

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA

INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I TRANSPORT

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Bartosz Bednarz

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

Promotor

dr hab. inż. Agnieszka Dąbska

Promotor pomocniczy

dr inż. Jacek Stasierski

WARSZAWA 2025

Podziękowania

*Niniejsza praca powstała dzięki wsparciu i zaangażowaniu wielu osób,
którym pragnę wyrazić serdeczne podziękowania.*

*Wyrazy szczególnej wdzięczności
kieruję do promotora, **Pani dr hab. inż. Agnieszki Dąbskiej**,
za nieocenione wsparcie oraz cenne wskazówki na każdym etapie realizacji pracy.*

*Dziękuję promotorowi pomocniczemu, **Panu dr inż. Jackowi Stasierskiemu**,
za inspirację, cierpliwość, merytoryczną pomoc oraz przekazaną wiedzę.*

*Dziękuję również mojej **żonie Anicie** oraz **Rodzicom**
za ich wyrozumiałość i wsparcie w trudnych momentach pracy nad rozprawą,
a także **bratu Kamilowi** za pomoc przy budowie stanowisk badawczych.*

Streszczenie

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

Rozprawa podejmuje problem współpracy podziemnych, bezciśnieniowych zbiorników wykonanych z polietylenu o dużej gęstości HDPE z ośrodkiem gruntowym, ze szczególnym uwzględnieniem prognozy ich zachowania w długim okresie eksploatacji. W rozdziale 2 scharakteryzowano zbiorniki, ich konstrukcję i uwarunkowania współpracy z gruntem. Rozdział 3 zawiera przegląd właściwości mechanicznych i reologicznych HDPE oraz najważniejszych modeli pełzania stosowanych do opisu deformacji polimerów. W rozdziale 4 sformułowano główną tezę i pytania badawcze, które wyznaczyły kierunek i zakres prowadzonych badań i analiz. Rozdział 5 przedstawia metodykę badań w zakresie przygotowania próbek, przeprowadzenia testów zginania trójpunktowego i jednoosiowego rozciągania oraz użytych technik pomiarowych. W rozdziale 6 przeprowadzono analizę porównawczą modeli materiałowych pod kątem opisu pełzania HDPE w warunkach eksploatacji zbiorników oraz zaprezentowano model opracowany na podstawie badań własnych, wraz z oceną jego ważności i dokładności z wykorzystaniem metod statystycznych. Rozdział 7 prezentuje proponowany model konstytutywny, procedurę doboru parametrów na podstawie badań własnych oraz analizę numeryczną próbek rozciąganych i belek zginanych opartą na zaproponowanym modelu, z odniesieniem do wyników badań własnych pełzania HDPE. Rozdział 8 zawiera podsumowanie, wnioski oraz zalecenia projektowe uwzględniające wpływ długookresowych odkształceń od pełzania HDPE na etapie projektowania i oceny trwałości eksploatowanych obiektów.

Efektem pracy jest proponowany model konstytutywny do prognozowania długookresowych odkształceń zbiorników retencyjnych z HDPE, zweryfikowany badaniami laboratoryjnymi i analizami numerycznymi, oraz zestaw praktycznych zaleceń projektowych dotyczących trwałości tych konstrukcji w przewidywanym okresie użytkowania.

Słowa kluczowe: HDPE, pełzanie, współpraca z ośrodkiem gruntowym, model materiałowy, model konstytutywny, bezciśnieniowy zbiornik podziemny

Abstract

Creep as a design criterion for underground non-pressure high-density polyethylene tanks

The dissertation addresses the interaction between underground, non-pressure tanks made of high-density polyethylene (HDPE) and the soil medium, with particular emphasis on forecasting their long-term service behavior. Chapter 2 characterizes the tanks, their design, and the conditions of soil-structure interaction. Chapter 3 reviews the mechanical and rheological properties of HDPE and the principal creep models used to describe polymer deformation. Chapter 4 formulates the main these and research questions that have defined the direction and scope of the research and analyses. Chapter 5 presents the research methodology in the field of specimen preparation, three-point bending tests, uniaxial tension tests, and the measurement techniques used. In Chapter 6, a comparative analysis of material models is carried out in terms of their suitability for describing HDPE creep under tank service conditions, and a model developed on the basis of the author's own tests is presented, together with an assessment of its validity and accuracy using statistical methods. Chapter 7 presents the proposed constitutive model, the parameter calibration procedure based on the author's tests, and a numerical analysis of tensile specimens and bending beams built on this model, with reference to the HDPE creep test results. Chapter 8 contains a summary, conclusions, and design recommendations that account for long-term deformations due to HDPE creep at the design stage and in the durability assessment of in-service structures.

The outcome of the work is a proposed constitutive model for forecasting the long-term deformations of HDPE retention tanks, validated through laboratory tests and numerical analyses, along with a set of practical design recommendations concerning the durability of these structures over the intended service life.

Keywords: HDPE, creep, soil-structure interaction, material model, constitutive model, non-pressure underground tank

Spis treści

SPIS OZNACZEŃ	10
SŁOWNIK POJĘĆ	13
1. WSTĘP	17
2. ELEMENTY INFRASTRUKTURY PODZIEMNEJ Z TWORZYW SZTUCZNYCH..	19
2.1. CHARAKTERYSTYKA ELEMENTÓW INFRASTRUKTURY PODZIEMNEJ	19
2.2. BEZCIŚNIENIOWE ZBIORNIKI PODZIEMNE.....	21
2.3. WSPÓŁPRACA BEZCIŚNIENIOWYCH ZBIORNIKÓW PODZIEMNYCH Z OŚRODKIEM GRUNTOWYM.....	24
2.4. PODSUMOWANIE.....	32
3. WŁAŚCIWOŚCI POLIETYLENU HDPE	33
3.1. WPROWADZENIE.....	33
3.2. STRUKTURA HDPE I JEGO ZACHOWANIE POD OBCIĄŻENIEM	37
3.3. DUŻE ODKSZTAŁCENIA POLIMERÓW	40
3.4. ZJAWISKO PEŁZANIA HDPE	42
3.5. MODELE PEŁZANIA HDPE.....	51
3.5.1. <i>Wprowadzenie</i>	51
3.5.2. <i>Modele liniowe</i>	55
3.5.3. <i>Modele wykładnicze</i>	56
3.5.4. <i>Modele potęgowe</i>	57
3.5.5. <i>Modele całkowite</i>	60
3.5.6. <i>Modele fizyczne</i>	61
3.5.7. <i>Inne doświadczenia w badaniach pełzania tworzyw sztucznych</i>	65
3.6. PODSUMOWANIE.....	67
4. CEL, TEZA ORAZ NOWOŚĆ NAUKOWA PRACY	70
4.1. UZASADNIENIE WYBORU TEMATU.....	70
4.2. PRZEDMIOT, CEL I TEZA PRACY	70
4.3. NOWOŚĆ NAUKOWA I PRAKTYCZNA.....	72
5. BADANIA LABORATORYJNE	73
5.1. WPROWADZENIE.....	73

5.2.	PROGRAM BADAŃ.....	73
5.3.	BADANIA WSTĘPNE.....	75
5.3.1.	<i>Badania rozciągania – próby niszczące</i>	75
5.3.2.	<i>Badania rozciągania – pełzanie przy wymuszonym przemieszczeniu</i>	77
5.3.3.	<i>Badania ściskania</i>	82
5.3.4.	<i>Podsumowanie</i>	84
5.4.	BADANIA GŁÓWNE	85
5.4.1.	<i>Wprowadzenie</i>	85
5.4.2.	<i>Badania pełzania HDPE przy zginaniu trójpunktowym</i>	86
5.4.3.	<i>Badania pełzania HDPE przy rozciąganiu</i>	104
5.4.4.	<i>Podsumowanie</i>	115
5.5.	BADANIA UZUPEŁNIAJĄCE.....	117
5.5.1.	<i>Badania mikrostruktury materiału</i>	117
5.5.2.	<i>Badanie krótkookresowe ściskania dennic HDPE</i>	126
6.	DŁUGOOKRESOWE ODKSZTAŁCENIA HDPE W ŚWIETLE MODELI LITERATUROWYCH I BADAŃ WŁASNYCH.....	134
6.1.	WPROWADZENIE.....	134
6.2.	ZESTAWIENIE WYNIKÓW ANALIZY PORÓWNAWCZEJ WYBRANYCH MODELI LITERATUROWYCH.....	134
6.3.	PROPONOWANY MODEL MATERIAŁOWY	140
6.4.	DŁUGOOKRESOWY MODUŁ ODKSZTAŁCENIA	147
6.4.1.	<i>Długookresowy moduł odkształcenia z badań pełzania przy zginaniu</i>	147
6.4.2.	<i>Długookresowy moduł odkształcenia z badań pełzania przy rozciąganiu</i> .	149
6.4.3.	<i>Porównanie długookresowych modułów odkształcenia</i>	150
6.5.	PODSUMOWANIE.....	151
7.	MODEL KONSTITUTYWNY DO OPISU HDPE W ODNIESIENIU DO ODPOWIEDZI MATERIAŁU NA OBCIĄŻENIA DŁUGOOKRESOWE.....	153
7.1.	WPROWADZENIE.....	153
7.2.	PROPONOWANY MODEL KONSTITUTYWNY	153
7.3.	ANALIZA PARAMETRÓW MODELU KONSTITUTYWNEGO	164
7.4.	ANALIZA NUMERYCZNA	169
7.5.	ZJAWISKO ZMIANY GRADIENTU NAPRĘŻEŃ	180
7.6.	PODSUMOWANIE.....	182

8.	WNIOSKI I PODSUMOWANIE KOŃCOWE	185
8.1.	WNIOSKI OGÓLNE.....	185
8.2.	WNIOSKI SZCZEGÓŁOWE	187
8.3.	ZALECENIA.....	189
8.4.	KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ	190
8.5.	PODSUMOWANIE.....	191
	BIBLIOGRAFIA.....	193
	SPIS RYSUNKÓW	207
	SPIS TABEL	215

Załączniki

ZAŁĄCZNIK 1 – Zestawienie wyników analizy statystycznej

ZAŁĄCZNIK 2 – Karty badawcze z pomiarów pełzania HDPE przy zginaniu

ZAŁĄCZNIK 3 – Zestawienie wyników pomiarów pełzania HDPE przy zginaniu

ZAŁĄCZNIK 4 – Karty badawcze z pomiarów pełzania HDPE przy rozciąganiu

ZAŁĄCZNIK 5 – Zestawienie wyników pomiarów pełzania HDPE przy rozciąganiu

Spis oznaczeń

a_T	– równanie Arrheniusa (<i>Arrhenius equation</i>) [–]
a_1, b_1, c_1	– współczynniki wielomianu (<i>polynomial coefficients</i>) [–]
A	– pole przekroju (<i>cross-sectional area</i>) [mm ²]
A_1, A_2	– stałe modelu potęgowego (<i>power law coefficients</i>) [–]
b	– szerokość próbki (<i>sample width</i>) [mm]
B_1, B_2, B_3	– stałe modelu (skalujące odpowiedź materiału na obciążenie) (<i>scaling model constants for material response</i>) [–]
C, C_1, C_2	– stałe modelu konstytutywnego (<i>constitutive model constants</i>) [–]
DN	– średnica nominalna (<i>nominal diameter</i>) [mm]
E	– moduł odkształcenia (<i>modulus of deformation</i>) [MPa]
E_0	– moduł początkowy (<i>initial modulus</i>) [MPa]
f	– ugięcie (<i>deflection</i>) [mm]
f_{obl}	– ugięcie obliczone (<i>calculated deflection</i>) [mm]
f_p	– ugięcie pomierzone (<i>measured deflection</i>) [mm]
F	– siła (<i>force</i>) [N]
F_m	– maksymalna siła (<i>maximum force</i>) [N]
G	– moduł relaksacji (<i>relaxation modulus</i>) [MPa ⁻¹]
Gp	– współczynnik umocnienia odkształceniowego (<i>strain hardening coefficient</i>) [MPa]
h	– grubość próbki (<i>sample thickness</i>) [mm]
I	– moment bezwładności (<i>moment of inertia</i>) [mm ⁴]
J	– podatność na pełzanie (<i>creep compliance</i>) [MPa ⁻¹]
k	– współczynnik korekcyjny bazy pomiarowej (<i>gauge length corection coefficient</i>) [–]
l	– rozstaw podpór (<i>support span</i>) [mm]
l_0	– długość bazy pomiarowej próbki (<i>sample gauge length</i>) [mm]
L_0	– długość bazy pomiarowej czujnika (<i>sensor gauge length</i>) [mm]
n	– wykładnik potęgowy (<i>power law exponent</i>) [–]
N	– liczność próbek (<i>amount of samples</i>) [–]
R	– stała Boltzmanna (<i>Boltzmann constant</i>) [J/K]
R^2	– współczynnik determinacji (<i>coefficient of determination</i>) [–]

SD_i	– odchylenie standardowe i -tego parametru (<i>standard deviation for i-parameter</i>) [–, MPa, mm]
SN	– klasa sztywności obwodowej (<i>ring stiffness class</i>) [kN/m ²]
t	– czas (<i>time</i>) [s, min, h, d]
t_{max}	– czas maksymalny badania (<i>maximum testing time</i>) [h]
t_0	– czas początkowy (<i>initial time</i>) [s]
T	– temperatura (<i>temperature</i>) [°C, K]
T_c	– temperatura krystalizacji (<i>cristalisation temperature</i>) [°C]
T_m	– temperatura topnienia (<i>melting temperature</i>) [°C]
T_1, T_2, T_3	– stałe modelu (skalujące prędkość procesu rozwoju deformacji) (<i>model constants scaling the deformation evolution rate</i>) [1/s]
Q	– energia aktywacji procesu kontrolującego szybkość pełzania (<i>activation energy of the creep-controlling process</i>) [J/mol]
U_i	– niepewność pomiarowa i -tego parametru (<i>measurement uncertainty for i parameter</i>) [–]
X_c	– zawartość fazy krystalicznej (<i>degree of crystallinity</i>) [%]
y	– oś układu współrzędnych (<i>axis of the coordinate system</i>) [–]
α_T	– współczynnik rozszerzalności termicznej (<i>coefficient of thermal expansion</i>) [1/K]
Δ	– wyróżnik funkcji wielomianu drugiego stopnia (<i>discriminant of quadratic polynomial</i>) [–]
ΔH_c	– entalpia krystalizacji próbki (<i>crystallization enthalpy of the sample</i>) [J/g, J/mol]
ΔH_m	– entalpia topnienia próbki (<i>melting enthalpy of the sample</i>) [J/g, J/mol]
ΔH_t	– entalpia topnienia dla wzorca całkowicie krystalicznego (<i>melting enthalpy of a fully crystalline reference</i>) [J/g, J/mol]
ΔL	– wydłużenie (<i>elongation</i>) [mm]
ΔL_{obl}	– wydłużenie obliczone (<i>calculated elongation</i>) [mm]
ΔL_p	– wydłużenie pomierzone (<i>measured elongation</i>) [mm]
$\nabla \sigma$	– gradient naprężenia (<i>stress gradient</i>) [MPa/mm]
ε	– odkształcenie (<i>strain</i>) [–]
ε_{c1}	– odkształcenie I stadium pełzania (<i>primary creep strain</i>) [–]
ε_{c2}	– odkształcenie II stadium pełzania (<i>secondary creep strain</i>) [–]

ε_{c3}	– odkształcenie III stadium pełzania (<i>tertiary creep strain</i>) [–]
ε_e	– odkształcenie sprężyste (<i>elastic strain</i>) [–]
ε_{ksp}	– odkształcenie komponentu sprężysto-plastycznego (<i>strain of the elastic-plastic component</i>) [–]
ε_{kswp}	– odkształcenie komponentu sprężysto-wysoko plastycznego (<i>strain of the elastic-highly plastic component</i>) [–]
$\varepsilon_{kws p}$	– odkształcenie komponentu wysoko sprężysto-plastycznego (<i>strain of the highly elastic-plastic component</i>) [–]
ε_L	– odkształcenie długookresowe (<i>long-term strain</i>) [–]
ε_m	– odkształcenie wyznaczone z modelu (<i>model strain</i>) [–]
ε_{obl}	– odkształcenie obliczone (<i>calculated strain</i>) [–]
ε_p	– odkształcenie pomierzone (<i>measured strain</i>) [–]
ε_r	– odkształcenie rezydualne (<i>residual strain</i>) [–]
$\dot{\varepsilon}_{cr}$	– prędkość pełzania (<i>creep strain rate</i>) [–]
ε_0	– odkształcenie początkowe (<i>initial strain</i>) [–]
η	– lepkość (<i>viscosity</i>) [Pa·s]
λ_1	– czas relaksacji (<i>relaxation time</i>) [s, min, h]
λ_2	– czas retardacji (opóźnienia) (<i>retardation time</i>) [s, min, h],
ν	– współczynnik Poissona (<i>Poisson's ratio</i>) [–]
ρ	– gęstość (<i>density</i>) [kg/m ³]
σ	– naprężenie normalne (<i>normal stress</i>) [MPa]
σ_0	– naprężenie początkowe (nominalne) (<i>initial / nominal stress</i>) [MPa]
∂	– pochodna cząstkowa (<i>partial derivative</i>) [–]
σ_{max}	– naprężenie maksymalne (<i>maximum stress</i>) [MPa]
σ_y	– granica plastyczności (<i>yield strength</i>) [MPa]
σ_{vM}	– naprężenie zredukowane (von Misesa) (<i>von Mises equivalent stress</i>) [MPa]
v_f	– prędkość fali podłużnej (<i>longitudinal wave velocity</i>) [m/s]

Uwaga: Objaśnienia do wzorów w rozdziale 3 nie zostały uwzględnione w spisie oznaczeń, a zostały podane w miejscu ich pierwszego wystąpienia, ze względu na zachowanie oryginalnej postaci cytowanych wzorów i brak spójności stosowanych w nich oznaczeń z oznaczeniami stosowanymi kompleksowo w pracy.

Symbole **pogrubione** oznaczają tensory drugiego rzędu.

Słownik pojęć

<i>czas relaksacji</i>	– charakterystyczny czas reakcji materiału lepkosprężystego na zmianę odkształcenia
<i>czas retardacji</i>	– charakterystyczny czas reakcji materiału lepkosprężystego na zmianę naprężenia, nazywany również czasem opóźnienia
<i>DSC</i>	– skaningowa kalorymetria różnicowa (<i>Differential Scanning Calorimetry</i>) to metoda pomiaru różnicy strumienia ciepła między próbką a odniesieniem, umożliwiającą identyfikację przemian fazowych i efektów energetycznych
<i>faza amorficzna</i>	– nieuporządkowany przestrzennie stan polimeru / metalu o niskiej gęstości i lepkosprężystej odpowiedzi materiału na obciążenie oraz wysoką podatnością na relaksację i pełzanie.
<i>faza krystaliczna</i>	– uporządkowany przestrzennie stan polimeru/metalu o dużej gęstości i sztywności oraz niskiej podatności na relaksację i pełzanie
<i>formulacja mieszana u-p</i>	– metoda, w której przemieszczenia (u) i ciśnienie (p) są traktowane jako niezależne zmienne w analizie prawie nieściśliwych materiałów hiperelastycznych
<i>krystaliczność</i>	– udział fazy krystalicznej w strukturze polimeru, wyrażony w procentach
<i>imperfekcje materiałowe</i>	– wady materiału wynikające z procesu produkcyjnego, mogące wpływać na parametry materiału
<i>izochrona odkształcenia</i>	– krzywa łącząca punkty o tym samym czasie obciążenia w danej stałej chwili czasowej, pokazująca zależność odkształcenia do naprężenia początkowego
<i>krzywa podatności</i>	– funkcja definiująca zależność odkształcenia od czasu przy stałym naprężeniu oznaczana jako $J(t)$
<i>mer</i>	– stale powtarzający się fragment cząsteczki polimeru
<i>MES</i>	– metoda elementów skończonych (<i>Finite Element Method</i>)
<i>MFI</i>	– wskaźnik prędkości płynięcia
<i>mezodomena</i>	– obszar w materiale o określonej energii aktywacji zerwania wiązań tymczasowych
<i>model fenomenologiczny</i>	– matematyczny opis makroskopowego zjawiska oparty na danych doświadczalnych, bez odwołania do mechanizmów mikroskopowych
<i>model konstytutywny</i>	– szczególny model materiałowy, opisujący właściwości materiału, wyrażający zależność między naprężeniem (siłą) a odkształceniem (zmianą kształtu) materiału
<i>model lepkosprężysty</i>	– model konstytutywny opisujący jednocześnie sprężyste i lepkie właściwości materiału, używany do opisu materiałów, których właściwości zależą od czasu

