  - powierzchnia przekroju koryta [ $\text{m}^2$ ]
- $v$  - średnia prędkość w przekroju [ $\text{m} \cdot \text{s}$ ]
- $V_{cieczy}$  - objętość cieczy w zbiorniku [ $\text{m}^3$ ]
- $T$  - czas napelniania zbiornika [s]
- $\mu$  - współczynnik wydatku [-]
- $F_0$  - powierzchnia otworu w świetle krawędzi [ $\text{m}^2$ ]
- $h_{rw}$  - wzniesienie zwierciadła wody nad otworem w dnie zbiornika [m]
- $b$  - szerokość otworu [m]
- $h_0$  - wzniesienie zwierciadła wody nad dolną krawędzią otworu [m]
- $h_1$  - wzniesienie zwierciadła wody nad górną krawędzią otworu [m]

- $m$  - wielkość zależna od konstrukcji przyrządu,  
 $h_{cis.}$  - różnica ciśnień odczytanych na manometrze  
 $Q_{ciężk.}$  - siła ciężkości  
 $m_{cieczy}$  - masa  
 $\tau$  - naprężenie styczne [kPa]  
 $\varnothing$  - kąt tarcia wewnętrznego [°],  
 $c$  - kohezja (opór spójności) gruntu [kPa].  
 $\mu_0$  - lepkość przy 0°C,  
 $t$  - temperatura w 0°C [°C]  
 $\alpha, b$  - współczynniki różne u różnych cieczy  
 $k_{prop.}$  - współczynnik ściśliwości objętościowej  
 $v_{gr}$  - prędkość graniczna [cm · sek<sup>-1</sup>]  
 $r$  - promień przekroju rury [cm]  
 $\Lambda$  - współczynnik lepkości kinematycznej, zwany współczynnikiem zawiesistości [cm<sup>2</sup> · sek<sup>-1</sup>]  
 $Re$  - liczba Reynoldsa  
 $\xi$  - współczynnik oporu  
 $\frac{v^2}{2g}$  - wysokość energii kinetycznej  
 $R$  - promień hydrauliczny  
 $x, z$  - zmienne przestrzenne,  $(x, z) \in \Omega$ ,  
 $\Omega$  - obszar filtracji,  
 $h_x, h_z$  - pochodne cząstkowe,  
 $k_1, k_2$  - współczynnik filtracji odpowiednio w kierunku osi X i Z:  
 $a_s$  - rzędna spągu [m],  
 $m_w$  - miąższość warstwy przepuszczalnej [m],  
 $W$  - funkcja źródłowa [m].  
 $P_w$  - gęstość wody [kg · m<sup>-3</sup>],  
 $\eta$  - lepkość wody [m<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup>],  
 $n$  - porowatość,  
 $S_v$  - powierzchnia właściwa włókien materiału [m<sup>2</sup> · kg<sup>-1</sup>].  
 $\mu_m$  - masa materiału na jednostkę powierzchni [kg · m<sup>-2</sup>],  
 $\rho_f$  - gęstość pozorna włókien [kg · m<sup>-3</sup>],  
 $b_m$  - grubość materiału [m].

Cholewa Mariusz