

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz  
Katedra Geotechniki  
Instytut Inżynierii Lądowej  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie  
e-mail: [zbigniew\\_lechowicz@sggw.edu.pl](mailto:zbigniew_lechowicz@sggw.edu.pl)

Warszawa, 08.01.2026 r.

*Przyjmuję pod względem  
formalnym 22.01.2026* (187)

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bartosza Bednarza  
pt.

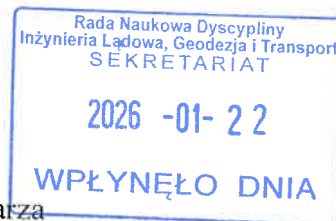
### **„Pełzanie jako kryterium wymiarowania bezciśnieniowych zbiorników podziemnych z polietylenu o dużej gęstości”**

Recenzję opracowałem na zlecenie dr hab. inż. Katarzyny Osińskiej-Skotak, prof. uczelni, Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej (pismo RND.ILGiT.262.11.2025 z dn. 12.11.2025), zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej nr 158/2025 z dn. 04.11.2025 r., na podstawie otrzymanego egzemplarza w/w rozprawy doktorskiej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Agnieszka Dąbska, a promotorem pomocniczym dr inż. Jacek Stasiński.

#### **1. Uwagi ogólne**

W Polsce i na świecie występują nasilające się zjawiska niedoborów wody w okresach suszy oraz nadmiarów wody w okresie nawałnych opadów. Stanowią one współczesne wyzwania gospodarki wodnej w zakresie zapewnienia wody pitnej i użytkowej oraz ochrony przed powodzią. Zjawiska nadmiarów i niedoborów wody są szczególnie dotkliwe na obszarach zindustrializowanych i w aglomeracjach miejskich. Wielkowymiarowe zbiorniki podziemne umożliwiają retencjonowanie i opóźnienie powierzchniowych spływów wód opadowych oraz wykorzystanie zgromadzonych zasobów wodnych w okresach suszy. Poprawne zaprojektowanie konstrukcji zbiornika podziemnego z polietylenu o dużej gęstości, zgodnie z obecnie zalecanym wydłużonym projektowym okresem eksploatacji, wymaga bardziej precyzyjnego uwzględnienia wpływu pełzania materiału zbiornika w warunkach długookresowego obciążenia.

Należy wyrazić uznanie Doktorantowi, że podjął trudną tematykę oceny zachowania się polietylenu o dużej gęstości stanowiącego materiał bezciśnieniowych zbiorników podziemnych w badaniach pełzania przy zginaniu i przy rozciąganiu. Praca doktorska mgr. inż. Bartosza Bednarza rozszerza obszar badań nad właściwościami reologicznymi materiału zbiorników podziemnych oraz obszar prognoz reakcji materiału na obciążenia długookresowego. Uwaga Autora rozprawy doktorskiej skupiła się na doborze odpowiednich metod badawczych umożliwiających ocenę zachowania się materiału zbiorników podziemnych podczas pełzania przy zginaniu i przy rozciąganiu. Badania własne podstawowych właściwości fizycznych i mechanicznych przeprowadzono w laboratorium Wytrzymałości Materiałów Zakładu



Budownictwa Wodnego i Hydrauliki Politechniki Warszawskiej oraz cech materiału na poziomie mikrostruktury w laboratorium Zakładu Projektowania Materiałów w ramach współpracy z Zespołem Kompozytów Polimerowych na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Na podstawie analizy wyników badań Doktorant dokonał oceny dotychczasowych metod prognozy odkształceń reologicznych oraz zaproponował własny trzelementowy model wykładniczy opisu reakcji polietylenu o dużej gęstości na obciążenia długookresowe.

## 2. Treść rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Bartosza Bednarza składa się z ośmiu rozdziałów oraz streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu oznaczeń, słownika pojęć, spisu literatury, spisu rysunków i tabel oraz załączników z zestawieniem wyników analizy statystycznej, kartami badawczymi i zestawieniami wyników pomiarów pełzania polietylenu o dużej gęstości przy zginaniu i przy rozciąganiu. Spis literatury zawiera 178 pozycji literatury, w tym 147 obcojęzycznych, 20 norm i specyfikacji. Całkowita objętość pracy wraz załącznikiem wynosi 274 strony. Praca poza tekstem drukowanym zawiera 22 \*tabele i 95 rysunków.

Tytuł rozprawy doktorskiej jest adekwatny do celu i treści rozprawy stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora. Rozprawa doktorska charakteryzuje się przejrzystym i dobrze skonstruowanym układem rozdziałów. Cytowana literatura pokrywa obszar współczesnych doświadczeń krajowych i zagranicznych w ramach analizowanej tematyki.