<i>model materiałowy</i>	– model matematyczny opisujący właściwości materiału, np. termiczne, chemiczne czy magnetyczne
<i>model plastyczny</i>	– model konstytutywny opisujący zachowanie materiału, który ulega trwałemu odkształceniu, po przekroczeniu naprężeń odpowiadających granicy plastyczności
<i>model sprężysty</i>	– model konstytutywny opisujący liniową zależność naprężenie-odkształcenie w materiale, który nie ulega trwałemu odkształceniu
<i>moduł odkształcenia</i>	– stosunek naprężenia do odkształcenia
<i>moduł sprężystości</i>	– stosunek naprężenia do odkształcenia w zakresie sprężystym
<i>naprężenie hydrostatyczne</i>	– izotropowy składnik tensora naprężeń, odpowiadający za zmianę objętości materiału bez deformacji jego kształtu, często również jako naprężenie średnie (średnia arytmetyczna z trzech naprężeń głównych)
<i>nieafiniczność</i>	– możliwość poślizgu węzłów względem pozycji odniesienia
<i>odkształcenie długookresowe</i>	– graniczna wartość odkształcenia w warunkach obciążenia przy stałym naprężeniu początkowym
<i>osłabienie materiału</i>	– proces termodynamiczny powodujący zmniejszenie naprężeń własnych w materiale
<i>owalizacja</i>	– deformacja kształtu elementu, zazwyczaj okrągłego, na kształt owalny
<i>PE</i>	– polietylen oraz oznaczenie próbki badawczej z polietylenu (produkt <i>Weholite</i>)
<i>pełzanie</i>	– powolny, zależny od czasu wzrost odkształcenia materiału pod stałym obciążeniem
<i>pełzanie pierwotne, wtórne, trzeciego rzędu</i>	– kolejne stadia pełzania, różniące się prędkością przyrostu odkształcenia
<i>podatność na pełzanie</i>	– odkształcenie pełzające przypadające na jednostkę naprężenia
<i>prędkość pełzania</i>	– pochodna odkształcenia pełzania po czasie przy zadanym stanie naprężenia i temperatury
<i>próbka-świadek</i>	– próbka referencyjna przygotowana razem z badanymi próbkami i traktowana identycznie, służąca do weryfikacji procesu lub do późniejszych badań kontrolnych
<i>przesklepienie gruntu</i>	– zjawisko powstawania łuków nośnych w gruncie otaczającym zbiornik
<i>relaksacja naprężeń</i>	– spadek naprężenia w materiale utrzymywanym w stałym odkształceniu
<i>RMSE</i>	– średni błąd kwadratowy pierwiastkowy (<i>Root Mean Square Error</i>), miara jakości dopasowania modelu, obliczana jako pierwiastek ze średniej kwadratów różnic między wartościami obserwowanymi a prognozowanymi

<i>RPE</i>	– oznaczenie próbki badawczej z polietylenu recyklowanego (produkt <i>Weholite PLUS</i>)
<i>SEM</i>	– skaningowa mikroskopia elektronowa (<i>Scanning Electron Microscopy</i>) to technika mikroskopowa wykorzystująca wiązkę elektronów do obrazowania powierzchni próbek z dużą rozdzielczością i głębią ostrości
<i>solver</i>	– algorytm numeryczny rozwiązujący układ równań powstałych w wyniku dyskretyzacji modelu, wyznaczający wartości nieznanych wielkości (np. przemieszczeń, naprężeń, temperatur)
<i> tłumienie numeryczne</i>	– niefizyczna utrata energii w rozwiązaniu numerycznym, wynikająca z dyskretyzacji i algorytmu całkowania w celu stabilizacji i filtracji szumów modalnych
<i>umocnienie odkształceniowe</i>	– wzrost wytrzymałości materiału wskutek odkształcenia plastycznego
<i>współczynnik determinacji</i>	– odsetek zmienności zmiennej objaśnianej wyjaśniony za pomocą modelu regresji
<i>ZWG</i>	– zwierciadło wody gruntowej

1. Wstęp

W Polsce i na świecie coraz częściej obserwuje się problemy związane z gospodarką wodną, przejawiające się zwłaszcza przez niedobory wody w okresach suszy oraz liczne podtopienia powodowane gwałtownymi opadami deszczu. Te nasilające się zjawiska są przede wszystkim efektem zmian klimatycznych oraz intensyfikacji procesów industrializacji i urbanizacji, szczególnie na obszarach miejskich i w aglomeracjach (Booth i in., 2016). Jak wskazuje Janucha-Szostak i in. (Januchta-Szostak i in., 2024) w swojej pracy dotyczącej współczesnych praktyk urbanistycznych, powszechne stosowanie nieprzepuszczalnych nawierzchni, (takich jak drogi, chodniki i utwardzone parkingi czy place) szczególnie w terenach miejskich, prowadzi do wypierania naturalnych, przepuszczalnych powierzchni zielonych. Proces ten skutkuje znacznym ograniczeniem infiltracji wód opadowych na terenach zurbanizowanych. Przykładem zmian stosunków wodnych w aglomeracjach miejskich, jest miasto Kraków, w którym przez okres trzech lat (2015-2018) jedynie w centrum miasta ubyło ok. 6 % terenów zielonych (Nowicka i Rutkowska, 2021).

W ostatnich latach coraz częściej notuje się opady deszczu o charakterze nawalnym, które stwarzają realne zagrożenie dla ochrony przeciwpowodziowej i skutecznego odprowadzenia wód opadowych na terenach aglomeracji miejskich (Kam i in., 2021; Skonieczna i in., 2021). Według raportów (*The Human Cost of Disasters...*, 2020) oraz (*The Report of the Midterm...*, 2023) w latach 2015 – 2021 powodzie odpowiadały za ponad 30 % globalnych strat gospodarczych spowodowanych klęskami żywiołowymi, a straty gospodarcze z powodu powodzi wyniosły od 75 do 125 mld USD rocznie. Tylko w roku 2024 – ogłoszonym jako najgorętszy w historii pomiarów temperatury – wszystkie katastrofy związane z wodą przyniosły ponad 550 mld USD strat (Carrington, 2025). Równocześnie, oprócz zjawisk powodziowych i podtopień, problemem stają się również długotrwałe susze, z którymi związane są coraz częstsze braki wody pitnej i użytkowej. Zmusza to instytucje odpowiedzialne za gospodarowanie wodami do zwiększania objętości retencyjnej na okresy niskich poziomów wody gruntowej w zlewniach (Mioduszeński, 2012; *The Hydrological Situation in Poland...*, 2025). W tym kontekście coraz większego znaczenia nabierają poszukiwania nowych rozwiązań technicznych, łagodzących negatywne skutki wspomnianych zagrożeń i pozwalających na racjonalne gospodarowanie wodami opadowymi.

Retencjonowanie, infiltracja do gruntu i opóźnianie powierzchniowych spływów wód deszczowych może być realizowane poprzez różne podejścia systemowe. W analizie ekonomicznych aspektów retencji, tradycyjna infrastruktura szara (m. in. kanalizacja, zbiorniki

podziemne, tunele) często stanowi podstawowe rozwiązanie w obszarach zurbanizowanych (Dąbrowski i Pawłowska-Salach, 2023). Jednocześnie, w kontekście zrównoważonego zarządzania wodami opadowymi, coraz większą rolę odgrywają rozwiązania oparte na infrastrukturze zielonej (parki, mokradła, zbiorniki naturalne), czy też hybrydowej infrastrukturze zielono-błękitnej (O'Donnell i Thorne, 2020). Ten ostatni typ, który obejmuje takie rozwiązania jak zielone dachy, czy ściany z możliwością retencji (np. roślinne), łączy w sobie korzyści ekologiczne z efektywnością hydrauliczną, co jest nadzwyczaj istotne w warunkach ograniczonej przestrzeni miejskiej.

W ramach szarej infrastruktury podziemnej duże znaczenie mają wielkogabarytowe zbiorniki wykonane z polietylenu o dużej gęstości (HDPE), pozwalające na gromadzenie nadmiaru wód opadowych. Jak pokazują przykłady z praktyki inżynierskiej, o ich skuteczności i trwałości głównie decyduje prawidłowe zaprojektowanie i wykonanie konstrukcji, uwzględniające specyficzne właściwości mechaniczne polietylenu oraz warunki współpracy z otaczającym gruntem. Problem zyskuje na znaczeniu w świetle coraz częściej odnotowywanych awarii podziemnych zbiorników retencyjnych – od deformacji geometrycznych przez pęknięcia ścianek po całkowitą utratę stateczności konstrukcji (*Responsibility...*, 2024; *Warning...*, 2024). Przyczyny wystąpienia większości tych awarii wynikają głównie z niedostatecznego uwzględnienia w projektowaniu zjawiska pełzania materiału w warunkach długookresowego obciążenia.

2. Elementy infrastruktury podziemnej z tworzyw sztucznych

2.1. Charakterystyka elementów infrastruktury podziemnej

Elementy infrastruktury podziemnej z tworzyw sztucznych obejmują szeroki zakres konstrukcji, wśród których kluczowe i newralgiczne dla bezpiecznej eksploatacji systemów podziemnych to: rurociągi kanalizacyjne i wodociągowe – stanowiące największy udział w infrastrukturze podziemnej, zbiorniki retencyjne i bezodpływowe – o rosnącym znaczeniu w gospodarce wodnej, studzienki i komory inspekcyjne, separatory i oczyszczalnie oraz systemy drenażowe.

Rurociągi stanowią szczególnie poważny problem w praktyce inżynierskiej ze względu na ich liniowy charakter, trudności w dostępie oraz konsekwencje awarii. Główne problemy eksploatacyjne obejmują przede wszystkim utratę szczelności, czy wymywanie gruntu otaczającego rurociąg, skutkujące degradacją terenu oraz innej infrastruktury sąsiadującej (Baranowski i in., 2015; *PE Pipe*, 2006).

Zbiorniki retencyjne i bezodpływowe z tworzyw sztucznych zyskują na znaczeniu w gospodarce wodnej, szczególnie w miejscach o zwartej i gęstej zabudowie, gdzie możliwości zastosowania zbiorników otwartych są ograniczone (Pandit, 2022; Wysokowski, 2010). W zależności od przeznaczenia mogą służyć do magazynowania wód opadowych, ścieków, substancji chemicznych, oleistych i ropopochodnych, a także materiałów sypkich. W porównaniu do zbiorników podziemnych wykonanych z materiałów tradycyjnych (stali czy betonu) zbiorniki z tworzyw sztucznych oferują szereg korzyści – począwszy od mniejszych kosztów produkcji, poprzez łatwość w obróbce i montażu, aż po odporność na czynniki chemiczne i korozję elektrochemiczną. Dodatkowym atutem jest ciężar co najmniej dwukrotnie mniejszy niż w przypadku zbiorników betonowych i prawie ośmiokrotnie mniejszy od ciężaru zbiorników ze stali (Baranowski i in., 2015; *PE Pipe*, 2006; PN-EN ISO 10456, 2009; Tariq i in., 2012).

Studzienki i komory inspekcyjne pełnią funkcje łączące i kontrolne w systemach podziemnych. Wykonane z tworzyw sztucznych, charakteryzują się odpornością na korozję oraz łatwością montażu i łączenia elementów, co przekłada się na uproszczenie prac instalacyjnych i eksploatacyjnych (Kwacz i Zadrosz, 2007).

Separatory i oczyszczalnie, będące integralną częścią infrastruktury wodno-ściekowej, służą do oczyszczania ścieków oraz separacji substancji takich jak piasek, tłuszcz czy olej.

Tworzywa sztuczne zapewniają odporność na agresywne środowisko ścieków, co wyklucza użycie tradycyjnych materiałów (Baranowski i in., 2015).

Systemy drenażowe, odprowadzające wody opadowe, również coraz częściej wykonywane są z tworzyw sztucznych. Ich niewielki ciężar własny ułatwia transport i montaż, a odporność na korozję i czynniki chemiczne zapewnia długotrwałą eksploatację (Baranowski i in., 2015; *PE Pipe*, 2006).

Tworzywa sztuczne wykorzystywane są również w infrastrukturze podziemnej w postaci kombinacji tradycyjnych materiałów i kompozytów, np. beton w połączeniu z panelami GRP (*Glass Reinforcement Plastic*) w wielkośrednicowych magistralach kanalizacji deszczowej (*Największy Kolektor...*, 2023; *Warszawa: Kolektor Burakowski...*, 2022; Raya i Gupta, 2023), czy beton z HDPE (*Warszawa: Kolektor Wiślany...*, 2022).

Podsumowując, konstrukcje podziemne z tworzyw sztucznych zyskują coraz większą popularność w inżynierii środowiska, wypierając tradycyjne materiały, takie jak stal czy beton. Ich rosnące zastosowanie wynika z licznych zalet, jednak doświadczenia eksploatacyjne wskazują także na specyficzne wyzwania eksploatacyjne, które mogą prowadzić do poważnych negatywnych konsekwencji dla otaczającej infrastruktury. Ze względu na przedmiot pracy, w dalszej części rozdziału 2 przedstawiono dokładną charakterystykę tylko bezciśnieniowych zbiorników podziemnych i omówiono ich współpracę z gruntem.

2.2. Bezciśnieniowe zbiorniki podziemne

Od wielu lat systematycznie rośnie liczba producentów i dostawców oferujących m.in. zbiorniki podziemne z HDPE (Rys. 2-1), którzy coraz skuteczniej opracowują własne technologie i rozwiązania konstrukcyjne, poszerzając zakres zastosowania swoich produktów.



Rys. 2-1 Zbiornik z HDPE DN2400 przed montażem na terenie inwestycji (fot. Dąbska A.)

Fig. 2-1 DN2400 HDPE tank before installation at the construction site (photo Dąbska A.)

Tworzywa sztuczne, ze względu na swoje właściwości oferują bardzo szerokie możliwości w zakresie precyzyjnego kształtowania konstrukcji wytwarzanych z nich półproduktów oraz łączenia elementów. Możliwość ta wykorzystywana jest powszechnie przy wytwarzaniu tzw. elementów strukturalnych, począwszy od rurociągów, poprzez studzienki, aż po zbiorniki nad- i podziemne. Przykładem tego są dwupłaszczyznowe bezciśnieniowe zbiorniki poziome z HDPE, składające się z pewnych typowych komponentów. Podstawowym elementem zbiornika jest rura korpusowa o odpowiednio ustalonej długości i średnicy (w zależności od specyficznych wymagań użytkowych), zamknięta odpowiednio ukształtowanymi szczelnymi pokrywami, tzw. dennicami. Dennice mogą różnić się rodzajem

zamocowania w korpusie formą, strukturą, uzbrojeniem itp. (Rys. 2-2) i (Rys. 2-3). Prócz rurociągów i zbiorników, dodatkowymi elementami systemu mogą być studnie włączowe o minimalnej średnicy 1000 mm oraz króćce przyłączeniowe i połączeniowe (Rys. 2-1).



a)

b)

Rys. 2-2 Zbiornik HDPE z dennicą: a) sferyczną (EELIX - Horizontal Tanks, 2024),
b) płaską (Amargo - Zbiorniki podziemne, 2024)

Fig. 2-2 HDPE tank with end cap: a) spherical (EELIX - Horizontal Tanks, 2024), b) flat (Amargo - Zbiorniki podziemne, 2024)



a)



b)

Rys. 2-3 Zbiornik HDPE z dennicą: a) sferyczną wzmacnianą wspornikami (Amargo – Zbiorniki podziemne, 2024), b) płaską usztywnianą tzw. żebrami (KAI – Underground Tank, 2024)

Fig. 2-3 HDPE tank with end cap: a) spherical reinforced with supports (Amargo – Zbiorniki podziemne, 2024),
b) flat stiffened with so-called ribs (KAI – Underground Tank, 2024)

Zbiorniki mogą być łączone w tzw. baterie kilku zbiorników ułożonych obok siebie i połączonych hydraulicznie w różny sposób, zależnie od dostępności terenu, za pomocą odpowiednio ukształtowanych i usytuowanych odcinków rur (Rys. 2-4). Takie połączenie umożliwia uzyskanie całkowitej pojemności systemu do kilku tysięcy metrów sześciennych.



a)



b)

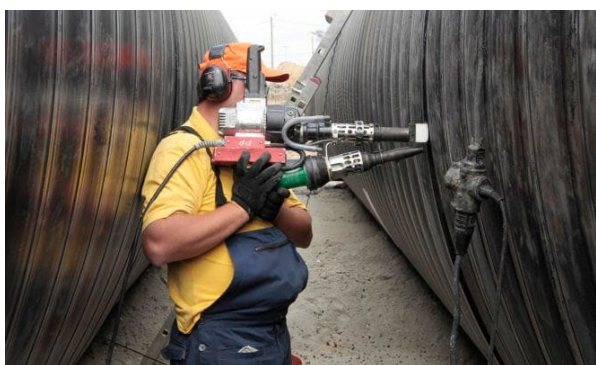
Rys. 2-4 Ustawienie zbiorników dwupłaszczowych strukturalnych w tzw. baterie:

a) schemat (Europlast – zbiorniki strukturalne trzywarstwowe, 2024),

b) realizacja montażu zbiorników w terenie (Uponor Infra..., 2019)

Fig. 2-4 Arrangement of double-walled structural tanks in a so-called battery: a) scheme (Europlast – zbiorniki strukturalne trzywarstwowe, 2024), b) implementation of tank installation on site (Uponor Infra..., 2019)

Obecnie dostępne są dobrze opracowane technologicznie metody łączenia materiału HDPE. Najczęściej stosowanymi metodami są: zgrzewanie doczołowe, zgrzewanie elektrooporowe i zgrzewanie ekstruzyjne (Z. Wang i in., 2024). Kontrolę spawów można prowadzić za pomocą różnych technik inwazyjnych (Niou i in., 2018), jak i bezinwazyjnych, takich jak radiografia, ultradźwięki, czy mikrofałe (Li i in., 2023; Pan i in., 2013). Elementy konstrukcyjne zbiorników łączone są ze sobą metodą spawania ekstruzyjnego, za pomocą ekstruderów ręcznych lub automatycznych. Przykłady użycia odpowiednich urządzeń do spawania ilustruje Rys. 2-5.



a)



b)

Rys. 2-5 Spawanie ekstruzyjne elementów zbiorników z HDPE: a) ręczne, b) automatyczne (System Weholite..., 2021)

Fig. 2-5 Extrusion welding of HDPE tank components: a) manual, b) automatic (System Weholite..., 2021)

W przypadku zbiorników podziemnych zjawisko pełzania HDPE może prowadzić do nadmiernych deformacji konstrukcji, wpływających niekorzystnie na obiekty znajdujące się w ich bezpośrednim sąsiedztwie, jak również na stan powierzchni terenu, takich jak nawierzchnia drogowa, place, czy parkingi. Może również prowadzić do utraty szczelności połączeń w konstrukcji HDPE, posiadających znacznie ograniczoną zdolność pracy w warunkach dużych odkształceń, np. połączeń kielichowych lub złączy wykonanych z innych materiałów. Winno zostać zatem należycie uwzględnione na etapie projektowania.

2.3. Współpraca bezciśnieniowych zbiorników podziemnych z ośrodkiem gruntowym

HDPE, dzięki swojej podatności na odkształcenia, większej niż tradycyjne materiały budowlane, charakteryzujący się większą zdolnością do przenoszenia znacznych odkształceń niż większość materiałów tradycyjnych wykazuje się lepszą zdolnością do współpracy z ośrodkiem gruntowym. W znacznie większym stopniu angażuje wytrzymałość gruntu i nośność otaczającego ośrodka gruntowego do przenoszenia obciążeń, zarówno stałych jak i zmiennych – w tym dynamicznych. Wykorzystanie tych cech bez ryzyka negatywnego oddziaływania na stan otoczenia – zarówno ośrodek gruntowy, jak i obiekty sąsiednie – wymaga jednak zapewnienia efektywnej współpracy z gruntem przez zastosowania właściwie dobranych rozwiązań konstrukcyjnych (Madryas i in., 2002; Ni, 2016; Sandford, 2000). Powstaje wiele wytycznych dotyczących doboru rozwiązań projektowych (Kałuża i in., 2023), ale nie uwzględniają one kompleksowo wszystkich aspektów związanych z długookresowym odkształcaniem się materiału w wieloletnim okresie eksploatacji.

Metodyka projektowania zbiorników podziemnych wymaga ustalenia szeregu zasad niezbędnych do określenia bezpiecznych warunków projektowych, przede wszystkim w zakresie obciążeń, deformacji gruntów w obrębie zasypki, deformacji konstrukcji zbiorników oraz powiązanego z nimi pola naprężeń, które gwarantowałyby utrzymanie na dopuszczalnym poziomie składowej plastycznej odkształcenia materiału, mogącej rozwinąć się w okresie eksploatacji zbiornika (Rangrej i Kodwani, 2024).

Konstrukcje wykonane z polietylenu są znacznie bardziej podatne na odkształcenia niż stosowane w identycznych warunkach konstrukcje wykonane z materiałów tradycyjnych, takich jak żelbet czy stal (Moser i Folkman, 2008). W konsekwencji projektowanie tego rodzaju konstrukcji wymaga zastosowania analizy uwzględniającej duże odkształcenia (wyjaśnione w rozdziale 3.3), ponieważ zmiany geometryczne zbiorników mogą w istotnym stopniu wpływać zarówno na ośrodek gruntowy, jak i siły wewnętrzne w płaszczu zbiornika.