*Rozdział 1.* stanowi wstęp, w którym Doktorant zwrócił uwagę na problemy związane z niedoborami wody w okresach suszy oraz licznymi podtopieniami podczas gwałtownych opadów. Retencjonowanie, infiltracja do gruntu i opóźnienie powierzchniowych spływów wód deszczowych poprzez wykorzystanie zbiorników podziemnych często stanowi podstawowe rozwiązanie w obszarach zurbanizowanych. W ramach infrastruktury podziemnej duże znaczenie mają wielkowymiarowe zbiorniki wykonane z polietylenu o dużej gęstości. Poprawne zaprojektowanie i wykonanie zbiorników podziemnych wymaga uwzględnienia specyficznych właściwości mechanicznych polietylenu oraz warunków współpracy konstrukcji z otaczającym gruntem. Wobec odnotowanych ostatnio awarii podziemnych zbiorników retencyjnych, Doktorant podkreślił znaczenie bardziej precyzyjnego projektowania poprzez uwzględnienie zjawiska pełzania materiału w warunkach długookresowego obciążenia.

W przeglądzie literatury (*Rozdział 2.*) Doktorant przedstawił charakterystykę elementów infrastruktury podziemnej, bezciśnieniowych zbiorników podziemnych oraz ich współpracy z podłożem gruntowym. Doktorant zwrócił uwagę na duże znaczenie w gospodarce wodnej wykorzystania zbiorników z tworzyw sztucznych na terenach o zwartej zabudowie. W porównaniu ze zbiornikami wykonanymi ze stali lub żelbetu, zbiorniki z tworzyw sztucznych posiadają liczne zalety – są kilkakrotnie lżejsze, tańsze w produkcji, łatwiejsze w montażu i obróbce, bardziej odporne na czynniki chemiczne i korozję elektrochemiczną.

Jednakże doświadczenia eksploatacyjne wskazują na konieczność zwrócenia większej uwagi przy projektowaniu na specyfikę zachowania się materiału zbiornika przy długookresowych obciążeniach. Doktorant scharakteryzował stosowane w praktyce bezciśnieniowe zbiorniki podziemne wykonane z polietylenu o dużej gęstości, zwracając szczególną uwagę na rozwiązania konstrukcyjne i technologię wykonania. Doktorant zwrócił uwagę na konieczność uwzględnienia w projektowaniu większej podatności na odkształcenia zbiornika z polietylenu o dużej gęstości angażując go w większym stopniu do współpracy z otaczającym gruntem. Doktorant przeanalizował przypadki warunków posadowienia zbiornika podziemnego powyżej i poniżej zwierciadła wody gruntowej. Stany graniczne nośności poniżej zwierciadła wody gruntowej przeanalizował pod kątem możliwości zniszczenia hydraulicznego spowodowanego wyparciem lub erozją wewnętrzną. Doktorant podkreślił kluczowe znaczenie ograniczenia nadmiernych odkształceń gruntu w bezpośrednim sąsiedztwie zbiornika dla zapewnienia bezpiecznej jego współpracy z podłożem gruntowym. Nadmierne odkształcenia gruntu mogą spowodować trwałe przemieszczenie dennicy zbiornika i rozszczelnienie połączeń.

W podsumowaniu Doktorant stwierdził, że zbiorniki podziemne wykonane z polietylenu o dużej gęstości charakteryzują się podatnością na pełzanie i deformacje długookresowe, w istotny sposób wpływającą na współpracę konstrukcji z ośrodkiem gruntowym. Projektowanie i eksploatacja podziemnych zbiorników z polietylenu o dużej gęstości powinno się opierać na kompleksowej analizie stateczności całego układu zbiornik-grunt, wzbogaconej o badania laboratoryjne, modelowe oraz monitoring w rzeczywistych warunkach pracy.

*Rozdział 3.* zawiera przegląd literatury dotyczący właściwości polietylenu. Doktorant przedstawił rodzaje, charakterystyczne parametry i zastosowanie polietylenu zwracając szczególną uwagę na polietylen o dużej gęstości uzyskany w produkcji oraz pochodzący z recyklingu. Doktorant zwrócił uwagę na znaczącą cechę mechaniczną polietylenu o dużej gęstości związaną ze zróżnicowaną reakcją materiału na obciążenie podczas pełzania. Przedstawione przykłady z literatury wskazują na trójfazowe zachowanie się materiału podczas pełzania, którego przebieg zależy od właściwości materiału oraz stanu naprężenia. W procesie pełzania polietylenu o dużej gęstości można wyróżnić dwa przeciwstawne procesy: wzmocnienia lub osłabienia odkształceniowego. W pierwszej fazie pełzania występują natychmiastowe odkształcenia sprężyste, po których następują odkształcenia początkowo o dużej prędkości odkształcenia, która maleje w czasie. Druga faza pełzania charakteryzuje się przyrostem odkształcenia przy stałej lub nieznacznie zwiększającej się prędkości odkształcenia. Trzecia faza pełzania prowadzi do znacznego przyspieszenia wzrostu prędkości odkształcenia i w konsekwencji do zniszczenia materiału. Przedstawione przykłady z literatury wskazują na silną zależność przebiegu pełzania polietylenu o dużej gęstości od temperatury. Doktorant zwrócił uwagę na prezentowane w literaturze pojęcia: relaksacji naprężeń i podatności na pełzanie. W przeglądzie literatury przedstawiono zestawienie i charakterystykę empirycznych zależności do wyznaczania odkształceń materiałów lepkosprężystych przy pełzaniu w czasie. W rozprawie omówiono modele reologiczne Kelvina-Voigta, Maxwella, Burgersa w wersji oryginalnej i zmodyfikowanej. Przedstawiono zależność wykładniczą Samarina, zależności

potęgowe Findleva, Hadida, Nortona-Baileya, modele całkowite Leadermana, Pipkina i Rogersa oraz modele fizyczne Abu Al-Ruby, Drozdova.

W podsumowaniu Doktorant stwierdził, że dostępne w literaturze modele materiałowe wykorzystywane do opisu pełzania polietylenu o dużej gęstości charakteryzują się różnym stopniem złożoności i zakresem zastosowania. Klasyczne modele reologiczne nie pozwalają na opis silnie nieliniowego zachowania się polietylenu o dużej gęstości w całym procesie pełzania. Nieliniowe modele reologiczne znacznie lepiej opisują przebieg pełzania w poszczególnych fazach jednakże stwarzają duże trudności w ich praktycznym zastosowaniu. Na zakończenie Doktorant przedstawił zestawienie opisanych w pracy modeli reologicznych ocenionych pod kątem zakresu stosowności, rodzaju, liczby i czasu wykorzystanych badań. Większość modeli została opracowana na podstawie krótko i długoterminowych badań rozciągania oraz nielicznych krótkoterminowych badań zginania. Ze względu na pracę elementów zbiornika na zginanie Doktorant podkreślił potrzebę uzupełnienia badań w tym zakresie.

W rozdziale 4. Doktorant bardzo jasno przedstawił uzasadnienie wyboru tematu, przedmiot, cel i tezę rozprawy doktorskiej oraz nowość naukową i praktyczną pracy. W uzasadnieniu wyboru tematu Doktorant podkreślił potrzebę zapewnienia bezpiecznej długoterminowej eksploatacji zbiorników podziemnych z polietylenu o dużej gęstości, służących racjonalnemu gospodarowaniu zasobami wodnymi. W tym zakresie zasadnicze znaczenie ma precyzyjne rozpoznanie i sformułowanie wiarygodnego opisu zjawiska pełzania polietylenu o dużej gęstości.

W rozprawie analizowany jest problem długookresowego pełzania polietylenu o dużej gęstości. Badania pełzania przeprowadzono przy trójpunktowym zginaniu i jednoosiowym rozciąganiu. Zakres badań obejmował analizę odkształceń zależnych od czasu, analizę zmian modułu odkształcenia i krzywych izochronowych naprężenie-odkształcenie oraz weryfikację dotychczasowych modeli reologicznych i własne propozycje opisu odkształceń polietylenu o dużej gęstości w procesie pełzania.

Doktorant jako główny cel pracy przyjął wyznaczenie krótkookresowych modułów odkształcenia na podstawie badań laboratoryjnych w zakresie umożliwiającym określenie modułów długookresowych oraz opracowanie modelu konstytutywnego opisującego proces rozwoju zmian geometrycznych elementów konstrukcji przy uwzględnieniu historii obciążenia. W ramach realizacji celu głównego sformułowano problemy badawcze. Dodatkowym celem pracy było opracowanie przydatnego w praktyce modelu materiałowego umożliwiającego wykrywanie zjawiska pełzania w fazie trzeciej na podstawie krótkookresowych badań laboratoryjnych.

Doktorant przyjął tezę, że *„Możliwe jest prognozowanie rozwoju długookresowych odkształceń elementów konstrukcji podziemnych bezciśnieniowych zbiorników retencyjnych wykonanych z polietylenu o dużej gęstości, za pomocą modelu konstytutywnego uwzględniającego pełzanie, w oparciu o wyniki badań krótkookresowych”*.

W podsumowaniu Doktorant pokazał, na czym polega nowość naukową rozprawy doktorskiej oraz praktyczne znaczenia rozwiązanych w pracy problemów badawczych.

*Rozdział 5.* zawiera opis zakresu i metod badań własnych oraz charakterystykę właściwości badanego polietylenu o dużej gęstości. Program badań laboratoryjnych obejmował badania wstępne, główne i uzupełniające. W ramach badań wstępnych wykonano badania niszczące przy rozciąganiu i ściskaniu. Badania wstępne przy rozciąganiu pozwoliły na określenie maksymalnych wartości naprężeń rozciągających oraz krótkoterminowych naprężeń niszczących. Badania wstępne przy ściskaniu przeprowadzono na próbkach o różnych wymiarach. Na podstawie wyników badań wstępnych ustalono zakres naprężeń w badaniach głównych pełzania przy zginaniu i rozciąganiu.