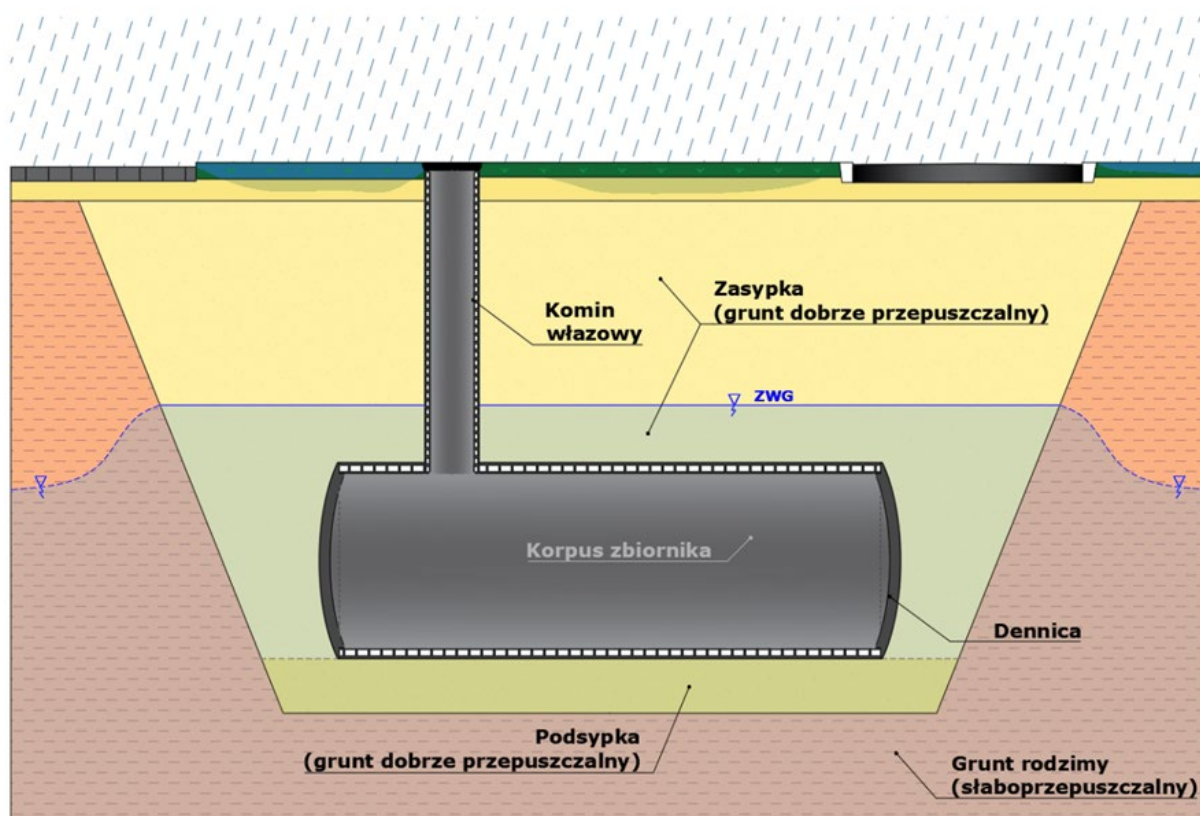
Od rozmieszczenia zbiorników, ich wymiarów i nominalnej sztywności będą zależały odkształcenia gruntu, a w konsekwencji również oddziaływanie gruntu na powierzchnię zbiornika. Konstrukcja zbiornika może w mniejszym lub większym stopniu wykorzystywać zdolność gruntu do powstawania przesklepień obejmujących obszar o większej podatności, zależnie od zdolności otaczającego gruntu do przejmowania ewentualnej nadwyżki obciążeń (El Naggar, 2021; Sandford, 2000). Z drugiej strony, znaczne deformacje ośrodka gruntowego w sąsiedztwie zbiornika mogą prowadzić do stopniowego obniżenia wytrzymałości gruntu, będącego następstwem jego stopniowego rozluźnienia, a w przypadku gruntów niespoistych nawodnionych prowadzić również do wzrostu zagrożenia zjawiskiem statycznego lub względnie dynamicznego upłynnienia (załamania szkieletu gruntowego i utraty nośności gruntu) i w konsekwencji nagłego, zwykle znacznego przeciążenia konstrukcji (Chian i Madabhushi, 2012).

W przeciwieństwie do polietylenu, który jest materiałem sztucznym, wytwarzanym w procesie technologicznym precyzyjnie kontrolowanym na każdym jego etapie, grunty, jako materiały naturalne, mogą wykazywać znaczną zmienność właściwości, nawet w przypadku zaklasyfikowania ich do tych samych kategorii, rodzajów oraz stanów. Wartości parametrów wytrzymałościowych czy odkształceniowych gruntu mogą charakteryzować się wyraźną zmiennością, nawet w tym samym złożu lub partii materiału (Elkateb i in., 2003; Gwóźdź, 2007). Współpraca gruntu z podatną konstrukcją zbiornika kształtowana jest również przez warunki wbudowania zasypek wykopu (Rys. 2-6), np. przygotowanie materiału przeznaczonego do wbudowania, metody układania i zagęszczania zasypki itp. (Pisarczyk, 2005). Dlatego jednym z czynników, który należy uwzględnić przy projektowaniu, jest odpowiedni dobór zasypki z gruntów niespoistych (np. piasków). W przypadku instalacji na terenach, gdzie występują grunty słaboprzepuszczalne (np. gliny czy iły), niewłaściwie dobrana zasypka, przy intensywnych opadach, może skutkować podniesieniem zwierciadła wody w miejscu wykopu (Rys. 2-7). W konsekwencji może dojść do gwałtownego wzrostu parcia hydrostatycznego, działającego na korpus i dennicę zbiornika w sytuacji deszczów nawalnych, gdy zbiornik nie zdąży się jeszcze napełnić i wystąpienia znaczącej różnicy obciążeń na dennicę oraz korpus w stosunku do obciążeń założonych w projekcie.



*Rys. 2-6 Zbiornik dwupłaszczowy z dennicą płaską podczas montażu w wykopie
(Wobet-Hydret Zbiorniki bezodpływowe, 2016)*

Fig. 2-6 Double-walled tank with flat end cap during installation in excavation (Wobet-Hydret Zbiorniki bezodpływowe, 2016)

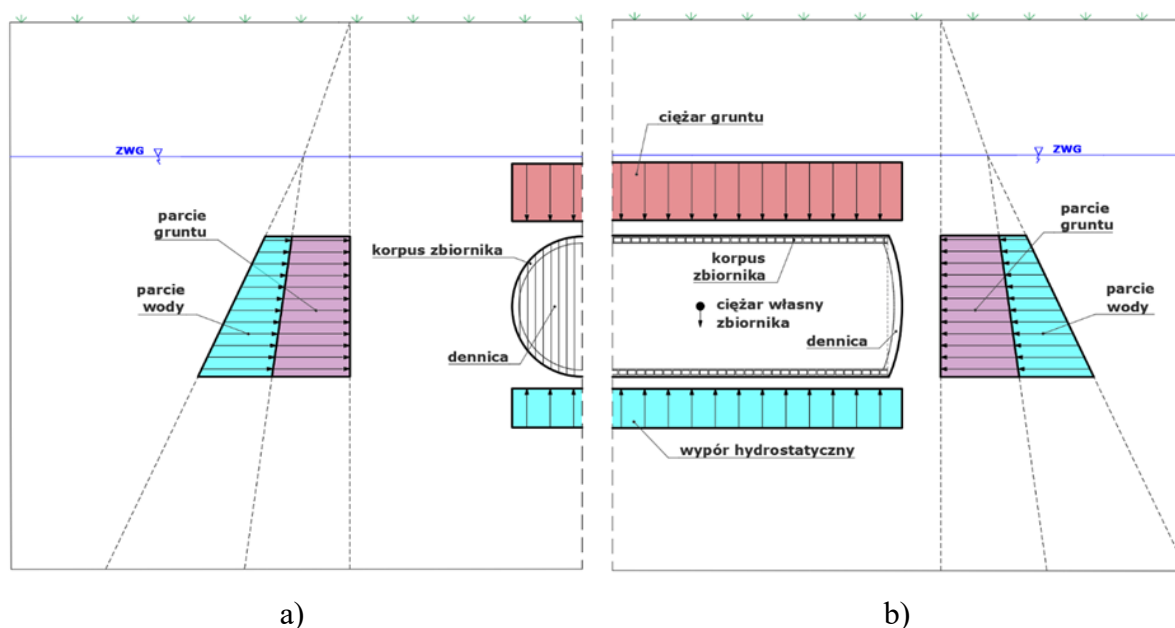


Rys. 2-7 Schemat usytuowania zbiornika w terenie o rodzimym gruncie słaboprzepuszczalnym podczas intensywnych opadów atmosferycznych (opracowanie własne)

Fig. 2-7 Scheme of tank location in the field on natural low-permeability soil during heavy rainfall events (own study)

Praktycznie użyteczne metody doboru zbiorników, przynajmniej w typowych przypadkach (przeznaczenie, warunki instalacji) powinny umożliwiać wykorzystanie podstawowych, powszechnie dostępnych i sprawdzonych modeli materiałów i wartości parametrów materiałowych przy jednoczesnym zapewnieniu bezpiecznej eksploatacji niezależnie od niepewności określenia wartości parametrów, charakterystycznych dla materiałów naturalnych. Konieczne jest, również aby projektowanie i analiza konstrukcji były w niezbędnym zakresie wspierane i weryfikowane przez monitoring, w tym obserwacje pracy obiektów rzeczywistych, a także badania modelowe i laboratoryjne (Babuska i Oden, 2004; Grodecki i in., 2005).

Oddziaływania pomiędzy podłożem gruntowym i obiektem budowlanym kształtowane są przede wszystkim przez warunki wodno-gruntowe. Złożoność tych oddziaływań ujawnia się w sposób szczególnie jaskrawy w przypadku lekkich, podatnych budowli podziemnych (Dąbska i Gołębiowska, 2019; Dąbska i Pisarczyk, 2025). Przy analizie interakcji między gruntem zasypki a powierzchnią zbiornika należy uwzględnić różne składowe oddziaływania (Rys. 2-8). Pierwszą z nich jest pionowe obciążenie wynikające z ciężaru warstwy gruntu znajdującej się nad osią zbiornika, aż do powierzchni terenu. Kolejną składową jest pionowy odpór podłoża, skierowany ku górze i działający na dolną część korpusu zbiornika, poniżej jego osi (Chian i Madabhushi, 2012). Następnie należy uwzględnić poziome parcie gruntu na boczną powierzchnię korpusu i dennicy, które ma zwykle charakter parcia biernego (odporu) i jest nazywane wsparciem bocznym. W przypadku zachowania niezmienności geometrycznej konstrukcji zbiornika wsparcie wynika z parcia spoczynkowego gruntu. Przy założeniu podatności materiału (HDPE) na odkształcenia, od strony zasypki na powierzchnię dennicy działa parcie czynne, które ze względu na jej niewielką krzywiznę stanowi dominującą składową poziomą. W przypadku owalizacji korpusu zbiornika pod wpływem obciążenia pionowego, prowadzącej do skrócenia średnicy pionowej i wydłużenia średnicy poziomej zbiornika, przy jednoczesnym docisku konstrukcji do gruntu, mobilizowany jest odpór gruntu (parcie bierne) (Madryas i in., 2002). Podczas eksploatacji zbiornika, przy jego cyklicznym napełnianiu i opróżnianiu charakter parcia działającego na korpus i dennicę zbiornika zmienia się powodując jednocześnie zmiany kierunku zginania tych elementów konstrukcyjnych. Zmienność warunków współpracy konstrukcji z gruntem sprawia, że właściwie jej uwzględnienie w procesie projektowania jest bardzo trudne.



Rys. 2-8 Schemat oddziaływań gruntu i wody na zbiornik podziemny z HDPE:
a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny (opracowanie własne)

Fig. 2-8 Scheme of soil and water interactions on an underground HDPE tank:
a) cross-section, b) longitudinal section (own study)

W zależności od położenia konstrukcji względem zwierciadła wody gruntowej (ZWG), zgodnie z podejściem przyjętym w Normie Europejskiej Eurokod 7 (PN-EN 1997-1, 2008), można wyróżnić trzy podstawowe przypadki:

Posadowienie powyżej zwierciadła wody gruntowej (suchy wykop)

Obiekt posadowiony powyżej zwierciadła wody gruntowej lub tylko nieznacznie pograżony w wodzie gruntowej nie wymaga zakotwienia (nacisk zasypki i ciężar własny konstrukcji posiadają wystarczającą przewagę nad siłami wyporu). Wówczas dominującym oddziaływaniem są obciążenia pionowe, które powodują docisk korpusu do podłoża. Skutkuje to zmianami geometrycznymi kształtu zbiornika, głównie owalizacją objawiającą się jako niewielkie osiadania na powierzchni terenu. Dodatkowo powoduje to wypychanie dennicy w kierunku gruntu, co pozytywnie wpływa na ograniczenie zwiększania się strzałki ugięcia.

Posadowienie poniżej zwierciadła wody gruntowej – przypadek stanu granicznego nośności UPL

Jeżeli konstrukcja znajduje się poniżej ZWG, a wypór może osiągać znaczne wartości to konstrukcja będzie wymagać zakotwienia (Darwish, 2008; Westbrook i Walker, 1996). W takim przypadku obiekt podlega wypieraniu i może być dociskany do warstwy nadkładu. Jednocześnie rozciąganie elementów kotwiących prowadzi do wypiętrzeń budowli

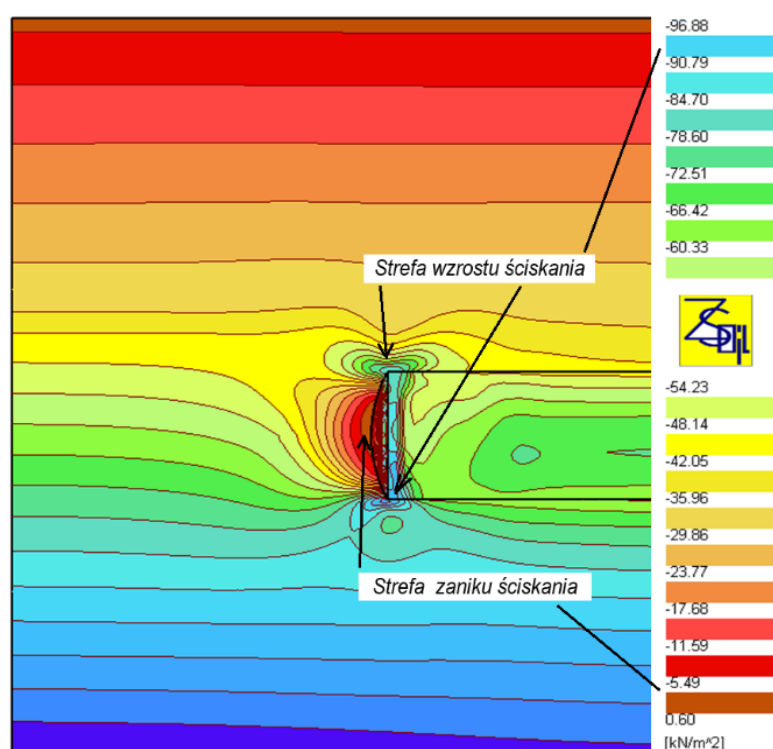
wraz z zasypką aż do powierzchni terenu. W przypadku rurociągów lub zbiorników skutkuje to prócz owalizacji przekroju poprzecznego również powstaniem szczeliny pomiędzy powierzchnią dolnej części przekroju zbiornika a podpierającym gruntem. Szczególnie w obecności wody gruntowej, może to prowadzić do niekontrolowanych przemieszczeń gruntu zasypki do powstałej szczeliny, czyli do zwiększenia objętości bryły zasypki i rozluźnienia materiału w jej bezpośrednim sąsiedztwie (zmniejszenia zagęszczenia gruntu), skutkującego obniżeniem wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu zasypki oraz jej sztywności.

Przepływ wody przez zasypkę – przypadek stanu granicznego nośności HYD

Trzecim przypadkiem są sytuacje, w których dochodzi do przepływu wody przez zasypkę lub wokół zbiornika. Przypadek ten może wynikać z różnic przepuszczalności zasypki i gruntu rodzimego lub pojawić się w wyniku lokalnych warunków hydrogeologicznych. W takich układach mogą wystąpić różnice ciśnienia hydrostatycznego między strefą zasypki a gruntem otaczającym wykop, powodujące przepływ wody przez zasypkę. Nadmierne rozluźnienie zasypki, przy jednoczesnej tendencji do przesklepiania gruntu na obwodzie w otoczeniu korpusu, zwiększa ryzyko utraty stateczności (załamania) szkieletu gruntowego w granicach bryły przesklepiania. Szczególnie niebezpieczna jest strefa saturacji, w obrębie której pory gruntu są całkowicie wypełnione wodą. Zjawisko to, zwane upłynnieniem, polega na okresowej utracie wytrzymałości gruntu na ścinanie. W wyniku upłynnienia gruntu i utraty jego nośności, wynikającej ze zdolności do przesklepiania, dochodzi do nagłego, znacznego wzrostu obciążenia dennicy oraz zwiększenia odkształceń zarówno dennicy, jak i podłoża, sięgających aż do powierzchni terenu.

Zagadnieniem kluczowym dla zapewnienia bezpiecznej interakcji między zbiornikiem a podłożem gruntowym jest uniknięcie nadmiernych odkształceń gruntu w bezpośrednim sąsiedztwie konstrukcji. Grunt, zwłaszcza niespoisty, charakteryzuje się bowiem wyraźną wrażliwością na odkształcenia objętościowe w kontekście rozluźnień gruntu (Banerjee i in., 2024; Shi i in., 2024). W przypadku gruntów niespoistych, odkształcenie objętościowe zasypki wywołane ugięciem dennicy nie powinno przekraczać wartości granicznej, przy której rozluźnienie szkieletu gruntowego grozi załamaniem lub znaczącym spadkiem wytrzymałości na ścinanie (Rys. 2-9). W skrajnych przypadkach może to prowadzić do okresowego przeciążenia powierzchni budowli, a dla dennicy zbiornika – do odwrócenia strzałki ugięcia, czyli trwałego wepchnięcia dennicy do wnętrza zbiornika oraz rozszczelnienia połączeń (np. rozerwania spawów, rozłączenia połączeń kielichowych). Deformacje mogą wystąpić również w sąsiadującej infrastrukturze, takiej jak przyłącza czy rurociągi, prowadząc

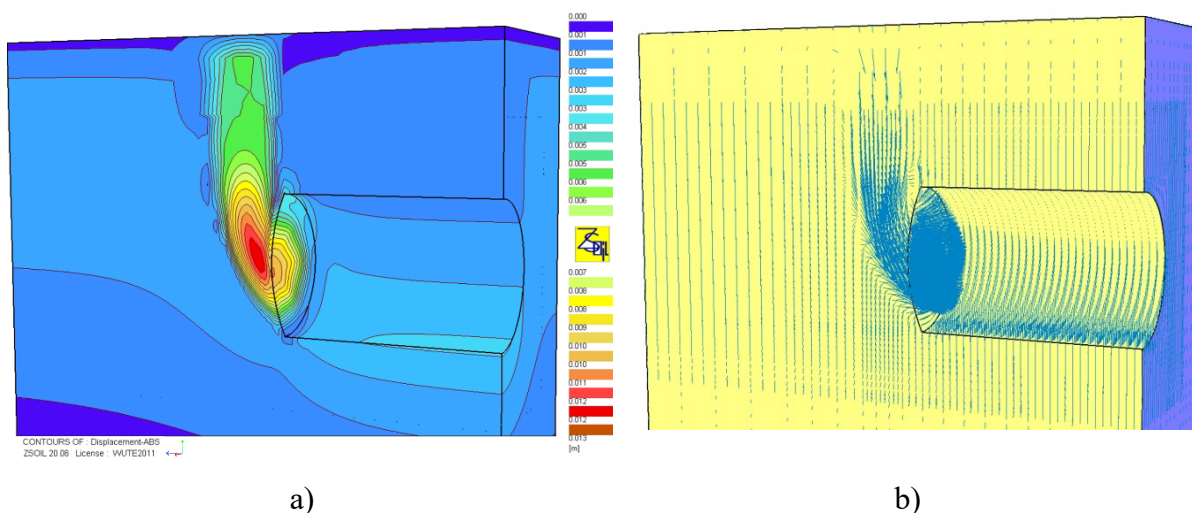
nawet do zapadnięcia powierzchni terenu i poważnych uszkodzeń nawierzchni. Stopniowe przemieszczanie dennicy w kierunku wnętrza zbiornika, spowodowane parciem gruntu i wody gruntowej, skutkuje zwiększeniem objętości zasypki i jej rozluźnieniem w bezpośrednim sąsiedztwie dennicy. To prowadzi do zmniejszenia zagęszczenia gruntu, a w konsekwencji – do obniżenia kąta tarcia wewnętrznego i sztywności zasypki. Nadmierne rozluźnienie może spowodować wzrost parcia czynnego i zwiększenie podatności gruntu na upłynnienie oraz zniszczenie jego struktury. W takich warunkach redukcji ulegają naprężenia efektywne, a w przypadku wystąpienia upłynnienia mogą spaść nawet do zera. Wytrzymałość na ścinanie zanika, czego konsekwencją jest trwałe odkształcenie dennicy spowodowane przemieszczeniem zasypki.



Rys. 2-9 Zmiana warunków współpracy zasypki z konstrukcją w strefie grunt-dennica na skutek ugięcia dennicy (opracowanie własne)

Fig. 2-9 Change soil-structure (backfill-end cap) interaction condition due to the end cap deflection (own study)

Aby określić dopuszczalne ugięcie dennicy ze względu na ryzyko zniszczenia struktury zasypki, niezbędne jest ustalenie kształtu i rozmiarów strefy gruntu, w obrębie której zmiany stanu naprężenia i odkształcenia mogą doprowadzić do nadmiernego rozluźnienia szkieletu gruntowego (Rys. 2-10). Wyznaczenie wartości granicznych naprężeń i odkształceń ma kluczowe znaczenie dla oceny stabilności układu zbiornik-grunt.



Rys. 2-10 Charakter deformacji gruntu zasypki w strefie ugięcia dennicy:
a) przemieszczenia wypadkowe, b) wektory przemieszczeń (opracowanie własne)

Fig. 2-10 Soil backfills deformation characteristics in the end cap deflection zone: a) resultant displacements, b) displacement vectors (own study)

Dennica zbiornika, ze względu na budowę strukturalną, charakteryzuje się wyraźną anizotropowością sztywności. Wyznaczenie wartości obliczeniowego modułu odkształcenia na drodze teoretycznej jest więc bardzo trudne i może być obciążone znacznymi błędami. Zarówno różnice w wartościach ugięć, jak i charakter ich zmian wraz ze wzrostem parcia działającego w osi dennicy, potwierdzają potrzebę wprowadzenia zarówno zastępczego modułu, tzw. obliczeniowego modułu odkształcenia, niezbędnego do precyzyjnego oszacowania deformacji dennicy, jak i analizy w zakresie dużych odkształceń, jakie uwzględnia się w procesie doboru zbiornika. W związku z tym, w celu zapewnienia maksymalnej możliwej zgodności deformacji określonych na drodze obliczeniowej z rzeczywistymi deformacjami dennicy w dłuższym okresie (okresie eksploatacji), konieczne jest wyznaczenie wartości parametru określanego mianem obliczeniowego długookresowego modułu odkształcenia HDPE.