Badania główne obejmowały długookresowe badania trójpunktowego zginania i jednoosiowego rozciągania przy stałym obciążeniu. Badania wykonano na standardowym polietylenie o dużej gęstości (PE) oraz na zmodyfikowanej wersji polietylenu z domieszkami z recyklingu (RPE). Długookresowe badania trójpunktowego zginania przy stałym obciążeniu przeprowadzono na próbkach pryzmatycznych wyciętych ze ścianek profili produkcyjnych o długości 350 mm, szerokości 34,2 – 37,9 mm i grubości 10,4 – 15,5 mm. Badania wykonano przy dwóch rozpiętościach podpór w zakresie wartości naprężenia początkowego od 2,4 do 11,0 MPa. Badania każdej próbki trwały od 51 godzin do ok. 2 lat, średnio ok. 3 miesiące. Trzecią fazę pełzania osiągnęły dwie próbki z materiały RPE. Wyniki pomiarów pozwoliły na wyznaczenie wartości maksymalnego ugięcia  $f(t_{max})$  i obliczenie wartości maksymalnego odkształcenia  $\varepsilon(t_{max})$  (0,008 – 0,106) oraz wartości maksymalnej podatności  $J(t_{max})$  ( $2,69 \cdot 10^{-3}$  –  $9,66 \cdot 10^{-3}$  MPa<sup>-1</sup>). Wyniki pomiarów wskazują, że próbki wykonane z RPE charakteryzują się większą podatnością i większym rozrzutem wartości w porównaniu do próbek z PE w zakresie wartości naprężeń początkowych do 7,0 MPa. Długookresowe badania jednoosiowego rozciągania przy stałym obciążeniu przeprowadzono na próbkach w formie tzw. wiosełek o przekroju prostokątnym wyposażone w główki montażowe, o długości całkowitej 170 mm i długości zwężenia 80 mm. Siły rozciągające wynosiły w zakresie od 117 N do 1150 N wywołując naprężenia początkowe od 1 MPa do 10 MPa. Badania każdej próbki trwały od 26,7 dni do ok. 72 dni. Wartości maksymalnego wydłużenia wynosiły od 0,40 mm do 12,05 mm, a wartości maksymalnego odkształcenia od 0,003 do 0,104, natomiast wartości maksymalnej podatności od  $3,4 \cdot 10^{-3}$  do  $10,45 \cdot 10^{-3}$  MPa<sup>-1</sup>, przy średniej wartości  $5,62 \cdot 10^{-3}$  MPa<sup>-1</sup>. W podsumowaniu Doktorant stwierdził, że analiza wyników badań głównych jednoznacznie wskazuje na silną zależność przebiegu i faz pełzania od wartości naprężenia początkowego.

Badania uzupełniające obejmowały rozpoznanie cech materiałowych na poziomie mikrostruktury oraz badania krótkookresowego ściskania dennic z polietylenu o dużej gęstości przeprowadzone w laboratorium Zakładu Produkcji firmy Uponor Infa Sp. z o.o. W badaniach mikrostruktury wykorzystano skaningową kalorymetrię różnicową DSC, spektroskopię FTIR-ATR oraz skaningową mikroskopię elektronową SEM. Na podstawie badań DSC określono temperatury topnienia i krystalizacji, wartość entalpii topnienia i krystalizacji oraz zawartość fazy krystalicznej. Widma spektroskopii FTIR-ATR jednoznacznie potwierdziły typową dla

polietylenu budowę chemiczną wszystkich badanych próbek, nie wykazując istotnych różnic pomiędzy próbkami PE i RPE. Na podstawie zdjęć uzyskanych metodą SEM w szyjce powstałej podczas rozciągania zaobserwowano ukierunkowaną strukturę z pasmami ułożonymi w kierunku działania siły rozciągającej oraz pojawiające się pustki w miejscach, gdzie wypełnienie fazą amorficzną było niewielkie. Badania krótkookresowe dennice z polietylenu o dużej gęstości przeprowadzono przy osiowym ściskaniu, umieszczając dennice pomiędzy dwiema równoległymi płytami maszyny wytrzymałościowej. Porównanie wyników pomiarów z wynikami analizy numerycznej wskazuje na dobrą zgodność wyników przy wartości siecznego krótkookresowego modułu odkształcenia wynoszącej 400 MPa.

W rozdziale 6. Doktorant przedstawił analizę porównawczą wyników uzyskanych z prognozy na podstawie wybranych z literatury modeli reologicznych z wynikami modelu opracowanego na podstawie własnych badań długookresowych. W celu dopasowania parametrów równania modelu do wyników pomiarów w badaniach pełzania przy zginaniu i rozciąganiu wykorzystano algorytm optymalizacyjny oparty na metodzie ewolucji różnicowej z kryterium najmniejszych kwadratów. Po wstępnej ocenie do analizy wybrano z literatury siedem modeli reologicznych. Wyniki analizy wskazują, że potęgowy model Findleya i potęgowo-wykładniczy model Hadida charakteryzują się najlepszą jakością dopasowania podczas trzech etapów procesu pełzania. Na podstawie przeglądu literatury i własnych doświadczeń Doktorant zaproponował trzyskładnikowy model materiałowy stanowiący hybrydę podejścia fenomenologicznego i reologicznego. Zaproponowany model opisujący przebieg odkształcenia w funkcji czasu stanowi sumę trzech eksponentalnych zależności charakteryzujących trzy etapy pełzania. Jakość dopasowania trzyskładnikowej zależności w przypadku poszczególnych próbek poddanych pełzaniu przy zginaniu jest zadawalająca, na co wskazują wartości współczynnika determinacji  $R^2$  podane w Tabeli 6-2. Mniejsze wartości  $R^2$  uzyskano przy dużych wartościach naprężenia początkowego.

Do opisu zachowania się polietylenu o dużej gęstości na podstawie trzyskładnikowego modelu materiałowego dla każdej fazy pełzania przy zginaniu wykorzystano dwa parametry:  $B$  związany z reakcją materiału na obciążenie i  $T$  związany z prędkością odkształcenia, natomiast dodatkowo dla fazy trzeciej parametr  $n$  jako wykładnik potęgi dotyczącej plastycznej reakcji materiału. Analiza wyników badań pełzania przy zginaniu pozwoliła na wyznaczenie wartości parametrów  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  oraz  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  dla poszczególnych badań. Wyznaczone wartości parametrów wykazują dużą zmienność, z wyjątkiem parametrów  $B_2$  i  $T_3$ , oraz nie mają jednoznacznego odniesienia do właściwości materiałowych. Fakt ten utrudnia wyznaczenie uogólnionych wartości parametrów modelu. Proponowany model materiałowy, poprawnie odwzorowuje jedynie poszczególne wyniki badań, zwłaszcza przy większych naprężeniach, przy których modele z literatury wykazują znacznie mniejszą dokładność.

Na podstawie wyników badań pełzania przy zginaniu wyznaczono długookresowy moduł odkształcenia  $E(t)$ . Analiza wyników wykazała, że moduł odkształcenia  $E$  systematycznie maleje podczas obciążenia, co potwierdza wyraźny wpływ zjawiska pełzania. Początkowe wartości modułu odkształcenia  $E$  wynosiły ok. 600 MPa, natomiast zmniejszyły się do wartości ok. 180-200 MPa, po upływie ok.  $10^4$  godzinach. Dodatkowo na podstawie zaproponowanej

zależności potęgowej wyznaczono prognozowaną wartość modułu  $E$  wynoszącą 155,6 MPa po czasie  $10^6$  godzin (ok. 114 lat) wraz z jego przedziałem ufności (126,4 – 184,7 MPa). W podsumowaniu Doktorat podkreślił, że analiza wyników potwierdza, że struktura materiału wraz z upływem czasu ulega stopniowemu osłabieniu, a w przypadku bardzo długich czasów trwania obciążenia należy zachować szczególną ostrożność przy interpretacji wyników.

Na podstawie wyników badań pełzania przy rozciąganiu w jednoosiowym stanie naprężenia, wyznaczono długookresowy moduł odkształcenia  $E(t)$ . Początkowa średnia wartość modułu odkształcenia  $E$  wynosiły ok. 300 MPa, natomiast zmniejszyły się do wartości ok. 140 MPa, po ok.  $10^3$  godzinach (ok. 42 dni). Prognozowana wartość modułu odkształcenia w okresie ok. 100 lat, wyznaczona metodą normową wynosi 124,7 MPa, przy rozrzucie od 111,8 do 131,9 MPa. Doktorat podkreślił, że moduły odkształcenia z badań pełzania przy rozciąganiu osiągają mniejsze wartości w stosunku do modułów wyznaczonych na podstawie badań pełzania przy zginaniu.

W podsumowaniu Doktorat podkreślił, że w prognozowaniu odkształceń długookresowych  $\varepsilon(t)$  najbardziej efektywne są modele empiryczne Findleya i Hadida w granicach zakresu kalibracji. Natomiast modele wieloelementowe Burgersa i Samarina dają lepszą interpretowalność parametrów oraz większą kontrolę nad składnikami reakcji krótko i długookresowej. Zaproponowany trójskładnikowy model materiałowy łączy trzy mechanizmy odkształcenia. Dzięki temu może on pełnić rolę narzędzia diagnostycznego przy analizie eksperymentalnej, pozwalając na wczesną identyfikację mechanizmów degradacyjnych w próbkach poddanych obciążeniom powyżej wartości krytycznych. Długookresowe zmniejszenie sztywności materiału w procesie pełzania wskazuje na konieczność uwzględnienia tego efektu w projektowaniu konstrukcji eksploatowanych, zgodnie z wydłużonym projektowym okresem eksploatacji (rzędu 50-100 lat).

W rozdziale 7. Doktorant na podstawie własnych badań i rozważań nad zachowaniem się polietylenu o dużej gęstości podczas obciążenia, zaproponował konstytutywny model sprężysto lepko-plastyczny (odkształcenie w funkcji naprężenia i czasu) rozwiązany iteracyjnie, który uwzględnia jednocześnie trzy fazy zachowania się materiału w warunkach obciążeń długookresowych. W proponowanym modelu konstytutywnym odkształcenie składa się z części liniowej, opisanej parametrem sprężystości  $C_0$ , oraz części nieliniowej, której przebieg zależy od parametrów  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $n$ , współczynnika Poissona  $\nu$  oraz naprężenia granicznego  $\sigma_{max}$ . Parametry te mają jednoznaczne uzasadnienie fizyczne lub reologiczne. Parametr  $C_0$  reprezentuje sprężystość początkową czyli natychmiastową reakcję materiału na obciążenie i jest odwrotnością modułu sprężystości  $E$ . Parametr  $C_1$  opisuje asymptotę poziomą w funkcji różnicy pomiędzy naprężeniem rzeczywistym i naprężeniem granicznym. Parametry  $C_2$  i  $n$  kontrolują prędkość i charakter „wygaszania” procesów relaksacji/retardacji. Kluczową rolę odgrywa parametr  $\sigma_{max}$ , który definiuje próg przejścia z fazy stabilnej do fazy przyspieszonego pełzania. Analiza wyników prognozy wykonanej na podstawie zaproponowanego modelu konstytutywnego wskazuje, że jeżeli jako kryterium granicy użytkowalności zbiornika podziemnego, zostanie przyjęta wartość odkształcenia dla okresu 100 lat  $\varepsilon(100 \text{ lat}) \leq 5\%$ , to dla przyjętej granicy odkształcenia ( $\varepsilon \approx 0,0512$ ) naprężenia początkowe w elementach z polietylenu o dużej gęstości nie powinny być większe od 7 MPa,