Precyzyjne i wiarygodne ustalenie docelowej odpowiedzi materiału na obciążenie w stanie równowagi statycznej wymaga prowadzenia długotrwałych testów deformacji, pozwalających na wyznaczenie długookresowego modułu odkształcenia. Czasochłonne badania znacznie utrudniają bieżącą kontrolę jakości produkcji i późniejszej eksploatacji konstrukcji, zmuszając do przyjmowania wysoce konserwatywnych zapasów bezpieczeństwa przy projektowaniu, zarówno ze względu na wyłączenie materiału, jak i deformacje poszczególnych elementów konstrukcji.

Dobierając konstrukcję zbiornika oraz sztywność jego elementów, w przypadku konstrukcji podatnej należy uwzględnić jej dopuszczalne ugięcie pod obciążeniem, gwarantujące bezpieczeństwo w rozumieniu stateczności szkieletu otaczającego gruntu. Warto podkreślić, że na upłynnienie podatne są głównie grunty drobnoziarniste niespoiste w stanie luźnym oraz grunty drobnoziarniste mało spoiste. Przy ustalaniu wymaganej sztywności elementów obiektu, zwłaszcza wykonanego z materiału o właściwościach lepkosprężystych, takich jak HDPE, należy uwzględniać deformacje odłożone w czasie (odkształcenia zachodzące w czasie) i ich wpływ na zmiany rozkładu obciążenia konstrukcji i stanu naprężenia – zarówno w samej konstrukcji, jak i otaczającym ją gruncie.

2.4. Podsumowanie

Zbiorniki bezciśnieniowe z HDPE, coraz częściej zastępują tradycyjne konstrukcje stalowe czy betonowe. Wynika to z ich niewielkiej masy, odporności na korozję oraz łatwości montażu i obróbki, co znacząco obniża koszty inwestycji i eksploatacji. Jednocześnie materiały polimerowe charakteryzują się podatnością na pełzanie i deformacje długookresowe, które w sposób istotny wpływają na współpracę konstrukcji z ośrodkiem gruntowym. Właśnie ta interakcja jest kluczowa dla trwałości i bezpieczeństwa użytkowania konstrukcji z nich wykonanych. Należy podkreślić, że parametry gruntów są zmienne i często niepewne, co w połączeniu z reologicznymi właściwościami HDPE stwarza dodatkowe wyzwania projektowe. Konstrukcje tego typu wymagają więc indywidualnego podejścia do wymiarowania, uwzględniającego przypadki pracy powyżej i poniżej zwierciadła wody gruntowej, a także możliwość przepływu wód przez zasypkę, które mogą prowadzić do rozluźniania lub upłynnienia gruntu. Istotnym czynnikiem jest dobór odpowiedniej zasypki, ograniczenie dopuszczalnych ugięć dennic i analiza dużych odkształceń geometrycznych. Z tego względu projektowanie i eksploatacja podziemnych zbiorników z HDPE musi opierać się na kompleksowej analizie stateczności całego układu zbiornik-grunt, wzbogaconej o badania laboratoryjne, modelowe oraz monitoring w rzeczywistych warunkach pracy. Tylko takie podejście pozwala na precyzyjne określenie parametrów niezbędnych do prawidłowego zaprojektowania konstrukcji ze względu na warunki jej pracy, w tym m.in. długookresowego modułu odkształcenia oraz ograniczenie ryzyka awarii, które mogłyby wpływać zarówno na sam zbiornik, jak i na sąsiadującą infrastrukturę.

3. Właściwości polietylenu HDPE

3.1. Wprowadzenie

Polietylen (PE) jest materiałem termoplastycznym zaliczanym do polimerów winylowych (Pielichowski i Puszyński, 1998), i należy do klasy poliolefin nasyconych. Od czasu wynalezienia w 1898 roku poprzez przypadkową syntezę przez niemieckiego chemika Hansa von Pechmana jest jednym z najpowszechniej stosowanych tworzyw sztucznych na świecie i w zależności od jego gęstości znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach gospodarki (Mohanty i Bae, 2015). Jest to biała substancja porowata lub biały proszek o temperaturze topnienia 105-146°C (Wikipedia contributors, 2024). Elementy konstrukcyjne z polietylenu wytłaczane są z granulatu dostępnego w różnych wymiarach i barwach (Rys. 3-1) zarówno wytwarzanego pierwotnie, jak i przetworzonego z recyklingu. Otrzymywany jest w wyniku polimeryzacji alkenów (etylenu) w procesie krakingu parowego. Kraking to proces, podczas którego złożone cząsteczki organiczne rozkładają się na prostsze cząsteczki (np. lekkie węglowodory) poprzez rozerwanie wiązań węgiel-węgiel w prekursorach (Posch, 2011; Starowicz, 2021). Strukturę meru charakterystyczną dla polietylenu przedstawiono na Rys. 3-2.

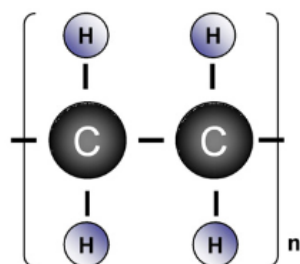


Rys. 3-1 Granulat polietylenu HDPE (Antypas, 2020): a) surowy materiał, b) materiał barwiony

Fig. 3-1 HDPE polyethylene granulate (Antypas, 2020): a) raw material, b) coloured material

Pomimo, że w polietylenie najprostszym i powtarzalnym fragmentem cząsteczki jest grupa $-CH_2-$, przyjmuje się, że merem w polietylenie jest fragment $[-CH_2-CH_2-]$ (Rys. 3-2), ponieważ polietylen otrzymuje się w wyniku polimeryzacji etylenu ($CH_2=CH_2$) (Su, 2013). Posiada on charakterystyczną cechę, jaką jest półkryształiczność, która została omówiona

dokładniej w rozdziale 3.2. To właśnie półkryształiczna struktura polietylenu o dużej gęstości (HDPE) umożliwia jednocześnie występowanie cech zarówno sztywności jak i lepkości, co czyni go jednym z najczęściej stosowanych polimerów w inżynierii materiałowej. Dzięki takiemu unikalnemu połączeniu właściwości mechanicznych, HDPE znajduje szerokie zastosowanie w konstrukcjach z tworzyw sztucznych, wymagających trwałości i odporności na odkształcenia.



Rys. 3-2 Struktura meru w polietylenie (Posch, 2011)

Fig. 3-2 Mer structure for polyethylene (Posch, 2011)

Można wyróżnić kilka rodzajów polietylenów w zależności od ich gęstości (wartości różnią się w zależności od źródła literaturowego) (Fried, 2014; Pielichowski i Puszyński, 1998; Posch, 2011; Speight i in., 2005; *What Is the Melting Point of PE Plastic?*, 2023). Rodzaje polietylenu oraz jego cechy zostały przedstawione w Tabeli 3-1.

Tabela 3-1 Rodzaje polietylenu i jego charakterystyczne parametry

Table 3-1 Polyethylene types and characteristic parameters

Rodzaj polietylenu	Gęstość [kg/m ³]	Kryształiczność [%]	Temperatura topnienia [°C]	Zastosowania
LDPE	926 – 940	30 – 50	105 – 115	folie, torby, opakowania, butelki
LLDPE	915 – 925	20 – 40	120 – 130	folie stretch, worki, opakowania spożywcze
MDPE	926 – 940	50 – 60	120 – 130	rury ciśnieniowe, folie, zbiorniki
HDPE	941 – 965	60 – 90	130 – 140	rury, zbiorniki, pojemniki, geosyntetyki
UHMWPE	930 – 935	50 – 60	130 – 136	elementy maszyn, implanty, pancerze

Polietylen niskiej gęstości (LDPE) jest szeroko stosowany w produkcji elastycznych opakowań, takich jak torby, folie i pojemniki, a także butelki o małej pojemności. Materiałem bardzo zbliżonym do LDPE, ale o zazwyczaj mniejszej gęstości i poziomie krystaliczności, jest polietylen liniowy o małej gęstości (LLDPE), który znajduje zastosowanie w produkcji folii stretch, folii termokurczliwych, worków i opakowań do żywności (Fried, 2014).

Polietylen średniej gęstości (MDPE) jest powszechnie wykorzystywany do produkcji rur ciśnieniowych do przesyłu wody, gazu i innych płynów, ale również folii opakowaniowych, worków i toreb oraz zbiorników na paliwo i substancje chemiczne (Emblem, 2012).

Polietylen o dużej gęstości (HDPE) jest używany głównie do produkcji rur do przesyłu wody, gazu, ścieków i innych mediów, ale, podobnie jak MDPE, także pojemników, butelek, części samochodowych, kanistrów i beczek (Rosato i in., 2004; Su, 2013). HDPE stosuje się również w produkcji zbiorników na paliwo, substancje chemiczne i wodę oraz elementów konstrukcyjnych, takich jak profile i płyty. Wykorzystywany jest również jako surowiec do wytwarzania geosyntetyków i geotekstyliów (Koerner i in., 2007; *Modelowanie ośrodka lepkosprężystego...*, 2017).

LDPE i HDPE określa się odpowiednio jako polietylen rozgałęziony i liniowy. Niski stopień rozgałęzienia skutkuje wysoką krystalicznością (70-90 %) w porównaniu do 40-60 % w przypadku LDPE i większą prędkością krystalizacji. Zwiększa to gęstość polimeru (940-960 kg/m³ w porównaniu do 910-930 kg/m³) i temperaturę topnienia kryształów (130-138 °C) w porównaniu do (105-115 °C) (Posch, 2011).

Istnieją również polietyleny o bardzo dużej masie cząsteczkowej (UHMWPE), charakteryzujące się wysoką odpornością na ścieranie, małym współczynnikiem tarcia, dużą wytrzymałością mechaniczną oraz odpornością na działanie środków chemicznych. Stosuje się je do produkcji elementów maszyn narażonych na intensywne zużycie, takich jak koła zębate i prowadnice. W branży medycznej, UHMWPE wykorzystuje się do wytwarzania implantów i protez stawów (Affatato, 2008; Oral i in., 2011). Ze względu na swoją wytrzymałość, tworzywo to znajduje również zastosowanie w produkcji kamizelek kuloodpornych i elementów pancerzy (Hearle, 2005; Yan, 2016). Ze względu na wyjątkowo dużą masę molową UHMWPE nie jest możliwe jego przetwarzanie metodą wtrysku, rozdmuchu, termoformowania ani wytłaczania ślimakowego. Niemniej jednak UHMWPE można przetwarzać z zastosowaniem spiekania tłocznego na arkusze, bloki i części precyzyjne oraz przez wytłaczanie tłokowe – prętów, rur i profili. Metody spawania takie jak m.in. metoda

indukcji magnetycznej, mogą w przyszłości uczynić ten materiał atrakcyjnym również w produkcji strukturalnych konstrukcji podziemnych (Andersen, 2004; Chirikov i in., 2020).

Istnieją również włókna polimerowe, jak np. włókna żelowe HMPE, które dzięki dużemu modułowi odkształcenia i dużej wytrzymałości na rozciąganie są materiałem chętnie wykorzystywanym w balistyce i produkcji wyposażenia dla wojska. Jedną z poważnych wad tych włókien jest intensywne pełzanie pod wpływem obciążeń generujących duże naprężenia, co w krótkim czasie prowadzi do ich zerwania (Hearle, 2005).

W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost wykorzystania polietylenu pochodzącego z recyklingu (rHDPE). Jest to efekt rosnących wymagań środowiskowych oraz wprowadzania regulacji prawnych promujących Gospodarkę Obiegu Zamkniętego. W 2025 roku poziom recyklingu HDPE sięgnął ok. 78 % (*Metale i Tworzywa Sztuczne Co Wrzucić w 2025?*, 2025), co czyni go jednym z najlepiej odzyskiwanych tworzyw sztucznych na rynku. Wielokrotne przetwarzanie prowadzi jednak często do jego nieodwracalnej degradacji mechanicznej, związanej ze skracaniem łańcuchów polimerowych, co bezpośrednio przekłada się na wzrost wskaźnika prędkości płynięcia (*MFI*) (Thakur, 2019). Konsekwencją degradacji jest pogorszenie się kluczowych właściwości mechanicznych takich jak wytrzymałość na rozciąganie, odporność na pękanie, udarność i zmniejszona zdolność do odkształceń plastycznych, przez co materiał staje się bardziej kruchy (Gnoffo i in., 2025). rHDPE jest coraz częściej stosowanym surowcem wtórnym, ale jego właściwości reologiczne i udarowościowe są zazwyczaj gorsze od pierwotnego HDPE. Aspekt ten powinien być przedmiotem dalszych badań i powinien być również uwzględniony przy projektowaniu.

Przemysłowa produkcja polietylenu – początkowo małej gęstości (LDPE) – oparta na powtarzalnej syntezie wysokociśnieniowej, została uruchomiona w 1939 roku. W ten sposób powstała możliwość powszechniejszego wykorzystania tego materiału, dając silny impuls do dalszego doskonalenia technologii jego produkcji. Polietylen o dużej gęstości (HDPE) pojawił się w latach 50-tych XX wieku, zarówno w Stanach Zjednoczonych (Philips Petroleum w 1951 roku), jak i w Europie, szybko zyskując szerokie zastosowanie w przemyśle (Goddard, 2011; Spalding i Chatterjee, 2017). Po tym jak pierwsza falista rura z tworzywa sztucznego, o średnicy 50 mm, zaprojektowana do celów odwadniania gruntów została wyprodukowana w Europie w 1961 roku (Goddard, 2011), polietylen coraz częściej znajdował zastosowanie w budownictwie i już latach 70-tych XX wieku, w Stanach Zjednoczonych zaczęto go powszechnie stosować w branży drogowej (S. J. Stuart, 2011). W Polsce już w latach 70-tych zaczęto stosować polietylen PE do budowy sieci gazowych

(Kwacz i Zadrosz, 2008), jednakże stosowanie HDPE rozpoczęło się dopiero w latach 90-tych, głównie przez otwarcie na nowe rynki, ale również poprzez ekspansję polietylenów na świecie. Ich produkcja na świecie pod koniec lat 80-tych przekroczyła objętościowo produkcję stali, w kolejnych latach znacząco ją wyprzedzając (Borkowski, 2015). Obecnie jego zastosowanie jest powszechne w wielu dziedzinach gospodarki i stale rośnie. Wartość rynku HDPE na świecie w 2023 roku wynosiła ok. 79,5 miliarda dolarów. Jego wzrost w najbliższych latach (2024-2032) jest przewidywany do poziomu ok. 113,5 miliarda dolarów, z czego kluczowym trendem sprzyjającym ekspansji rynku będzie zapotrzebowanie na HDPE w industrializacji i urbanizacji miast i rozwoju infrastruktury (*Global HDPE ...*, 2024).

Warto również zwrócić uwagę na rosnący udział w rynku HDPE uzyskiwanego z recyklingu, co obecnie stanowi ok. 30 % przy blisko 12,5 mln ton wykorzystywanych w budownictwie i udział ten stale rośnie (*Tworzywa ...*, 2022). Ma to istotne znaczenie dla jakości materiału używanego do produkcji infrastruktury podziemnej oraz komponentów z niego wytwarzanych. Przewiduje się, że w wyniku dążenia do rozszerzania zastosowań i powiązanego z nim wzrostu wymagań w zakresie jakości surowca, kontrola jakości będzie stanowiła coraz ważniejszą część procesu produkcji. Literatura wskazuje, że zmiany właściwości przy kolejnych cyklach przetwórczych wynikają z konkurencji cięcia łańcuchów i sieciowania/rozgałęziania, co wpływa na mobilność segmentów w fazie amorficznej i reologię stopu; typowo dla PE obserwuje się spadek *MFI* i nieznaczny spadek stopnia krystaliczności, choć lokalna reorganizacja przy wygrzewaniu sprzyja dalszemu skurczowi (Bernardo i in., 1996; Mendes i in., 2011). Dodatek surowca pierwotnego oraz stabilizatorów ogranicza degradację, a polietyleny o mniejszej masie cząsteczkowej i bardziej rozgałęzione (LDPE) są na nią mniej wrażliwe. Na tej podstawie sformułowano wniosek, że w surowcu poddanym recyklingowi obserwowane są mniejsze długości łańcuchów fazy amorficznej, zaś dłuższa obróbka termiczna sprzyja wzrostowi zawartości fazy krystalicznej.

3.2. Struktura HDPE i jego zachowanie pod obciążeniem

HDPE jest polimerem półkrystalicznym zawierającym dwie fazy: amorficzną i krystaliczną. Krystaliczne lamelle zapewniają polietylenowi integralność strukturalną, podczas gdy części amorficzne zapewniają polietylenowi jego właściwości elastyczne (Rys. 3-3) (Ward i Sweeney 2013). W praktyce polietylen o krystaliczności równiej 100 % jako materiał stały nie jest możliwy do uzyskania, ale można w rozcieńczonych roztworach otrzymać monokryształy polietylenu o niemal stuprocentowej krystaliczności (Keller, 1957). W warunkach rzeczywistych polietylen zwykle krystalizuje się ze stopu, przyjmując

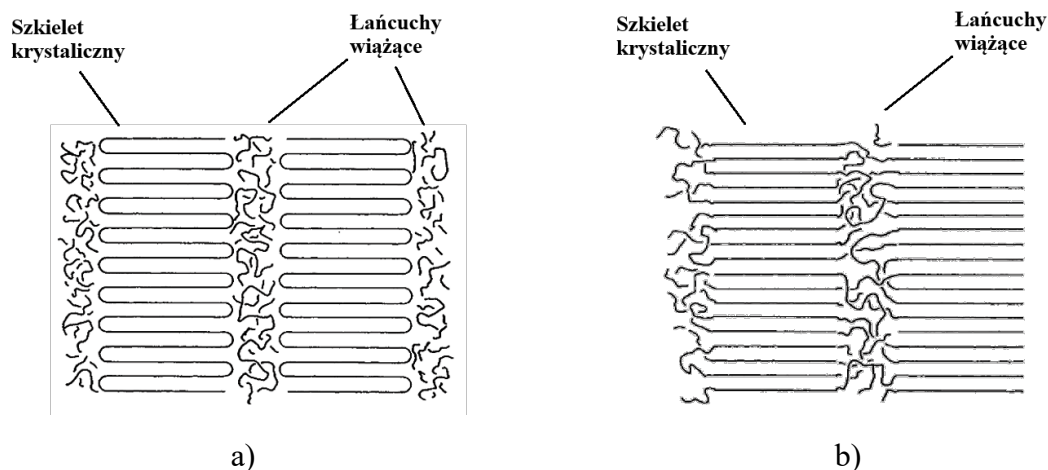
morfologię sferolityczną. Sferolity osadzone są w matrycy z materiału amorficznego i zbudowane są z lameli powstałych podczas procesu krystalizacji. Każda lamela to cienka „płytką” uformowana z pofałdowanych łańcuchów polimerowych. Łańcuchy te układają się prostopadle do powierzchni bocznych lameli – a więc w przybliżeniu równolegle do kierunku ich wzrostu. Dzięki temu struktura krystaliczna jest bardzo uporządkowana. Regularny wzrost lameli poprzez fałdowanie łańcucha powoduje, że kryształy o wymiarach w kierunku poprzecznym (1-50 μm) są znacznie większe niż ich grubość (2-25 nm) (Janimak i Stevens, 2001).



Rys. 3-3 Schemat budowy polimerów: a) struktura amorficzna, b) półkrystaliczna c) krystaliczna. Linie faliste symbolizują nieuporządkowane segmenty łańcuchów polimerowych, natomiast fragmenty uporządkowane (zaznaczone pogrubieniem) odpowiadają obszarom krystalicznym (Piergiovanni i Limbo, 2016)

Fig. 3-3 Scheme of polymer structure: a) amorphous, b) semi-crystalline, c) crystalline. Wavy lines symbolize disordered segments of polymer chains, while the ordered fragments (indicated in bold) correspond to crystalline regions (Piergiovanni i Limbo, 2016)

Obecnie większość prac nad mechaniką i opisem struktury polietylenu opiera się na modelu regularnego złożenia łańcuchów (Rys. 3-4a). Jest on szerzej stosowany niż model łańcuchów nieregularnie złożonych (Rys. 3-4b), który zaproponowali Flory i Yoon (Flory i Yoon, 1978). Niektóre prace wykazały, że w polietylenie krystalizowanym w stanie stopionym występują oba typy struktur krystalicznych (Cheng, 2008).