natomiast dla restrykcyjnej granicy  $\varepsilon \leq 3\%$  wymagany jest poziom  $\sigma_0 \leq 5$  MPa. W praktyce inżynierskiej wyznaczone izochrony odkształcenia  $\varepsilon(t)$  w funkcji naprężenia początkowego  $\sigma_0$  stanowią ważne narzędzie do wyznaczania stanów granicznych nośności i użyteczności, gdyż pozwalają przewidzieć maksymalne długookresowe deformacje elementów z polietylenu o dużej gęstości przy zadanym obciążeniu. Analiza czułości parametrów modelu wykazała, że największy wpływ na błąd dopasowania ma wartość  $\sigma_{max}$ . Parametr  $C_2$  wykazuje umiarkowany wpływ na czułość modelu, natomiast parametry  $C_1$  i  $n$  charakteryzują się minimalnym wpływem.

Dla próbek w kształcie „wiosełka” i belki pryzmatycznej przeprowadzono analizę numeryczną MES zachowania się podczas jednoosiowego pełzania przy rozciąganiu oraz przy zginaniu. Porównanie obliczonych i pomierzonych wartości wydłużeń i odkształceń podczas jednoosiowego pełzania przy rozciąganiu oraz ugięć podczas pełzania przy zginaniu wskazuje na dobrą zgodność, jednakże w strefie dużych naprężeń różnice są bardziej wyraźne. Analiza wyników badań pełzania belek przy trójpunktowym zginaniu wskazuje na istotny wpływ zmniejszenia grubości przekroju na przyspieszenie degradacji materiału podczas pełzania.

W podsumowaniu Doktorat podkreślił, że w celu właściwego odwzorowania pracy konstrukcji kluczowym jest wybór modelu prognozy. Dokładność prognoz opartych na modelach matematycznych w największym stopniu zależy od precyzyjnego wyznaczenia wartości maksymalnego naprężenia  $\sigma_{max}$ , natomiast pozostałe parametry można uznać za drugorzędne. Proponowany model konstytutywny umożliwi ilościową prognozę długotrwałych odkształceń polietylenu o dużej gęstości przy różnych poziomach obciążeń, poprawnie odwzorowując zarówno stabilny, jak i przyspieszony przebieg pełzania.

W rozdziale 8. podano wnioski ogólne i szczegółowe, zalecenia, kierunki dalszych badań oraz podsumowanie rozprawy.

### 3. Ocena pracy

Rozprawa ma charakter doświadczalno-analityczny. Mgr inż. Bartosz Bednarz podjął się zbadania i oceny zachowania się polietylenu o dużej gęstości stanowiącego materiał bezciśnieniowych zbiorników podziemnych w badaniach pełzania przy zginaniu i przy rozciąganiu. Dla zrealizowania założonego celu rozprawy Doktorant wykonał obszerne i bardzo dobrze udokumentowane badania laboratoryjne. Przeprowadzone badania laboratoryjne wymagały wykonania własnych stanowisk badawczych oraz zaangażowania specjalistycznej aparatury badawczej. Wyniki badań zostały opracowane statystycznie oraz porównane z wynikami prognozy na podstawie zaproponowanego przez Doktoranta trójskładnikowego modelu materiałowego w postaci zależności odkształcenie-czas oraz z wynikami analizy numerycznej MES. Bogaty materiał doświadczalny umożliwił Autorowi dokonanie oceny dotychczasowych metod prognozy odkształceń reologicznych oraz zaproponowanie własnego trzelementowego modelu konstytutywnego opisu procesu pełzania w postaci zależności odkształcenie-naprężenie-czas dla polietylenu o dużej gęstości. Analiza wyników badań pozwoliła Doktorantowi na podanie praktycznych zaleceń dotyczących

projektowania, wykonania i eksploatacji zbiorników podziemnych wykonanych z polietylenu o dużej gęstości oraz kierunków dalszych badań.