Rys. 3-4 Model szkieletu i łańcuchów krystalicznych złożonych: a) regularnie, b) nieregularnie (Flory i Yoon, 1978)

Fig. 3-4 Framework and complex crystalline chain model: a) regularly arranged, b) irregularly arranged (Flory i Yoon, 1978)

Lepkosprężysta odpowiedź polietylenu na obciążenie jest związana z rozluźnieniem naprężeń w łańcuchach zlokalizowanych w obszarach amorficznych oraz zależnym od czasu zanikiem sił przenoszonych na szkielet krystaliczny przez łańcuchy wiążące (Findley i in., 1989; Hiss i in., 1999). W ujęciu globalnym odkształcenie częściowo krystalicznego polietylenu można rozumieć jako rozciąganie lub ściskanie sieci w warunkach dużej, nieliniowej lepkości wewnętrznej. Praca wykonana na materiale podczas odkształcania może być podzielona na część magazynowaną i część rozpraszaną, związaną z procesami ślizgania. Dla HDPE przy małych odkształceniach dominuje część rozpraszana (Hiss i in., 1999). Znaczącą cechą mechaniczną HDPE jest wyraźna skłonność do pełzania materiału już przy niewielkim, stałym obciążeniu, co znacząco wpływa na właściwości użytkowe konstrukcji (Nitta i Maeda, 2010). Innym równie istotnym aspektem w procesie deformacji HDPE jest granica przejścia z pierwszego stadium pełzania do kolejnych stadiów (opisane dalej w rozdziale 3.4), która jest kluczowa w procesie deformacji. Gdy odkształcenie przekracza ten punkt krytyczny, po którym następuje przyspieszenie prędkości odkształceń, zachowanie materiału ulega wyraźnej zmianie. Jest to moment przejścia ze stadium drugiego do stadium trzeciego, w którym zaczyna się proces rozplątywania łańcuchów polimerowych w obszarach amorficznych charakterystyczny dla stanu dużych odkształceń. Proces ten prowadzi do zmiany topologii sieci splątań, która jest kluczowa dla ich powrotu do pierwotnej postaci w zakresie odkształceń sprężystych. Pod wpływem siły rozciągającej oprócz procesów poślizgu mogą powstać mikroskopijne puste przestrzenie. Dzieje się tak w przypadku lameli zorientowanych prostopadle do kierunku naprężeń (Hiss i in., 1999; Petermann i Schultz, 1978).

Do kategorii materiałów wykazujących zachowanie lepkosprężyste należą nie tylko tworzywa sztuczne, ale również drewno, beton, niektóre metale w podwyższonych temperaturach oraz włókna naturalne i syntetyczne (Placet i in., 2008; Rusch, 1960; Saadallah i in., 2024). Ponieważ czas, a dokładnie jego upływ jest jednym z istotnych czynników kształtujących ich stan wewnętrzny, materiały te nazywane są również materiałami zależnymi od czasu (Komar, 2007).

3.3. Duże odkształcenia polimerów

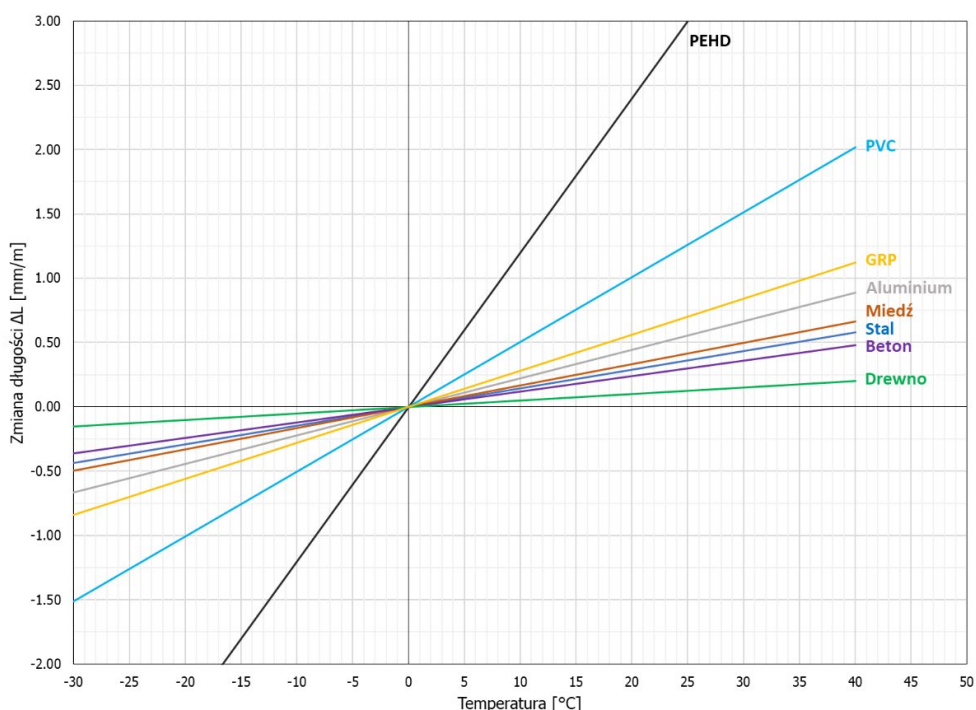
Pojęcie dużych odkształceń w znaczeniu teorii sprężystości i plastyczności oznacza zmiany geometryczne na tyle znaczne, że wpływają one na rozkłady sił wewnętrznych w stopniu przekraczającym dokładność wykonania próbek, pomiarów, kontroli wartości obciążenia itp., unieważniając tym samym założenia teorii małych odkształceń. W praktyce oznacza to, że zmiany w kształcie i wymiarach elementów są wystarczająco duże, aby błąd modelu przekroczył błąd pomiaru. Duże odkształcenia, ze względu na złożoność opisu, są często analizowane przy użyciu zaawansowanych metod numerycznych, a odpowiednie związki różniczkowe są całkowane za pomocą metody elementów skończonych. Wykorzystanie tej metody umożliwia uwzględnienie zarówno nieliniowości geometrycznych, jak i materiałowych (Behseta i in., 2012; Bruhns, 2020; Hibbitt i in., 1970).

Polimer może ulegać dużym odkształceniom i nadal wykazywać zdolność do całkowitego (z uwzględnieniem dokładności pomiaru) powrotu do swojego pierwotnego kształtu. Jest to klasyczne zachowanie elastomerów, takich jak guma, które mają zdolność do wydłużenia przy rozciąganiu kilkakrotnie przekraczającego wymiar początkowy, a następnie powracania do pierwotnej formy niemal natychmiast po ustąpieniu obciążenia. To zachowanie jest możliwe dzięki istnieniu elastycznych wiązań krzyżowych między łańcuchami polimerowymi. Wiązania takie działają jak sprężyny, które po rozciągnięciu wracają do swojego pierwotnego kształtu. W praktyce, to właśnie te właściwości sprawiają, że materiały takie jak guma są wszechstronne używane i znajdują wiele zastosowań, od opon samochodowych po uszczelki i elastyczne węże, tłumiki uderzeń itp. Z dobrym przybliżeniem można opisać takie zachowanie jako sprężyste przy dużych odkształceniach (Ward i Sweeney, 2013).

Hiss i in. przeprowadzając doświadczenie polegające na podgrzewaniu próbki, która wcześniej uległa odkształceniu powyżej 100 % pierwotnej wartości wymiarów, przy kontrolowanym naprężeniu, zauważyli, że materiał w temperaturze pokojowej jest zdolny

do samoistnego skurczu w zakresie ok. 10 %, a pod wpływem podgrzewania jest w stanie skurczyć się łącznie o ok. 90 % (Hiss i in., 1999). Po przekroczeniu pewnej granicy podgrzewania, bliskiej 140 °C, materiał przestał się kurczyć, pozostawiając ok. 10 % nieodwracalnych odkształceń plastycznych. Jednakże, zjawisko pojawiania się odkształceń nieodwracalnych zaobserwowano jedynie w przypadku próbek, które ulegały wstępnemu odkształceniu powyżej 90 %, a próbki odkształcone poniżej tej granicy nie wykazywały odkształceń nieodwracalnych.

Zmiany temperatury w przypadku HDPE odgrywają znaczącą rolę również ze względu na dużą wartość współczynnika rozszerzalności termicznej α_T . Dla HDPE wynosi on zależnie od źródła od $1,2 \cdot 10^{-4}$ do $2,0 \cdot 10^{-4}$ [1/K] (Pieczonka, 2010; S. J. Stuart, 2011) i jest ok. 10-krotnie większy niż dla tradycyjnych materiałów takich jak stal czy beton (Rys. 3-5) (US Fusion, 2021). Tak wysoka podatność na odkształcenia termiczne prowadzi do zauważalnych deformacji elementów z HDPE w warunkach zmiennych temperatur, co ma bezpośredni wpływ na ich stateczność geometryczną. Zmienność właściwości w szerokim zakresie temperaturowym powoduje, że w projektowaniu elementów z HDPE niezbędne jest uwzględnienie nie tylko samego współczynnika rozszerzalności cieplnej, ale również zmienności parametrów reologicznych i wytrzymałościowych w zależności od warunków termicznych.



Rys. 3-5 Zależność zmiany wydłużenia od temperatury dla wybranych materiałów (Bednarz i Dąbska, 2021; Oh i Yoon, 2012)

Fig. 3-5 Dependence longitudinal change on temperature for selected materials (Bednarz i Dąbska, 2021; Oh i Yoon, 2012)

3.4. Zjawisko pełzania HDPE

Zagadnieniem pełzania materiałów zajmuje się reologia, czyli nauki o płynięciu i plastycznym odkształcaniu się materiałów. Głównym i nieodłącznym parametrem tego działu mechaniki jest czas (Jakowluk, 1993). Pełzanie należy rozumieć jako proces powolnego rozwoju odkształcenia materiału w czasie przy stałej wartości obciążenia. Dla odkształceń nieprzekraczających kilku procent można przyjmować, że pełzanie zachodzi również przy niezmiennym stanie naprężenia $\sigma = const$. Zależy ono głównie od czasu trwania obciążania i temperatury, w jakiej to zjawisko zachodzi (Jakowluk, 1993).

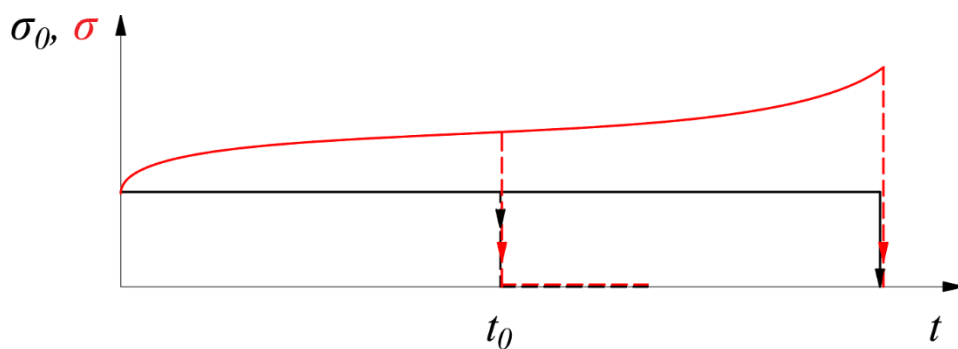
W procesie pełzania HDPE można wyróżnić dwa przeciwstawne procesy, które sterują naprężeniem wywołującym odkształcenia materiału. Procesy te nazywane są *umocnieniem* i *osłabieniem odkształceniowym*. Proces *umocnienia*, poprzez odkształcenia trwałe, powodowane głównie przez poślizgi i dyslokacje w płaszczyznach wewnątrzkryształicznych wprowadza strukturę próbki w stan niestabilny termodynamicznie (Jakowluk, 1993). Uważa się, że przyczyną rozwoju pola naprężeń własnych podczas umocnienia przez odkształcenie jest molekularne ułożenie łańcuchów polimeru. Ten typ ułożenia łańcucha można postrzegać jako formę krystalizacji wywołanej polem naprężeń własnych. W wyniku wzrastającej krystaliczności zwiększa się wytrzymałość polietylenu, szczególnie na rozciąganie (Cheng, 2008). Proces ten obejmuje sekwencję czterech etapów: początkowe rozciąganie łańcuchów w fazie amorficznej, rotację lamelli krystalicznych, ich plastyczną deformację oraz fragmentację krystalitów prowadzącą do powstania mikrostruktury włóknistej (Abdul-Hameed i in., 2014; Nguyen i in., 2021). W efekcie rośnie opór wobec dalszej deformacji, a naprężenie przy dużych odkształceniach osiąga wartości przewyższające poziom odpowiadający uplastycznieniu, co manifestuje się w postaci wyraźnego umocnienia materiału. Haward wykazał, że zachowanie to można z powodzeniem opisać w ramach zmodyfikowanej teorii sprężystości dla materiałów o cechach gumowych (*theory of rubber elasticity*), w której dodatkowe naprężenia po uplastycznieniu wiążą się z orientacją i wzajemnym splątaniem makrocząsteczek (Haward, 2007). Wprowadzenie współczynnika umocnienia G_p pozwala ilościowo charakteryzować intensywność tego procesu, przy czym stwierdzono silną zależność wartości G_p od masy cząsteczkowej HDPE. Wysokocząsteczkowe odmiany polietylenu wykazują zatem większą odporność na deformację i długookresową wytrzymałość. W procesie *osłabienia* dochodzi do przemieszczania się cząstek z węzłów sieci krystalicznej do części amorficznej, co sprzyja osiągnięciu równowagi termodynamicznej przez fazę krystaliczną i obniżeniu naprężeń własnych. W przeciwieństwie do procesu umocnienia, które zależne jest

tylko od przyłożonego obciążenia, intensywność efektu osłabienia wzrasta wraz z temperaturą i czasem trwania oddziaływania (Jakowluk, 1993; Zawadzki, 1984). Równanie konstytutywne pełzania materiału przy stałej temperaturze $T = const.$ ma ogólną postać:

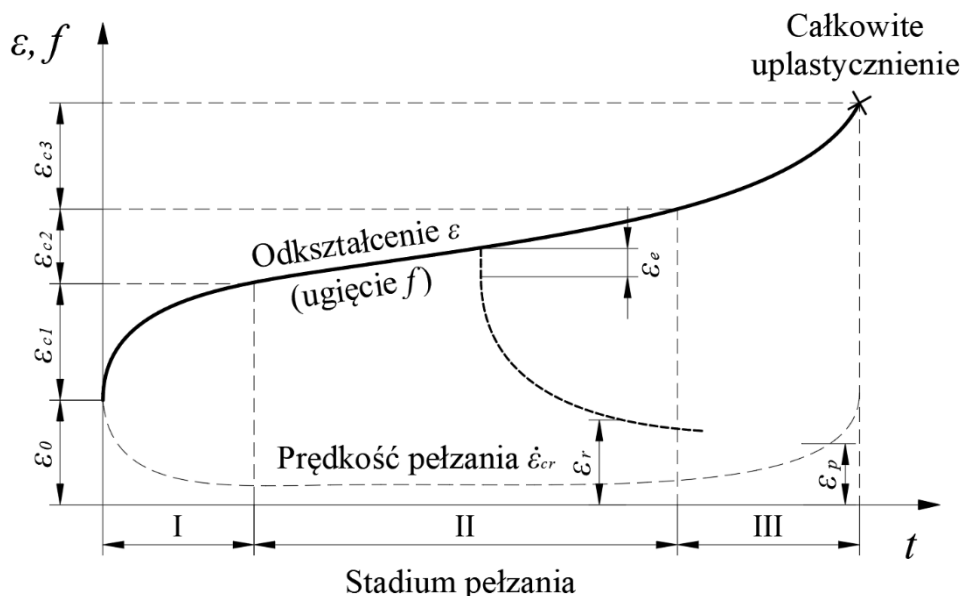
$$\varepsilon = f(\sigma, t) \quad (3.1)$$

W typowym przebiegu procesu pełzania materiału (Rys. 3-6) wyróżnia się trzy stadia pełzania ciała stałego (Findley i in., 1989; Jakowluk, 1993; Naumenko i Altenbach, 2007):

- 1) Pierwsze stadium pełzania, nazywane pierwotnym (*primary creep*) charakteryzuje się wystąpieniem natychmiastowego odkształcenia sprężystego w chwili $t \cong 0$, a następnie odkształceń o dużej, ale malejącej w czasie prędkości zmian. Zmiany prędkości wynikają z przewagi umocnienia mechanicznego próbki nad osłabieniem termodynamicznym.
- 2) Drugie stadium, nazywane jako wtórne lub ustalone (*secondary/stationary creep*), charakteryzuje się przyrostem odkształceń przy stałej lub nieznacznie zmieniającej się prędkości. Zachodzą w nim procesy mechaniczno-termiczne charakteryzujące się przebiegiem ustalonym.
- 3) W trzecim stadium pełzania, zwanym również jako trzeciorzędnym oraz III rzędu (*tertiary creep*) zaczynają pojawiać się efekty zjawiska osłabienia materiału, co prowadzi do wzrostu prędkości odkształcania i w konsekwencji do utraty równowagi mechaniczno-termicznej (Liu, 2007).



a)



b)

Rys. 3-6 Krzywa pełzania ciała stałego w czasie:

a) wykres zmiany naprężenia w czasie: czarna linia – naprężenie nominalne, czerwona linia – naprężenie rzeczywiste w przekroju próbki,

b) wykres zmiany odkształcenia ε (ugięcia f) w czasie:

I – pierwsze stadium, II – drugie stadium, III – trzecie stadium

(Jakowluk, 1993)

Fig. 3-6 Creep curve of a solid body over time: a) plot of stress variation in time: black line – nominal stress, red line – true stress in the specimen cross-section, b) plot of strain ε (deflection f) variation in time:

I – primary stage, II – secondary stage, III – tertiary stage

(Jakowluk, 1993)

Kształt krzywej pełzania i czas trwania poszczególnych etapów silnie zależą od wartości naprężeń oraz temperatury próbki. Większe naprężenia i temperatury prowadzą do szybszego pełzania i wcześniejszego zniszczenia. Przy mniejszym wyężeniu materiału proces ten może dążyć asymptotycznie do stanu stabilizacji i zaniku przyrostu odkształceń, poprzez mechanizm umocnienia odkształceniowego – dostarczona energia mobilizuje i porządkuje łańcuchy polimerowe, powodując chwilowe zwiększenie sztywności. Dopiero, gdy obciążenie (naprężenia) lub temperatura przekroczy maksymalną wartość, przy której materiał jest

w stanie skutecznie wzmacniać swoją strukturę poprzez mechanizm umocnienia odkształceniowego, rozpoczyna się przejście do trzeciego stadium pełzania, w którym następuje szybszy przyrost odkształceń i ostatecznie materiał ulega uszkodzeniu (Campbell, 2015).

Przerwanie procesu pełzania próbki ciała stałego poprzez jej odciążenie rozpoczyna proces relaksacji naprężeń, w czasie którego próbka najpierw odzyskuje kształt w części odpowiadającej natychmiastowemu odkształceniu sprężystemu, a następnie w procesie odkształceń sprężysto-plastycznych zbiega do stanu tzw. odkształcenia rezydualnego (reszkowego) (Findley, 1987). Wartość cofniętej w procesie relaksacji części odkształcenia zależnego od czasu w przypadku np. metali stanowi na ogół bardzo małą część zależnego od czasu odkształcenia pełzającego, podczas gdy dla tworzyw sztucznych może stanowić jego część dominującą. Niektóre tworzywa sztuczne mogą wykazywać pełną regenerację, jeśli zapewni się odpowiednią ilość czasu na regenerację kształtu. Zdolność powrotu do kształtu pierwotnego nazywana jest również opóźnioną sprężystością (Papanicolaou i Zaoutsos, 2011).

Podczas rozciągania powierzchnia próbki zmniejsza się ze względu na efekt Poissona, a ponieważ obciążenie jest stałe, wzrasta rzeczywiste naprężenie pełzania. Z drugiej strony, przy obciążeniu ściskającym powierzchnia stale rośnie, a w konsekwencji naprężenia rzeczywiste zmniejszają się (Bozorg-Haddad i in., 2010). Przy obciążeniu rozciągającym materiał ulega zjawisku odwijania łańcuchów polimerowych i separacji między cząstkami, aż do chwili uaktywnienia procesu pełzania trzeciego rzędu, które charakteryzuje się wzrostem prędkości pełzania zakończonym zerwaniem (zniszczeniem) (Bozorg-Haddad i in., 2010; Campbell, 2015).

Pełzanie HDPE jest procesem aktywowanym termicznie, więc jego przebieg silnie zależy od temperatury. Zależność tę często opisuje się *równaniem Arrheniusa* (3.2), który jako pierwszy opisał wpływ temperatury na prędkość reakcji chemicznych (Arrhenius, 1889; Fried, 2014; Jakowluk, 1993; Naumenko i Altenbach, 2007):

$$a_T(T) = \exp(-Q/R \cdot T) \quad (3.2)$$

Z równania tego wynika, że im większa jest energia aktywacji Q tym silniejsza jest zależność od temperatury. Model Arrheniusa pozwala uwzględnić wpływ temperatury na pełzanie, jednak jego zastosowanie jest ograniczone tylko do zakresu liniowej

lepkosprężystości. Nie ujmuje on również wpływu naprężenia na odkształcenie. Jego zaletą jest powiązanie stałych materiałowych z wielkością fizyczną, jaką jest energia aktywacji procesu (Nitta i Maeda, 2010).

Na poziomie molekularnym, pełzanie HDPE jest wynikiem poślizgu łańcuchów w fazie amorficznej oraz deformacji i fragmentacji krystalitów w fazie krystalicznej. Zjawisko to jest więc ściśle powiązane z budową dwufazową HDPE i zależy od takich parametrów strukturalnych jak stopień krystaliczności, grubość i orientacja lameli oraz gęstość splatań w obszarach amorficznych (Hiss i in., 1999).

W trzecim stadium pełzania jest obserwowane przyspieszenie odkształceń głównie ze względu na procesy uszkodzeń materiału (Naumenko i Altenbach, 2007). Uszkodzenia te częściej inicjowane są w warstwach rozciąganych, pomimo że naprężenia są mniejsze niż w pierwszym stadium pełzania. Jest to skutek innych procesów wynikających ze zmniejszenia wytrzymałości materiału (np. kawitacji granic ziaren i starzenia się mikrostruktury), co wpływa znacząco na obniżenie granicy wytrzymałości warstwy rozciąganej względem jej wartości początkowej (Naumenko i Altenbach, 2007).

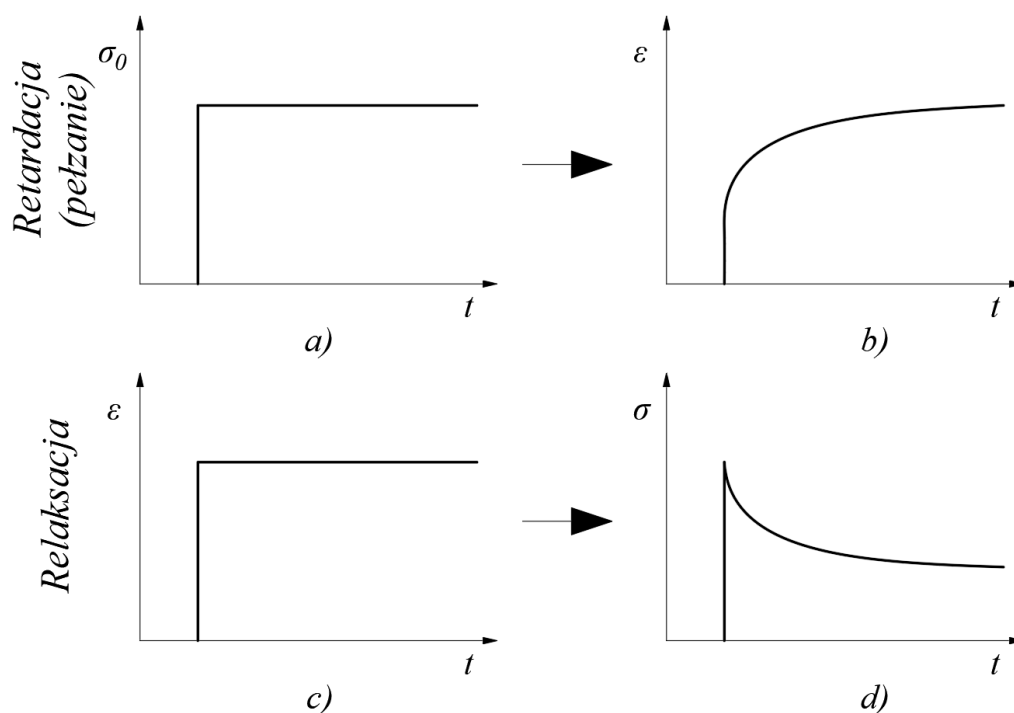
Innym, zależnym od czasu zjawiskiem związanym z zachowaniem materiału lepkosprężystego, w tym polietylenu, jest *relaksacja naprężeń*. Relaksacja naprężeń $G(t)$ jest to zmiana naprężenia $\sigma(t)$ w materiale, utrzymywanym w warunkach stałego odkształcenia ε_0 , opisana modułem relaksacji (Jakowluk, 1993):

$$G(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (3.3)$$

Czas relaksacji λ_1 definiuje się jako stałą czasową wykładniczego zaniku naprężenia w teście relaksacji przy wymuszonym odkształceniu próbki. Czas retardacji λ_2 to charakterystyczny czas, w którym materiał lepkosprężysty reaguje na zmianę naprężenia; czas, w którym odkształcenie materiału osiąga określoną część swojej wartości końcowej po nagłym przyłożeniu stałego naprężenia. Czas relaksacji i czas retardacji są wyrażone wzorem:

$$\lambda_1, \lambda_2 = \frac{\eta}{E} \quad (3.4)$$

Oznacza to, że przy przyłożeniu wartości odkształcenia skokowo (Rys.3-7a) napężenie maleje wykładniczo i zbliża się do końcowej wartości w czasie charakterystycznym λ_1 (Rys.3-7b), a przy przyłożeniu wartości naprężenia skokowo (Rys.3-7c) odkształcenie rośnie wykładniczo i zbliża się do końcowej wartości w czasie charakterystycznym λ_2 (Rys.3-7d). Dla materiałów szybko reagujących na wymuszone odkształcenie lub obciążenie, czas relaksacji / retardacji jest relatywnie krótki. W rzeczywistych polimerach występuje całe spektrum czasów relaksacji / retardacji, co odzwierciedla złożoność ich struktury i mechanizmów deformacji.



Rys. 3-7 Wykres relaksacji i retardacji w czasie. Pełzanie (retardacja): po skokowym przyłożeniu stałego naprężenia a) odkształcenie rośnie w czasie i asymptotycznie zbliża się do wartości granicznej b). Relaksacja: po skokowym zadaniu stałego odkształcenia c) napężenie maleje w czasie, zwykle wykładniczo d) (Geiß i Schumann, 2017)

Fig. 3-7 Scheme of relaxation and retardation in time. Creep (retardation): after an instantaneous step of constant stress a), strain increases over time and asymptotically approaches the limit value b). Relaxation: after an instantaneous step of constant strain c), stress decays with time, typically exponentially d) (Geiß i Schumann, 2017)

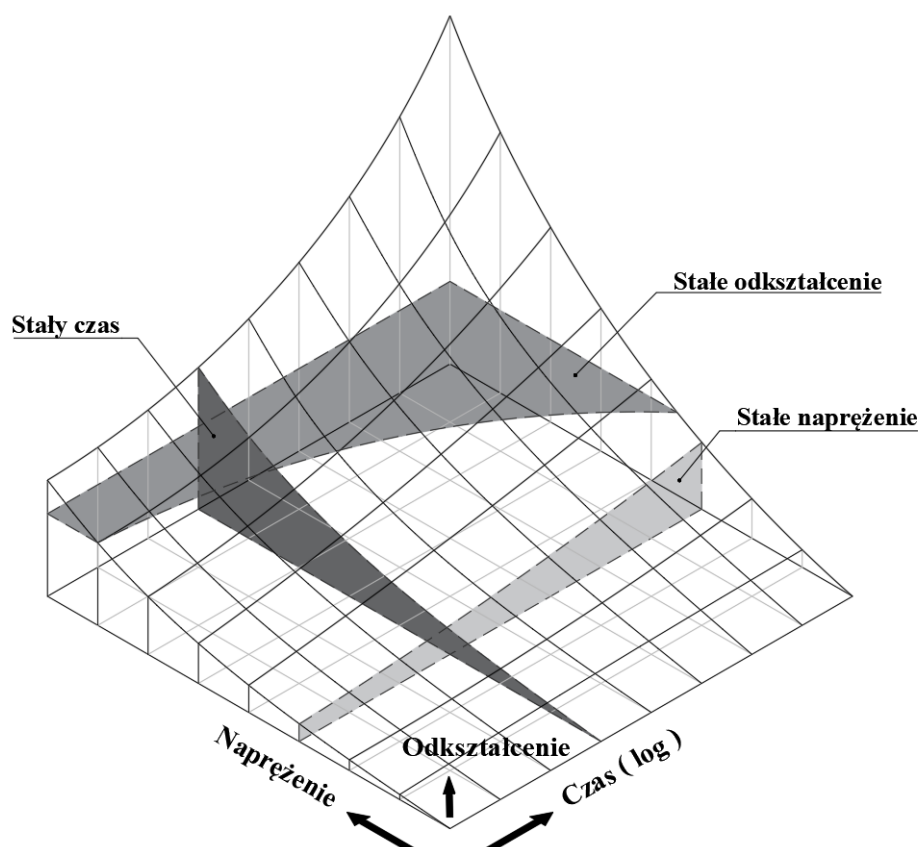
W próbie pełzania przy stałym naprężeniu σ_0 mierzy się zależne od czasu odkształcenie $\epsilon(t)$. W przypadku materiału o liniowej zależności lepko-sprężystego odkształcenia od naprężenia, odkształcenie to można przedstawić jako (Findley i in., 1989) (3.5):

$$\epsilon(t) = \sigma_0 \cdot J(t) \quad (3.5)$$

Podatność $J(t)$ (podawana również często jako C - ang. *Compliance*) jest definiowana jako iloraz odkształcenia do naprężenia, występujący po czasie trwania obciążenia t :

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (3.6)$$

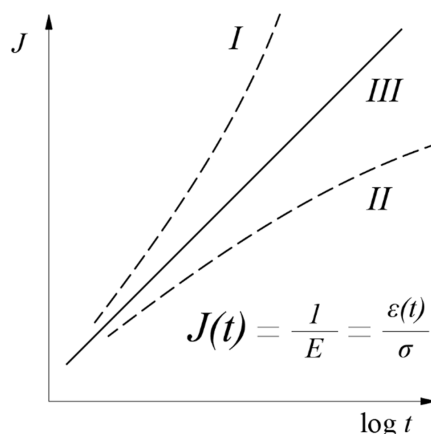
Podatność na pełzanie jest właściwością materiału. Porównanie krzywych podatności przy różnych wartościach naprężenia wskazuje na istotny wpływ naprężenia na przebieg procesu pełzania. Procesu pełzania materiałów z tworzyw sztucznych nie można zatem opisać za pomocą jednej krzywej podatności, co oznacza, że materiały wykazują nieliniowe zachowanie lepkie. Podatność na pełzanie badanych materiałów zależy zarówno od czasu, jak i od wartości naprężenia (Liu, 2007). W konsekwencji każdy materiał może charakteryzować inna, unikalna wartość podatności na pełzanie (Findley i in., 1989). Ogólną postać odpowiedzi na obciążenie materiału lepkosprężystego, dla zależności naprężenie-odkształcenie-czas, przedstawiono graficznie na Rys. 3-8.



Rys. 3-8 Zależność naprężenie-odkształcenie-czas
w materiałach lepkosprężystych (Bozorg-Haddad i in., 2010)

Fig. 3-8 Stress-strain-time relationships in viscoelastic materials (Bozorg-Haddad i in., 2010)

Opis procesu relaksacji naprężeń w funkcji czasu działania obciążenia można przedstawić w formie trzech różnych krzywych $J(t)$. Bardzo obrazowo przedstawił to Janson (Janson, 1993) jako zmianę w czasie odwrotności modułu odkształcenia E . Krzywe te zostały przedstawione na Rys. 3-9.



Rys. 3-9 Główne krzywizny relacji krzywej podatności J względem czasu (logarytmicznego) (Janson, 1993)

Fig. 3-9 Principal curvatures for the $\ln J$ versus $\log t$ relation (Janson, 1993)

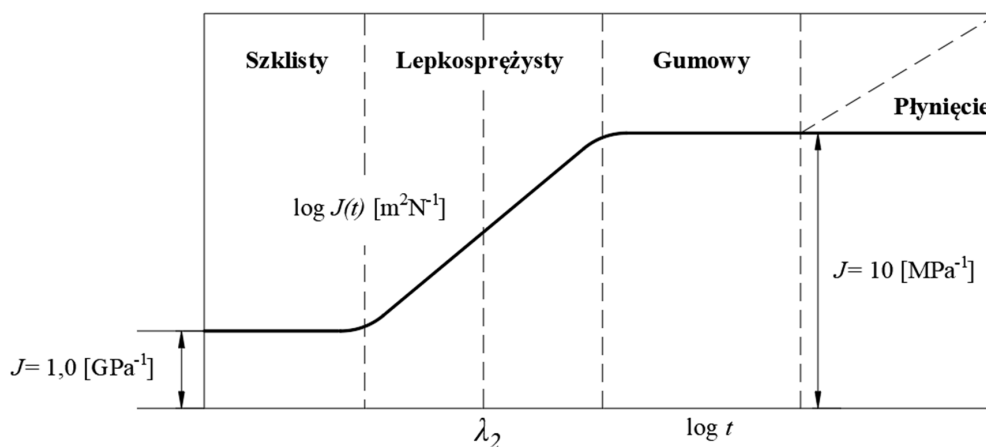
Krzywa I ilustruje wzrost J do nieskończoności w skończonym czasie. Oznacza to całkowite wygaśnięcie naprężenia i – w następstwie – właściwości sprężystych materiału, czyniąc go nieprzydatnym do zastosowań wymagających utrzymania długookresowej sztywności na odpowiednio wysokim poziomie, tak jak w przypadku każdej konstrukcji podziemnej poddanej działaniu obciążenia ciągłego w czasie.

Krzywa II opisuje stabilizację J dążącej asymptotycznie do pewnej stałej wartości (asymptoty poziomej). Naprężenie nie zanika całkowicie, lecz stabilizuje się w czasie na pewnym poziomie, zwanym rezydualnym.

Krzywa III, będąc linią prostą, wskazuje na nieograniczony wzrost J w nieskończonym czasie. Naprężenie nigdy nie spadłoby do zera, zbliżając się do tej wartości asymptotycznie. Moduł odkształcenia E wynosiłby wówczas zero.

Przy bardzo długich czasach badania obserwowana podatność na pełzanie $J(t)$ osiąga stałą, typową dla danego materiału wartość. W przypadku konstrukcji z tworzyw sztucznych, przeznaczonych do przenoszenia obciążeń długookresowych, oczekuje się odpowiedzi na obciążenie zgodnej z przebiegiem krzywej typu II, ewentualnie III. Zachowanie polimeru będzie zależać od skali czasowej eksperymentu w stosunku do pewnego podstawowego parametru czasu polimeru. W przypadku pełzania parametr ten nazywany jest czasem

opóźnień λ_2 (*retardation time*), jaka zmniejsza swoją wartość w środkowym zakresie skali czasowej, jak pokazano na schemacie Rys. 3-10.



Rys. 3-10 Krzywa podatności w funkcji czasu retardacji λ_2 (Ward i Sweeney, 2013)

Fig. 3-10 The creep compliance as a function of retardation time λ_2 (Ward i Sweeney, 2013)

Rozróżnienie między gumą a szklistym plastikiem można postrzegać jako umowne, ponieważ zależy wyłącznie od wartości λ_2 w temperaturze pokojowej dla każdego polimeru. W przypadku polimerów w stanie gumowatym, podatność ta może wynosić nawet 10 MPa^{-1} i jest niezależna od czasu. Oznacza to, że odpowiedź materiału na naprężenie, wywołane przyłożonym obciążeniem jest praktycznie natychmiastowa i nie wykazuje dalszego wzrostu odkształcenia w czasie. Po upływie odpowiednio długiego czasu, materiał taki zachowuje się jak ciało sprężyste o bardzo małym module odkształcenia, jego podatność osiąga stałą wartość (asymptotyczną), a dalsze pełzanie nie zachodzi. Podatność na pełzanie polietylenu HDPE przedstawiono w Tabeli 3-2.

Tabela 3-2. Podatność na pełzanie polietylenu HDPE (Beijer i Spoormaker, 2000; Janson, 1993; Ward i Sweeney, 2013)

Table 3-2 Creep compliance of HDPE polyethylene (Beijer i Spoormaker, 2000; Janson, 1993; Ward i Sweeney, 2013)

Lp.	Autor	$J(t) \text{ min}$ [GPa $^{-1}$]	$J(t) \text{ max}$ [GPa $^{-1}$]	Objaśnienia / Uwagi
1	Beijer and Spoormaker	0,63	1,39	Obliczone modelem Leadermana
2	Ward and Sweeney	1,70	2,60	Pomierzone wartości
3	Janson	1,80	6,50	Pomierzone wartości przy długookresowych badaniach

Kolejną cechą polimeru, kluczową dla jego właściwości mechanicznych i cieplnych, jest krystaliczność polimeru X_c , rozumiana jako udział fazy krystalicznej w polimerze (proporcję części krystalicznej do amorficznej) (Cheng, 2008). Można ją obliczyć w oparciu o znajomość entalpii topnienia (ΔH_m) korzystając z zależności (3.7) gdzie ΔH_t jest entalpią topnienia wzorca całkowicie krystalicznego. Średni poziom krystaliczności w polietylenie LDPE waha się w granicach 30-50 %, natomiast HDPE wykazuje średnią krystaliczność na poziomie 70-90 % (Posch, 2011):

$$X_c = \Delta H_m / \Delta H_t \cdot 100 \% \quad (3.7)$$

Zgodnie z normą (EN ISO 11296-4, 2011), wyróżnia się pełzanie krótkookresowe oraz długookresowe. Pełzanie krótkookresowe obejmuje odkształcenia pod stałym obciążeniem mierzone do ok. 10 000 godzin, a pełzanie długookresowe dotyczy odkształceń w czasie dłuższym od 10 000 godzin, które zwykle ekstrapoluje się do okresu projektowego np. 50 lat. Zrozumienie zachowania materiału w warunkach pełzania jest ważne zarówno w projektowaniu konstrukcji, jak i przygotowaniu technologii produkcji. Niewystarczająco staranne uwzględnienie tego zjawiska w projektowaniu może nie zapewnić stałości geometrii produktu końcowego podczas okresu eksploatacji, a także może doprowadzić do utraty właściwości użytkowych lub awarii nawet przy naprężeniach znacznie mniejszych niż występujące w standardowych testach niszczących, w szczególności na rozciąganie.

3.5. Modele pełzania HDPE

3.5.1. Wprowadzenie

W celu klasyfikacji modeli materiałowych opisanych w literaturze przedmiotu, można zdefiniować kilka zasadniczych kategorii ich oceny (W. Wang i in., 2015): dokładność odwzorowania danych doświadczalnych, liczba parametrów i ich sens fizyczny, łatwość numerycznej implementacji oraz możliwość zastosowania w symulacjach pracy rzeczywistych obiektów. W rozdziale opisano tylko modele stosowane do pełzania tworzyw sztucznych, w tym HDPE. Zestawienie opisanych w pracy modeli zawiera Tabela 3-3, w której przedstawiono podstawowe formuły autorów modeli do wyznaczenia odkształcenia w czasie $\varepsilon(t)$ z podziałem na rodzaj modelu oraz zakres stosowalności. W dalszej części rozdziału opisane zostały szczegółowo każdy z tych modeli z podziałem na modele liniowe, eksponentalne, całkowite i fizyczne.

Tabela 3-3. Empiryczne formuły obliczeniowe do wyznaczenia odkształceń materiałów lepkosprężystych przy pełzaniu w czasie

Table 3-3 Empirical formulas for calculating time-dependent creep strains in viscoelastic materials

Lp.	Rodzaj modelu	Autor	Nr zależności	Wzór	Stosowalność				Objaśnienia / Uwagi	
					Zakres odkształceń		Pełzanie			
					Małe	Duże	Krótko okresowe	Długo okresowe		
1	Liniowy	Jedno- elementowy	Kelvin-Voigt	(3.8)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K t}{\eta_K}} \right)$	TAK	NIE	TAK	NIE	Brak płynięcia
2	Liniowy	Jedno- elementowy	Maxwell	(3.9)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} t$	TAK	NIE	TAK	TAK	Stała prędkość pełzania
3	Liniowy	Złożony	Burgers	(3.10)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} t + \frac{\sigma_0}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K t}{\eta_K}} \right)$	TAK	NIE	TAK	TAK	Pełzanie I i II rzędu
4	Liniowy	Kompleksowy	Burgers zmodyfikowany (Sarabi)	(3.11)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} t + \frac{\sigma_0}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{t}{a\lambda_1^b}} \right)$	TAK	NIE	TAK	TAK	Pełzanie I i II rzędu
5	Nieliniowy	Wykładniczy,	Samarin	(3.12)	$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + a_1 \left(1 - e^{-t/\lambda_2} \right)$	TAK	NIE	TAK	NIE	Faza wtórna
6	Nieliniowy	Potęgowy	Findley	(3.13)	$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_T \cdot t^n$	TAK	NIE	TAK	TAK	
7	Nieliniowy	Potęgowo- wykładniczy	Hadid (HRZ)	(3.14)	$\varepsilon(t) = a \cdot \sigma^b \cdot t^c \exp(e\sigma)$	TAK	NIE	TAK	TAK	
8	Nieliniowy	Potęgowy	Norton - Bailey	(3.15)	$\varepsilon(t) = C \cdot \sigma^n \cdot t^m$	TAK	NIE	NIE	TAK	Wykorzystywany w MES, tylko dla pełzania II rzędu
9	Nieliniowy	Całkowy	Leaderman	(3.16)	$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t - \xi) \frac{d(G(\sigma))}{d\xi} d\xi$	TAK	NIE	TAK	TAK	Teoretyczny

Lp.	Rodzaj modelu	Autor	Nr zależności	Wzór	Stosowalność				Objaśnienia / Uwagi				
					Zakres odkształceń		Pełzanie						
					Małe	Duże	Krótko okresowe	Długo okresowe					
10	Nieliniowy	Całkowy	Pipkin i Rogers	(3.17)	$\varepsilon(t) = \int_0^t \underbrace{D_1\left(t - \lambda_{2,1}, \sigma(\lambda_{2,1})\right)}_{\text{rdzeń 1. rzędu}} \left(\frac{d\sigma(\lambda_{2,1})}{d\lambda_{2,1}}\right) d\lambda_{2,1}$ $+ \iint_0^t \underbrace{D_2\left(t - \lambda_{2,1}, \sigma(\lambda_{2,1}); t - \lambda_{2,2}, \sigma(\lambda_{2,2})\right)}_{\text{rdzeń 2. rzędu}} \cdot$ $\cdot \left(\frac{d\sigma(\lambda_{2,1})}{d\lambda_{2,1}}\right) \left(\frac{d\sigma(\lambda_{2,2})}{d\lambda_{2,1}}\right) d\lambda_{2,1} d\lambda_{2,2}$ $+ \iiint_0^t D_3(\dots) \left(\frac{d\sigma(\lambda_{2,1})}{d\lambda_{2,1}}\right) \left(\frac{d\sigma(\lambda_{2,2})}{d\lambda_{2,1}}\right) \left(\frac{d\sigma(\lambda_{2,3})}{d\lambda_{2,3}}\right) d\lambda_{2,1} d\lambda_{2,2} d\lambda_{2,3}$ $+ \dots$				TAK	NIE	TAK	TAK	Teoretyczny, wielokrotne całki
11	Nieliniowy	Fizyczny, sprężony	Abu Al-Rub	(3.18)	$\dot{\varepsilon}_{cr}(t) = \dot{\varepsilon}_{ve}(t) + \dot{\varepsilon}_{vp}(t) + \dot{\varepsilon}_{th}(t)$				TAK	TAK	TAK	TAK	Uszkodzenia
12	Nieliniowy	Termo- mechaniczny	Wang	(3.19)	$\dot{\varepsilon}_{cr} = \dot{\varepsilon}_{el} + \dot{\varepsilon}_{in} + \dot{\varepsilon}_{th}$				TAK	NIE	TAK	TAK	Wykorzystywany w MES, niezalecany do małych odkształceń i krótkookresowego pełzania Lepsza predykcja długotrwała. wymaga zastosowania algorytmów rozwiązania sprężonego układu równań różniczkowych
13	Nieliniowy	Fizyczny, złożony	Drozdov	(3.20)	$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$				TAK	TAK	TAK	TAK	