Za najważniejsze elementy oryginalne, stanowiące własny dorobek naukowy Doktoranta należy uznać:

- Określenie zmiany wartości maksymalnego ugięcia oraz maksymalnej podatności w zależności od naprężenia początkowego w długookresowych badaniach pełzania przy trójpunktowym zginania oraz przy jednoosiowym rozciągania w warunkach stałego obciążenia.
- Określenie zależności modułu odkształcenia od czasu badania próbki przy różnych naprężeniach początkowych w procesie pełzania przy zginaniu i przy rozciąganiu.
- Wykazanie, że moduły odkształcenia wyznaczone metodą normową przy rozciąganiu są istotnie mniejsze od modułów odkształcenia określonych przy zginaniu w całym zakresie czasu trwania obciążenia.
- Wykazanie, że wyniki badań próbek z polietylenu z domieszkami z recyklingu (RPE) nie różniły się istotnie od wyników badań materiału pierwotnego (PE) w badanym zakresie obciążeń i czasów.
- Wykazanie, że dokładność prognozy przebiegu pełzania polietylenu o dużej gęstości w największym stopniu zależy od precyzyjnego wyznaczenia maksymalnej wartości naprężenia  $\sigma_{max}$ .
- Opracowanie trójskładnikowego modelu materiałowego w postaci zależności odkształcenie-czas pozwalającego na wczesną identyfikację mechanizmów degradacyjnych w próbkach poddanych obciążeniom powyżej wartości krytycznych.
- Opracowanie własnego trzelementowego modelu konstytutywnego opisu procesu pełzania w postaci zależności odkształcenie-naprężenie-czas dla polietylenu o dużej gęstości.

Należy podkreślić, że założony przez Doktoranta naukowy cel i zakres pracy został osiągnięty, a przyjęta teza udowodniona. Przedstawione w pracy wnioski końcowe są w pełni udokumentowane i stanowią własny i oryginalny wkład Doktoranta w poznanie i ocenę zachowania się polietylenu o dużej gęstości stanowiącego materiał bezciśnieniowych zbiorników podziemnych w badaniach pełzania przy zginaniu i przy rozciąganiu.

#### **4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

Analiza rozprawy doktorskiej nasunęła mi następujące uwagi krytyczne i dyskusyjne, które powinny być wyjaśnione lub skomentowane podczas publicznej obrony pracy:

- Które etapy realizacji i eksploatacji zbiorników podziemnych wykonanych z polietylenu o dużej gęstości wymagają szczególnej uwagi ze względu na ich bezpieczeństwo?

- W badaniach krótkookresowego ściskania dennic z polietylenu o dużej gęstości oraz w analizie numerycznej MES zastosowano schemat obciążenia polegający na osiowym ściskaniu dennicy pomiędzy dwiema równoległymi, sztywnymi płytami. Jaki schemat obciążenia bardziej odpowiada warunkom in situ?
- Badane próbki z polietylenu z domieszkami z recyklingu (RPE) nie wykazały istotnych różnic w stosunku do materiału pierwotnego (PE). Co może spowodować, że różnice będą większe?
- Schemat oddziaływań gruntu i wody na zbiornik podziemny z polietylenu o dużej gęstości przedstawiony na Rys. 2-8 wymaga dodatkowych wyjaśnień.
- Dlaczego w tekście i Tabeli 3-3 modele reologiczne Kelvina-Voigta oraz Burgersa wykazano jako liniowe?
- Na Rys. 5-17 przedstawiono maksymalne wartości podatności  $J(t_{max})$  przy zginaniu w funkcji naprężenia początkowego  $\sigma_0$ . Czy określono oddzielnie zależność dla PE i RPE oraz różnych rozstawów? Jaki był maksymalny błąd względny max RE?
- Na Rys. 5-19 przedstawiono maksymalne wartości podatności  $J(t_{max})$  przy zginaniu w funkcji grubości próbki. Czy określono oddzielnie zależność dla PE i RPE oraz różnych rozstawów? Jaki był maksymalny błąd względny max RE?
- Z czego wynika różnica pomiędzy przebiegiem maksymalnych wartości podatności  $J(t_{max})$  w funkcji naprężenia początkowego  $\sigma_0$ , a przebiegiem maksymalnych wartości odkształcenia  $\varepsilon(t_{max})$  w funkcji naprężenia początkowego  $\sigma_0$  próbek poddanych pełzaniu przy rozciąganiu? (Rys. 5.30 i Rys. 5-31)
- Z czego wynika brak początkowych punktów pomiarowych na Rys. 6-1, Rys. 6-2 i Rys. 6-3?
- Opisy zamieszczone w Tabeli 7-2 wymagają dodatkowego komentarza.

Pragnę podkreślić, że powyższe uwagi krytyczne nie pomniejszają przedstawionych w recenzji własnych i oryginalnych osiągnięć Doktoranta.

Drobne poprawki w tekście, tabelkach i na rysunkach zostały zaznaczone w recenzowanym egzemplarzu, zestawione w zamieszczonej tabeli oraz przekazane Doktorantowi, umożliwiając dokonanie niezbędnych korekt przed przekazaniem części pracy do druku.

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Mgr inż. Bartosz Bednarz przedłożył do oceny rozprawę doktorską opracowaną na podstawie nowoczesnych, bardzo dobrze zaprogramowanych i obszernych badań laboratoryjnych służących ocenie zachowania się polietylenu o dużej gęstości stanowiącego materiał bezciśnieniowych zbiorników podziemnych w badaniach pełzania przy zginaniu i przy rozciąganiu. Podczas realizacji rozprawy doktorskiej Doktorant zdobył specjalistyczną wiedzę teoretyczną oraz posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Recenzowana rozprawa doktorska wniosła oryginalne elementy poznawcze w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport” wskazane w ocenie rozprawy, zatem spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim, określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 r. poz.1571). Zawarte w pracy sformułowania i rozwiązanie problemu badawczego potwierdzają, że Doktorant sprostał wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wniosuję, zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bartosza Bednarza pt. „Pełzanie jako kryterium wymiarowania bezciśnieniowych zbiorników podziemnych z polietylenu o dużej gęstości” do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz

## Uwagi redakcyjne

do rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Bednarza  
pt.

### „Pełzanie jako kryterium wymiarowania bezciśnieniowych zbiorników podziemnych z polietylenu o dużej gęstości”

| Strona            | Jest                                                                                                                                   | Powinno być                                                                                                                       |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| w całej pracy     | odpowiedź                                                                                                                              | reakcja                                                                                                                           |
| w całej pracy     | umocnienie                                                                                                                             | wzmocnienie                                                                                                                       |
| w całej pracy     | szybkość                                                                                                                               | prędkość                                                                                                                          |
| w całej pracy     | testy                                                                                                                                  | badania                                                                                                                           |
| w całej pracy     | Metodyka                                                                                                                               | Metoda                                                                                                                            |
| w całej pracy     | wyliczone                                                                                                                              | obliczone                                                                                                                         |
| w całej pracy     | redukcja                                                                                                                               | zmniejszenie                                                                                                                      |
| str. 6            | forecasting                                                                                                                            | prediction                                                                                                                        |
| Oznaczenia        | $a_T$                                                                                                                                  | $a_T(T)$                                                                                                                          |
| Oznaczenia        | $B_1, B_2, B_3$ – stałe modelu (skalujące odpowiedź materiału na obciążenie)<br>(scaling model constants for material response)<br>[–] | $B_1, B_2, B_3$ – stałe modelu (skalujące reakcję materiału na obciążenie)<br>(scaling model constants for material response) [–] |
| Oznaczenia        | $E_0$ moduł początkowy ( <i>initial modulus</i> ) [MPa]                                                                                | $E_0$ początkowy moduł odkształcenia ( <i>initial modulus of deformation</i> ) [MPa]                                              |
| Oznaczenia        | $G_p$ – współczynnik umocnienia odkształceniowego (strain hardening coefficient) [MPa]                                                 | $G_p$ – współczynnik wzmocnienia odkształceniowego (strain hardening coefficient) [MPa]                                           |
| Oznaczenia        | $Q$ – energia aktywacji procesu kontrolującego szybkość pełzania (activation energy of the creep-controlling process) [J/mol]          | $Q$ – energia aktywacji procesu kontrolującego prędkość pełzania (activation energy of the creep-controlling process) [J/mol]     |
| Pojęcia           | średni błąd kwadratowy pierwiastkowy                                                                                                   | pierwiastek ze średniego błędu kwadratowego                                                                                       |
| Pojęcia           | umocnienie odkształceniowe                                                                                                             | wzmocnienie odkształceniowe                                                                                                       |
| str. 14           | Root Mean Square Error                                                                                                                 | Root Mean Squared Error                                                                                                           |
| str. 43 (3.1)     | Brak oznaczeń symboli w tekście lub pod równaniem                                                                                      |                                                                                                                                   |
| str. 43           | ...trzy stadia pełzania...                                                                                                             | ...trzy etapy (fazy) pełzania...                                                                                                  |
| str. 45 (3.2)     | Brak oznaczeń symboli w tekście lub pod równaniem                                                                                      |                                                                                                                                   |
| str. 46 (3.4)     | Brak oznaczeń symboli w tekście lub pod równaniem                                                                                      |                                                                                                                                   |
| str. 47 (3.5)     | Brak oznaczeń symboli w tekście lub pod równaniem                                                                                      |                                                                                                                                   |
| str. 50 Rys. 3-10 | Brak opisu osi Y                                                                                                                       |                                                                                                                                   |

|                    |                                                                                                 |                                                                                           |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| str. 92            | ...wykorzystując dedykowane oprogramowanie...                                                   | ...wykorzystując właściwe oprogramowanie...                                               |
| str. 109           | W Tabeli 5-9...                                                                                 | W Tabeli 5-9...                                                                           |
| str. 135           | ...odkształceń przewidywalnych modelem...                                                       | odkształceń prognozowanych na podstawie modelu...                                         |
| str. 148 Fig. 6-9  | Strain modulus                                                                                  | Deformation modulus                                                                       |
| str. 150 Fig. 6-10 | Strain modulus                                                                                  | Deformation modulus                                                                       |
| str. 173           | ...w zakresie setnych części milimetra w wydłużeniu oraz tysięcznych części mm w odkształceniu. | w zakresie setnych części milimetra w wydłużeniu oraz tysięcznych części w odkształceniu. |
| str. 188           | ...wskazuje na bardzo dobre przyleganie do odkształceń wyznaczonych z modelu...                 | ...wskazuje na bardzo dobre przyleganie do odkształceń wyznaczonych z modelu...           |
| Zał. 2             | $[mm^4]$                                                                                        | $[mm^4]$                                                                                  |
| Zał. 3             | Rys. 5.27, Rys. 5.28 i Rys.5.29 ????                                                            |                                                                                           |

*Handwritten signature*