Objaśnienia do Tabela 3-3:

a, b, c, e	– stałe materiałowe modelu Hadida
a_1	– stała modelu Samarina, współczynnik wagowy (amplituda) dla składnika eksponentyjnego (maksymalna wartość, do której dąży składowa w czasie)
C, m, n	– stałe modelu Nortona - Bailey
$D(t - \xi)$	– funkcja opisująca podatność na pełzanie przy rozciąganiu, zależna od różnicy czasu między obciążeniem ξ a pomiarem t
D_1, D_2, D_3	– współczynniki poszczególnych rdzeni
E_K	– moduł odkształcenia (Kelvin)
E_M	– moduł odkształcenia (Maxwell)
$G(\sigma)$	– funkcja Leadermana zależna od naprężenia
t	– czas
ε_0	– odkształcenie początkowe po odjęciu części sprężystej
ε_T, n	– stałe modelu Findleya
$\varepsilon(t)$	– odkształcenie w chwili czasu t
$\dot{\varepsilon}_{ve}(t)$	– prędkość odkształcenia lepkosprężystego w czasie
$\dot{\varepsilon}_{vp}(t)$	– prędkość odkształcenia wiskoplastycznego w czasie
$\dot{\varepsilon}_{th}(t)$	– prędkość odkształcenia termicznego w czasie
$\dot{\varepsilon}_{el}$	– tensor prędkości odkształcenia sprężystego
$\dot{\varepsilon}_{in}$	– tensor prędkości odkształcenia lepkoplastycznego
$\dot{\varepsilon}_{th}$	– tensor prędkości odkształcenia termicznego
ε_e	– tensor odkształcenia sprężystego
ε_p	– tensor odkształcenia plastycznego
η_K	– lepkość (Kelvin)
η_M	– lepkość (Maxwell)
λ_1	– czas relaksacji
λ_2	– czas retardacji
ξ	– zmienna niezależna (reprezentująca czas pomiędzy chwilą przyłożenia obciążenia a chwilą pomiaru)
σ_0	– naprężenie początkowe
σ	– naprężenie rzeczywiste

3.5.2. Modele liniowe

Modele liniowe, są powszechnie spotykane w literaturze dotyczącej reologii i mechaniki materiałów do opisu procesów pełzania. Modele te opisują pełzanie jako kombinację reakcji sprężystej i lepkiej, wykorzystując liniowe zależności między naprężeniem a odkształceniem oraz ich pochodnymi czasowymi. Dzięki swojej prostocie i przejrzystości, modele te są szczególnie użyteczne do analizy podstawowych zjawisk pełzania oraz do przewidywania zachowania materiałów w krótkim i średnim okresie czasu. Jednak ich zastosowanie do opisu złożonych, nieliniowych efektów pełzania oraz długookresowych prognoz jest ograniczone ze względu na ich liniowy charakter opisu zmian odkształceń w czasie. Ograniczenia wynikają z liniowości założeń: modele te nie odwzorowują efektów nieliniowych związanych z uszkodzeniem, lokalną plastycznością, starzeniem fizycznym czy wilgotnością oraz nie zapewniają wiarygodnych prognoz w trzecim stadium pełzania.

Model Kelvina-Voigta

Jednym z najbardziej popularnych i podstawowych jest model Kelvina-Voigta, opisujący pełzanie w fazie pierwszej, krótkotrwałe (Ferry, 1980; Ostrowska-Maciejewska, 1994) jako połączenie równoległe sprężyny i elementu lepkościowego. Schemat ten poprawnie odzwierciedla krótkotrwałą podatność i skalę czasową procesu. Ograniczeniem jest brak prawidłowego opisu relaksacji naprężeń przy zadanym odkształceniu oraz brak płynięcia ustalonego w długim czasie, co wymusza stosowanie modeli rozszerzonych przy analizie długotrwałej. Model ten jest przedstawiany wzorem (3.8 – Tabela 3-3).

Model Maxwella

Model Maxwella składa się z połączenia szeregowego sprężyny i elementu lepkościowego. (Ostrowska-Maciejewska, 1994). Jego równania opisujące naprężenie i odkształcenie są liniowe względem tych wielkości. Opisuje on pełzanie w pierwszej i drugiej fazie i jest przedstawiany wzorem (3.9 – Tabela 3-3). Dostarcza wiarygodnej charakterystyki zaniku naprężeń w czasie przy wymuszonym odkształceniu oraz stałej prędkości odkształcania przy obciążeniu stałym. Nie odtwarza jednak typowego dla polimerów efektu malejącej prędkości pełzania w fazie pierwotnej, dlatego w analizie krótkotrwałej jest najczęściej łączony z gałęzią Kelvina-Voigta.

Model Burgersa

Model Burgersa jest szeregowym układem modelu Maxwella i modelu Kelvina. Przy stałym naprężeniu początkowym σ_0 odtwarza on jakościowo zachowanie pełzania z początkowym odkształceniem sprężystym oraz pierwotnym i wtórnym odkształceniami pełzania. Wyraża się on w postaci (3.10 – Tabela 3-3) (Ferry, 1980; Rech i in., 2022; Zhao i in., 2024). W przypadku długich czasów pełzania lepkość η_K określa pełzanie w sposób czasowo-liniowy, co nie odzwierciedla rzeczywistego zjawiska pełzania większości materiałów. Nie uwzględnia on również trzeciego stadium pełzania, w którym następuje nieliniowy przyrost odkształceń w czasie (G.-F. Wang i in., 2020).

Model Burgersa zmodyfikowany (Sarabiego)

Sarabi (Sarabi, 1986), aby nadać modelowi Burgersa więcej ogólności i uwzględnić zarówno stałe, jak i trzecie stadium pełzania, wprowadził lepkość $\eta_K = a\lambda_1^b$ zależną od czasu retardacji, co doprowadziło do powstania wersji zmodyfikowanej modelu Burgersa w postaci wzoru (3.11 – Tabela 3-3). Uzupełnienie modelu poprawiło zgodność z danymi w długim horyzoncie czasowym i umożliwiło częściowe uchwycenie przejścia od pełzania stałego do przyspieszonego, obserwowanego u części materiałów. Skutkiem ubocznym jest zwiększona złożoność identyfikacji parametrów oraz ograniczona jednoznaczność interpretacji fizycznej, co wymaga starannej kalibracji i walidacji na zestawach wielopoziomowych (Rech i in., 2022).

3.5.3. Modele wykładnicze

Uproszczone modele eksponentencjalne, opisywane w literaturze dotyczącej reologii i mechaniki materiałów są często i szeroko wykorzystywane do opisu procesu pełzania. Modele eksponentencjalne definiują pełzanie jako sumę odpowiedzi sprężystej i lepkiej, z czasem charakterystycznym opisującym prędkość procesu. Są szczególnie przydatne do opisu krótkotrwałego pełzania i relaksacji, ale ich zastosowanie do długookresowych prognoz jest ograniczone.

Model Samarina

Samarin (Samarin, 1974) bazując na modelu Kelvina-Voigta, zaproponował w swojej pracy metodę kolejnego izolowania składników eksponentencjalnych, która pozwala na bardzo dokładne aproksymowanie eksperymentalnych krzywych pełzania. Wykazał, że krzywe pełzania można z dużą dokładnością opisać sumą kilku składników (modułów) eksponentencjalnych. W tym celu opracował algorytm matematyczny (zwany jako

metoda kolejnego izolowania), który pozwala wyznaczyć parametry tych składników na podstawie danych eksperymentalnych:

$$\varepsilon(t) = \sum_{k=1}^n a_k (1 - e^{-\lambda_{2,k} t}) \quad (3.21)$$

gdzie: a_k – współczynnik wagowy (amplituda) dla k -tego składnika, $\lambda_{2,k}$ – stała czasowa retardacji k -tego składnika, n – liczba składników eksponentyjalnych.

Każdy z tych składników opisuje część całkowitego odkształcenia, która narasta w czasie z charakterystyczną prędkością, którą określa parametr stałej czasowej $\lambda_{2,k}$. W praktyce współczynniki te dobiera się iteracyjnie, dopasowując zwykle metodą najmniejszych kwadratów do pomiarów eksperymentalnych. Dla określenia pełzania w danej chwili czasu można zastosować wzór (3.12 – Tabela 3-3). Badacz wykazał, że podejście to jest uniwersalne i może być stosowane do różnych materiałów, w tym polimerów i tworzyw sztucznych. Wzór ten jednak wskazuje, że funkcja pełzania dąży do określonej wartości granicznej (asymptoty), czyli odkształcenie dąży do ustalonej wartości $\varepsilon_0 + a_1$ przy $t \rightarrow \infty$, w wyniku czego po pewnym czasie wzrost odkształcenia praktycznie ustaje. Dla krótkiego czasu pełzania polietylenu taki wzór bardzo dobrze aproksymuje dane, jednak w bardzo długim czasie nie uwzględnia w pełni zjawiska pełzania ustalonego (drugie stadium pełzania) (Samarin, 1974).

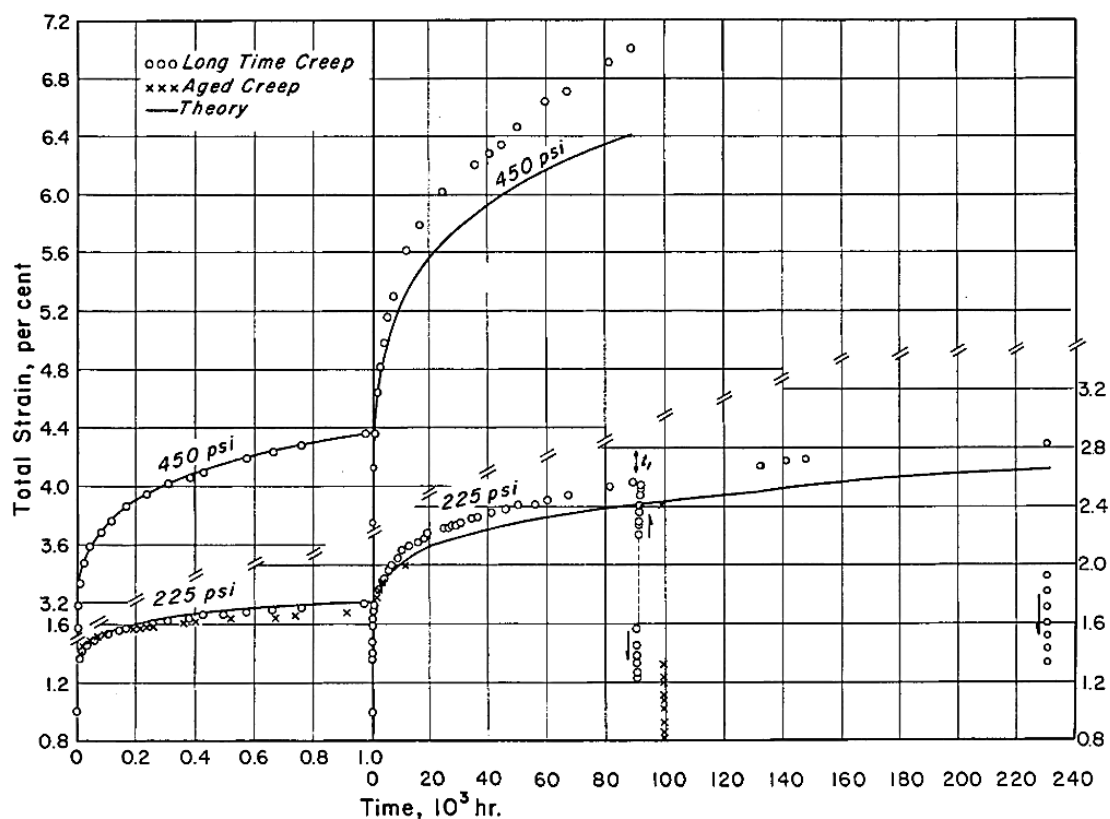
3.5.4. Modele potęgowe

Modele potęgowe są jednymi z najprostszych modeli empirycznych stosowanych do opisu pełzania polimerów. Opierają się na zależności potęgowej między odkształceniem a czasem i są szeroko stosowane w inżynierii ze względu na łatwość identyfikacji parametrów na podstawie krótkoterminowych badań. W rozdziale omówiono modele, które są najczęściej cytowane w literaturze i mają potencjał do zastosowań inżynierskich.

Model Findleya

Wyniki eksperymentów Findleya (1987), obejmujących pełzanie przy rozciąganiu, trwających 26 lat (230 000 godzin), prowadzonych na PCV i PE pokazały, że długookresowe pełzanie tych materiałów można dobrze przewidzieć na podstawie pełzania krótkookresowego (o czasie trwania 1900 godzin), korzystając z zależności (3.13 – Tabela 3-3). Zależność ta została zastosowana do opisu danych w pierwszych 1900 godzinach testu pełzania próbek. Na podstawie tych danych wyznaczono wartości stałych materiałowych. Przewidywane

modelem krzywe pełzania dobrze odzwierciedlały rzeczywiste odkształcenia, obserwowane w tym czasie (Rys. 3-11), jednak systematycznie zaniżały rzeczywiste odkształcenia w dłuższych czasach trwania badania. Model ten jest odpowiedni do opisu pełzania polimerów głównie przy niewielkich odkształceniach, gdzie ewentualne niedoszacowania mają ograniczone znaczenie praktyczne. W literaturze model częściej nazywany jest jako Findleya-Khosli oraz Równanie Potęgowe Ogólne (ang. *General Power-Law*) (Horvath, 1998).



Rys. 3-11 Krzywe pełzania polietylenu w temperaturze pokojowej (75°F) (Findley, 1987)

Fig. 3-11 Creep curves of polyethylene at room temperature (75°F) (Findley, 1987)

Model Hadida (HRZ)

Bardziej złożone równania empiryczne, jak np. model Hadida (Hadid i in., 2002), (Chevali i in., 2009), który nazywany jest modelem HRZ (inicjał nazwisk Hadid, Rechak i Zouani), uwzględnia dodatkowo, oprócz składnika potęgowego, wpływ wielkości naprężenia na parametry modelu. Zastosowano w nim podejście empiryczne w celu opracowania modelu lepkosprężystego opartego na prostym prawie potęgowym z parametrami zależnymi od naprężenia opisanego wzorem (3.14 – Tabela 3-3). Zaproponowany model wykazuje dużą wrażliwość na zmiany naprężenia i jest zgodny z danymi eksperymentalnymi w szerokim zakresie wartości naprężeń. Badanym materiałem był głównie Nylon 66 oraz HDPE, PP, czyste

i wzmacniane włóknami szklanymi. Weryfikacji modelu dokonano w badaniach trójpunktowego zginania w stosunkowo krótkim okresie, do 2000 sekund. Badacze do wyznaczenia odkształceń z przeprowadzonych badań zginania użyli, zgodnie z normą ASTM D2990, wzoru na naprężenie σ (3.22) i wzoru na odkształcenie w funkcji czasu $\varepsilon(t)$ (3.23):

$$\sigma = \frac{3F \cdot l}{2b \cdot h^2} \quad (3.22)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{6f(t) \cdot h}{l^2} \quad (3.23)$$

gdzie: F – siła obciążenia, l – rozpiętość próbki w osiach podpór, b – szerokość próbki, h – grubość próbki, zaś $f(t)$ – wartość ugięcia mierzona w środku rozpiętości w danej chwili czasowej t . Model ten może być stosowany jednak tylko w zakresie niewielkich odkształceń, ponieważ wzory (3.22) i (3.23) nie uwzględniają wpływu zmian geometrycznych próbki na rozkład sił przekrojowych.

Model Nortona - Bailey

Sformułowanie równań konstytutywnych pełzania wieloosiowego opiera się na pojęciu potencjału pełzania (*creep potential*) W i stowarzyszonej z nim reguły przepływu (*flow rule*). Powiązana zasada przepływu ma swoje korzenie w teorii plastyczności. Potencjał pełzania W określa się na podstawie danych doświadczalnych pełzania w jednoosiowym stanie naprężenia dla ustalonego zakresu naprężeń. Szeroko stosowanym do opisu pełzania metali i stopów w stanie ustalonym jest potencjał pełzania Nortona-Baileya-Odqvista (Naumenko i Altenbach, 2007):

$$W = \frac{\sigma_0}{n+1} \cdot \left(\frac{\sigma_{vM}}{\sigma_0} \right)^{n+1} \quad (3.24)$$

gdzie: σ_0 , n – stałe materiałowe, σ_{vM} – naprężenie von Misesa.

Prędkość odkształcenia przy pełzaniu jest określona przez pochodną potencjału względem tensora naprężenia. Zamiast wyznaczania pochodnej potencjału względem tensora naprężenia, można także posłużyć się warunkami płynięcia (*yield condition*) i wówczas prędkość pełzania (*creep strain rate*) jest określana przez parametr konsystencji (*consistency parameter*), a kierunek płynięcia przez wektor gradientu funkcji płynięcia. Najczęściej stosuje się regułę przepływu bez określania warunku przepływu, ale wówczas naprężenie aktywujące pełzanie jest zwykle dużo mniejsze od granicy plastyczności σ_y (Naumenko, 2006).

Badania Kolupayeva (2006) (Kolupaev, 2006; Naumenko, 2006) wykazały również, że przy takiej samej wartości naprężenia normalnego (z pominięciem znaku) prędkość pełzania przy rozciąganiu znacznie przewyższa prędkość odkształcenia przy ściskaniu. Zależność odkształcenia do czasu przy stałym naprężeniu i temperaturze opartej na prawie Nortona-Bayleya można opisać wzorem (3.15 – Tabela 3-3) (May i in., 2013).

3.5.5. Modele całkowite

Modele całkowite nieliniowej lepkośćprężystości są bardziej ogólne, ale też bardziej skomplikowane i trudne w stosowaniu ze względu na dużą liczbę testów potrzebnych do określenia wartości parametrów oraz podatność na niestabilność numeryczną procedur dopasowywania (Hadid i in., 2002; Lanzoni i Tarantino, 2021; Papanicolaou i Zaoutsos, 2011; Ward i Sweeney, 2013). Jednakże, mimo tych trudności, modele te odgrywają istotną rolę w opisie długookresowych właściwości deformacyjnych polimerów, zwłaszcza w przypadkach, gdy odkształcenia nie są małe, a zależność od historii obciążenia (czyli efekt pamięci materiału) ma kluczowe znaczenie. Pozwalają one bowiem na dokładniejsze uwzględnienie złożonych mechanizmów relaksacji naprężeń i pełzania, a tym samym na bardziej realistyczne prognozowanie zachowania materiału w czasie w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

Model Leadermana

Leaderman (Leaderman, 1962), jako jeden z pierwszych opisał nieliniowe zachowanie się włókien polimerowych przy pełzaniu. W tym celu wprowadził nieliniową miarę odkształcenia (3.16 – Tabela 3-3). Model Leadermana, jest odpowiedni do prawidłowego opisanie pełzania HDPE, o ile odkształcenia sytuują się wystarczająco daleko poniżej granicy plastyczności materiału, a dokładniej – poniżej wartości granicznej określonej jako 5 % wartości granicy plastyczności. Przewidywania tego modelu dla eksperymentów ze stałą prędkością odkształcania wykazują dobrą zgodność aż do chwili pojawienia się ogniska

uplastycznienia, ponieważ charakter przyjętych uproszczeń uniemożliwia opisanie plastyczności modelowanego materiału (Beijer i Spoormaker, 2000).

Model Pipkina i Rogersa

Model ten jest realizacją nieliniowej teorii superpozycji i uogólnia sformułowanie modelu Greena i Rivlina (Papanicolaou i Zaoutsos, 2011). Zastosowano go w analizie wyników eksperymentalnych Findleya i in. (*Creep And Relaxation...*, 2012), uzyskując dobrą zgodność z obserwacjami. Zgodnie z tym modelem reakcję lepkosprężystą polimeru można wyrazić w postaci szeregu całek (3.17).

Klasyczne równanie Greena i Rivlina w pierwszym członie daje odpowiedź liniową, zależną jedynie od czasu retardacji λ_2 . Równanie (3.17 – Tabela 3-3) jest nieliniowe już w pierwszym przybliżeniu, więc zachowana jest addytywność przyrostowych efektów naprężeń w sensie superpozycji Boltzmanna (Papanicolaou i Zaoutsos, 2011). Niestety takie podejście w symulacjach numerycznych przez estymację wielu jąder jest niestabilne i kosztowne ze względu na czas obliczeń.

3.5.6. Modele fizyczne

Bardziej zaawansowane modele pełzania opierają się na rzeczywistych fizycznych mechanizmach deformacji opisywanych na poziomie mikro i makrostruktury, uwzględniając sprzężone efekty lepkosprężystości, lepkoplastyczności i uszkodzeń. Badania na przestrzeni ostatnich kilku lat kładą coraz większy nacisk na zrozumienie fizycznych mechanizmów pełzania oraz rozwijanie modeli konstytutywnych opartych na tych mechanizmach. Szczególnie obiecującym kierunkiem jest łączenie efektów lepkosprężystości, lepkoplastyczności i uszkodzeń w ujednoliconych modelach sformułowanych dla dużych odkształceń (Abu Al-Rub i in., 2015; W. Wang i in., 2015). W rozdziale przedstawiono wybrane modele, które rozwinięte w ostatnich latach coraz dokładniej opisują mechanizmy pełzania w polimerach.

Model Abu Al-Ruba

Model Abu Al-Ruba (Abu Al-Rub i in., 2015) przedstawiony jako „*Thermo-viscodamage model*”, sformułowany w ujęciu dużych odkształceń, pozwolił z powodzeniem przewidzieć zachowanie polimeru PMMA (polimetakrylan metylu) w szerokim zakresie obciążeń, uwzględniając pełzanie III rzędu. Łączy on nieliniową lepkosprężystość typu Schapery’ego, lepkoplastyczność typu Perzyny i lepkie uszkodzenia zależne od naprężenia hydrostatycznego. Opracowany został również schemat blokowy aktualnego rekurencyjno-

iteracyjnego algorytmu Newtona-Raphsona skutecznego przy implementacji sprzężonego modelu lepkosprężystego, lepkoplastycznego i wiskouszkodzenia. Wynika stąd, że ewolucja uszkodzeń ϕ może być funkcją naprężenia efektywnego, $\overline{\tau}_{ij}$, naprężenia hydrostatycznego, $\overline{\tau}_{kk}$, odkształcenia ε_{ij} , prędkości odkształcania $\dot{\varepsilon}_{ij}$, temperatury T i historii uszkodzeń ϕ :

$$\dot{\phi} = F[\overline{\tau}_{ij}(t), \overline{\tau}_{kk}(t), \varepsilon_{ij}(t), \dot{\varepsilon}_{ij}(t), T(t), \phi(t)] \quad (3.25)$$

Proponowana przez autorów (Abu Al-Rub i in., 2015) forma prawa fizycznego, uwzględniająca m.in. efekty pełzania przez zależność od czasu t , nieliniową historię (kumulację) uszkodzeń $\phi(t)$ oraz sprzężenie z równaniami m.in. Schapery'ego, Voyiadjisa, Darabi'ego, przyjmuje postać jak we wzorze:

$$\dot{\phi} = \Gamma^{vd} \cdot \left[\frac{\bar{Y}}{Y_0} (1 - \phi)^2 \right]^q \cdot \exp(k \cdot \varepsilon_{eff}) \quad (3.26)$$

gdzie: Γ^{vd} – parametr lepkości przy uszkodzeniu oceniany w temperaturze odniesienia T_{ref} , T_{ref} – temperatura odniesienia, k , q – stałe materiałowe, $\varepsilon_{eff} = \sqrt{\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}}$ to efektywne lub równoważne odkształcenie całkowite, Y_0 – próg uszkodzenia określający, przy jakim efektywnej wartości naprężenia rozpoczyna się uszkodzenie, $\bar{Y}$ – siła powodująca uszkodzenie, ϕ – bezwymiarowa zmienna uszkodzeń (0 = brak uszkodzeń, 1 = całkowite zniszczenie),

Model ten pozwala uwzględnić różnicę w przebiegu uszkodzeń w warunkach obciążenia skurczowego i ekspansywnego (lub ściskania i rozciągania pod obciążeniem jednoosiowym) oraz pod ograniczonym naciskiem. ε_{eff} obejmuje zarówno części lepkosprężyste, jak i lepkoplastyczne, co pozwala na niejawne sprzężenia czasu, prędkości odkształcenia i temperatury. Model do wyznaczenia prędkości odkształceń w czasie $\dot{\varepsilon}(t)$ przedstawiono wzorem (3.18 – Tabela 3-3). Szczegółowy opis i wyprowadzenie prawa znajdują się w (Abu Al-Rub i in., 2015).

Model Wanga

Podobne podejście zastosowali Wang i in. (W. Wang i in., 2015) do opisu pełzania zmęczeniowego stali w warunkach wieloosiowego obciążenia termomechanicznego.

Zaproponowali ujednolicony lepkoplastyczny model konstytutywny (Perzyna-Chaboche) z uwzględnieniem uszkodzeń (osobno dla pełzania i zmęczenia), przeznaczony do symulacji zachowania przy pełzaniu i zmęczeniu wieloosiowym. Model ten łączy nieliniowe umocnienia izotropowe oraz kinematyczne i został zaimplementowany jako procedura UMAT w środowisku ABAQUS. Do badania jednoosiowego i wieloosiowego związku naprężenie-odkształcenie wykorzystano standardową próbkę i wydrążony cylinder wykonany ze stali X12CrMoWVNbN10-1-1, a w celu sprawdzenia działania modelu testy przeprowadzono w różnych warunkach temperatury i obciążenia. Badacze podają równania różniczkowe opisujące prędkość odkształcenia za pomocą tensora prędkości odkształcenia $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}$, jako sumy tensorów prędkości odkształcenia sprężystego $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{el}$, lepkoplastycznego $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{in}$ i termicznego $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{th}$ opisanego równaniem (3.19 – Tabela 3-3). Aby uzyskać wartość odkształcenia w czasie $\boldsymbol{\epsilon}(t)$, należy rozwiązać numerycznie równanie różniczkowe, krok po kroku w czasie za pomocą *solvera* FEM w ABAQUS.

Chociaż przeprowadzone badania potwierdzają dobrą zgodność tego modelu z eksperymentami w złożonym stanie naprężenia, to jednak nie zbadano jego przydatności do modelowania zachowania polimerów, a przynajmniej autor nie odnalazł prac dokumentujących takie badania.

Model Drozdova

Odrębnym nurtem w badaniach modeli pełzania i najbardziej obiecującym są współczesne modele pełzania HDPE oparte o zmienne wewnętrzne, które opisują ewolucję mezo- i mikrostruktury materiału. Na przykład, Drozdov (Drozdov i in., 2023) zaproponował model konstytutywny wiążący makroskopową odpowiedź HDPE z procesami deformacji na poziomie sferolitów, krystalitów i fazy amorficznej. Odkształcenie pełzające przy rozciąganiu $\boldsymbol{\epsilon}(t)$ należy wyznaczyć z równania (3.20 – Tabela 3-3).

W równaniu $\boldsymbol{\epsilon}_e$ jest tensorem odkształcenia sprężystego w czasie opisany wzorem:

$$\boldsymbol{\epsilon}_e(t) = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{E} + \kappa \cdot Z(t) \quad (3.27)$$

gdzie: E – moduł odkształcenia, $\boldsymbol{\sigma}$ – naprężenie rozciągające, κ – parametr opisujący udział wiązań odwracalnych, $Z(t)$ – funkcja opisana wzorem:

$$Z(t) = \int_0^{\infty} f(u) \cdot z(t, u) \, du \quad (3.28)$$

Funkcja $Z(t)$ (3.28) opisuje efekt opóźnionej (lepkosprężystej) odpowiedzi materiału, który wynika z istnienia tymczasowych wiązań w sieci polimerowej. Jest to całka po wszystkich możliwych typach mezodomen, różniących się energiami aktywacji, z których każda wnosi swój udział w relaksacji odkształcenia sprężystego w czasie.

Funkcja $z(t, u)$ (3.29) opisuje relaksację odkształceń sprężystych w konkretnej mezodomenie o zadanej energii aktywacji u . Sumuje ona wkład odkształcenia sprężystego, które pozostaje w konkretnej mezodomenie w chwili t biorąc pod uwagę to, jak szybko łańcuchy w danej domenie mogą zerwać swoje tymczasowe wiązania i zrelaksować naprężenia:

$$z(t, u) = \Gamma(u) \cdot \int_0^t \exp(-\Gamma(u)(t - \lambda_2)) \varepsilon_e(\lambda_2) \, d\lambda_2. \quad (3.29)$$

Funkcja wygaszania $\exp(-\Gamma(u)(t - \lambda_2))$ opisuje zjawisko, w jakim domeny relaksujące się z większą prędkością szybciej „zapominają” stare odkształcenia, a $\Gamma(u)$ to prędkość rozrywania wiązań. Odkształcenie sprężyste $\varepsilon_e(\lambda_2)$ zależy od chwili λ_2 .

Aby model był możliwy do zastosowania, polimer półkryształiczny został potraktowany jako równoważna sieć nieafiniczna łańcuchów polimerowych połączonych stałymi i tymczasowymi łańcuchami. Brak powinowactwa oznacza, że łańcuchy mogą ślizgać się względem swoich pozycji odniesienia w wyniku odkształcenia. Ponieważ proces poślizgu odzwierciedla przepływy lepkoplastyczne w fazie amorficznej i krystalicznej, zakłada się, że tensor odkształcenia plastycznego ε_p (wzór (3.30)) składa się z dwóch komponentów, które opisują przepływy w masowej fazie amorficznej ε_{pa} i krystalicznej ε_{pc} :

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pa} + \varepsilon_{pc} \quad (3.30)$$

Odkształcenie można również wyrazić wzorem, który opisuje dokładnie, poprzez superpozycję, odkształcenia fazy amorficznej i krystalicznej:

$$\varepsilon_p = A \cdot [1 - \exp(-\alpha\sqrt{t})] + B \cdot t \quad (3.31)$$

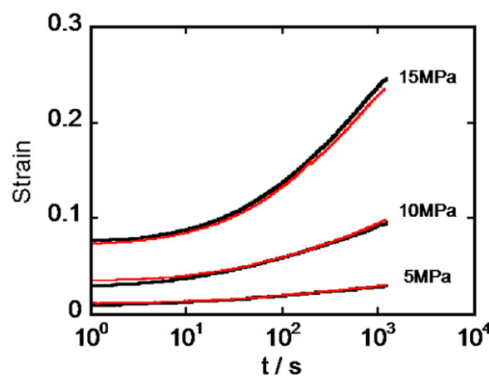
gdzie: α – współczynnik charakteryzujący prędkość poślizgu węzłów względem ich położeń początkowych, A – maksymalne odkształcenie lepkoplastyczne wywołane przesuwaniem się połączeń pomiędzy łańcuchami, B – współczynnik zależny od naprężenia progowego σ^* , σ^* – naprężenie progowe, poniżej którego nie obserwuje się pełzania lepkoplastycznego (jedynie czysto sprężyste). Jeżeli wartości naprężenia są mniejsze od wartości progowej to $B = 0$. Jeżeli są większe to współczynniki B_1 i n dobierane są przez dopasowanie:

$$B = 0 \quad \text{dla} \quad (\sigma < \sigma^*) \quad (3.32)$$

$$B = B_1 \cdot (\sigma - \sigma^*)^n \quad \text{dla} \quad (\sigma \geq \sigma^*) \quad (3.33)$$

3.5.7. Inne doświadczenia w badaniach pełzania tworzyw sztucznych

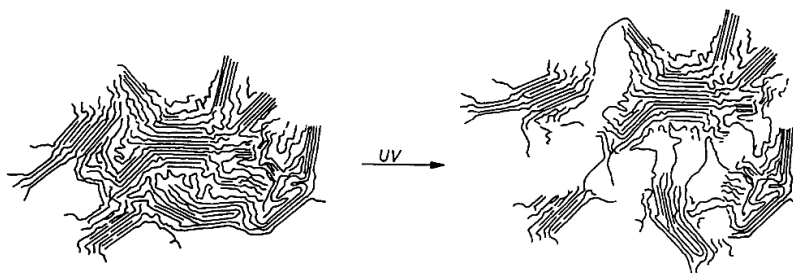
Badacze Nitta i Maeda udoskonaliли typowy normowy aparat do badań pełzania, przez wprowadzenie sposobu kontroli obciążenia zewnętrznego na podstawie zmian pola przekroju poprzecznego próbki podczas rozwoju procesu deformacji (Nitta i Maeda, 2010). Taka konstrukcja aparatu umożliwiła utrzymanie wartości naprężenia na stałym poziomie. Wyniki badań zależności odkształcenia od zmian wymiarów próbki podczas pełzania, przeprowadzone na tym aparacie (Rys. 3-12), pozwoliły m. in. na wykazanie, że wymiary próbek nie mają wpływu na odkształcenia przy osiowym rozciąganiu. Badania przeprowadzono na HDPE o różnym stopniu krystaliczności, w zakresie temperatur 22-100°C.



Rys. 3-12 Odkształcenia pełzające próbek o różnych wymiarach: 10 x 0,2 mm (czarna linia), 5 x 0,5 mm (czerwona linia) przy rozciąganiu osiowym ze stałym, kontrolowanym naprężeniem (t / s – czas w sekundach) (Nitta i Maeda, 2010)

Fig. 3-12 Creep strains of samples of different dimensions: 10 x 0.2 mm (black line), 5 x 0.5 mm (red line) under axial tension with constant, controlled stress (t / s – time in seconds) (Nitta i Maeda, 2010)

Wielu badaczy skupia swoją uwagę również na wpływie czynników atmosferycznych na właściwości mechaniczne polietylenów (Rabek, 1996; Rajakumar i in., 2009; Satoto i in., 1997), w tym także z recyklingu (Homkhiew i in., 2014; Kartalis i in., 2000; Lynch i in., 2004). Jedną z interesujących prac jest dzieło Albozahida (Albozahid i in., 2021), którzy badali wpływ promieniowania UV i wilgotności na właściwości mechaniczne polietylenu o małej (LDPE) i o dużej gęstości (HDPE). Próbki poddano działaniu promieniowania UV przy różnych okresach ekspozycji, równych 60, 90 i 120 godzin, a także działaniu wilgoci przez 500 i 1000 godzin. Z badań wynika, że ekspozycji na promieniowanie UV towarzyszył wzrost wytrzymałości na rozciąganie aż do 60 godziny badania. Po wydłużeniu czasu ekspozycji wartość wytrzymałości malała. Podobny trend wykazywał moduł odkształcenia. Wzrost tych wartości może być spowodowany sieciowaniem łańcuchów polimerowych. Przy dłuższej ekspozycji zachodzą prawdopodobnie degradacja i zrywanie wiązań (Rys. 3-13). W przypadku badania ekspozycji na wilgoć, wartości wytrzymałości na rozciąganie i modułu odkształcenia również wzrastały przez okres do 500 h, po czym, analogicznie jak w przypadku ekspozycji na promieniowanie UV, zaczynały dynamicznie maleć do wartości poniżej wartości referencyjnej. Badacze tłumaczą ten efekt absorpcją wilgoci przez polimery, jaka prowadzi do zmian objętości swobodnej materiału, co wpływa na właściwości mechaniczne. Szczególne znaczenie ma to w przypadku infrastruktury podziemnej, gdzie w kontakcie z wodami gruntowymi czynnik ten może prowadzić do negatywnych skutków ze względu na utrzymanie wymaganego poziomu niezawodności oraz trwałość konstrukcji lub instalacji.



Rys. 3-13 Schemat utleniania obszaru amorficznego w polimerze półkryształicznym przez UV powodującym rozerwanie łańcucha (Rabek, 1996)

Fig. 3-13 Scheme of oxidation of the amorphous region in a semi-crystalline polymer by UV radiation causing chain scission (Rabek, 1996)

Zaawansowane techniki badawcze, oparte na zjawisku rozpraszania promieni X, czy spektroskopia mechaniczna, pozwalają dokładniej obserwować i lepiej zrozumieć zmiany strukturalne zachodzące podczas pełzania polimerów na poziomie molekularnym (Hiss i in., 1999). W przypadku procesów o charakterze długotrwałym ważnym czynnikiem jest

też rodzaj środowiska, w szczególności jego wpływ na starzenie i plastyfikację HDPE w kontakcie z aktywnymi substancjami chemicznymi (Alrubaie i in., 2020). Coraz częściej analizowane jest też pełzanie w złożonych stanach obciążenia, istotnych z praktycznego punktu widzenia, takich jak zginanie (Chevali i in., 2009), ściskanie (Kanthabhabha Jeya i Bouzid, 2018) czy ścinanie (Zou i in., 2016). Wymaga to zastosowania odpowiednich procedur eksperymentalnych i analitycznych.

3.6. Podsumowanie

Modele materiałowe wykorzystywane do opisu pełzania HDPE, charakteryzującą się różnym stopniem złożoności i zakresem zastosowania. Klasyczne liniowe modele reologiczne, takie jak model Maxwella, Kelvina-Voigta mają stosunkowo prostą i jednoznaczną budowę, jednak zwykle nie pozwalają na wystarczająco szeroki i dokładny opis silnie nieliniowego zachowania HDPE w procesie pełzania. Ani model Maxwella, ani model Voigta nie odwzorowują właściwie zachowania większości materiałów lepkosprężystych (Papanicolaou i Zaoutsos, 2011). Modele te opisują pełzanie, które zależy jedynie od czasu, podobnie jak modele Burgersa i Samarina.

Modele nieliniowe takie Findleya, Hadida czy Leadermana często uwzględniają wpływ naprężenia a także lepkosprężystość definiowaną jako małe odkształcenie przed przejściem w stan plastyczny lub bezpośrednio po nim, zanim pojawi się lokalne przewężenie, lub odkształcenie towarzyszące bardzo dużym naprężeniom. Te problemy nie mają praktycznego zastosowania w projektowaniu konstrukcyjnym, ponieważ konstrukcje nigdy nie powinny być poddawane obciążeniom powodującym nadmierne odkształcenia. Z perspektywy analizy strukturalnej, nadmierne uplastycznienie materiału lub wystąpienie pęknięć naprężeniowych jest uważane za awarię będącą skutkiem przekroczenia stanu granicznego użyteczności i przy projektowaniu należy ich bezwzględnie unikać (Liu, 2007). Nieliniowe uogólnienia tych modeli, np. szeregowo lub równoległe łączenie wielu elementów Maxwella z różnymi czasami relaksacji, w pewnym zakresie pozwalają na poprawienie odwzorowania charakterystyk doświadczalnych (Liu, 2007). Innym jeszcze rozwiązaniem jest wprowadzenie do równań konstytutywnych nieliniowych funkcji materiałowych, zależnych od naprężenia i temperatury, np. tak, jak w modelu Schapery'ego, Leadermana, Findleya i innych (Nitta i Maeda, 2010).

Na poziomie inżynierskim, do uproszczonego opisu pełzania HDPE często stosuje się równania empiryczne, takie jak model potęgowy Findleya (Findley, 1987) lub HRZ

(Chevali i in., 2009). Ich zaletą jest ograniczona liczba parametrów materiałowych, dających się łatwo zidentyfikować w oparciu o wyniki podstawowych testów pełzania materiału. Wczesne prace, jak np. Findleya (Findley, 1987) koncentrowały się na prostych testach pełzania przy rozciąganiu w stałych warunkach i modelowaniu empirycznym wyników za pomocą równań potęgowych. Rozbudowane równania konstytutywne, np. model Abu Al.-Ruba (Abu Al-Rub i in., 2015), cechują się większą uniwersalnością, ale wymagają wyznaczenia wielu parametrów w złożonych testach materiałowych, co może być trudne, skomplikowane i czasochłonne, a tym samym nieuzasadnione w warunkach i potrzebach projektowania i produkcji zbiorników. Modele fizyczne, jak (Drozdov i in., 2023), mają z kolei największy potencjał predykcyjny, gdyż opierają się na mechanizmach fizycznych pełzania, uwzględniając wiele własności fizycznych materiału. Są jednak skomplikowane obliczeniowo i koncepcyjnie, co wciąż skłania badaczy i praktyków do poszukiwania uproszczeń w celu prognozowania docelowych odkształceń na poziomie zastosowań praktycznych, to jest respektując ograniczenia wynikające z uwarunkowań technologicznych i oczekiwań odbiorców.

Wciąż jednak istnieje znaczna luka między zaawansowanymi, złożonymi modelami teoretycznymi a badaniami aplikacyjnymi prowadzonymi na elementach rzeczywistych obiektów wykonanych z HDPE. Weryfikacja przydatności modeli do prognozowania długookresowego pełzania towarzyszącego procesowi eksploatacji to jeden z głównych kierunków badań w nauce. Istotnym problemem charakterystycznym dla materiałów HDPE jest ich niejednorodność pod względem klasyfikacji gatunkowej, w odróżnieniu od klasyfikacji metali, takich jak stal, czy stopy aluminium. Odbiera to możliwość jednoznacznego zestawienia stałych materiałowych, szczególnie gdy stale rośnie wykorzystanie domieszek z recyklingu.

Zestawienie opisanych w pracy modeli zawiera Tabela 3-4, która podsumowuje informacje takie jak zakres stosowalności, rodzaj i czas badań, jakie pozwoliły na ich opracowanie. Wszystkie modele były zweryfikowane w badaniach laboratoryjnych, jednak zakres czasowy i liczba próbek, na których wykonano walidację, różnią się. Większość modeli została opracowana na podstawie badań rozciągania krótko i długookresowych, prowadzonych w różnych okresach czasu (nawet do 26 lat). Tylko dwa modele były weryfikowane na podstawie krótkookresowych badań zginania: model Burgersa dla HDPE (w czasie kilku dni) oraz model Hadida dla HDPE, PA66 i PP (w czasie kilku dni). Ze względu na pracę elementów zbiornika głównie na zginanie, zagadnienie te wymaga dalszych badań.

Tabela 3-4. Zestawienie modeli do opisu pełzania materiałów lepkosprężystych pod względem zakresu stosowalności i weryfikacji laboratoryjnej

Table 3-4 Overview of models for describing creep in viscoelastic materials with respect to applicability range and laboratory verification

<i>Model</i>	<i>Wzór</i>	<i>Zakres stosowalności</i>	<i>Typ materiału</i>	<i>Rodzaj badania</i>	<i>Czas badania</i>	<i>Liczba próbek</i>	<i>Zależność od czasu/naprężenia</i>	<i>Źródło</i>
Kelvin-Voigt	(3.8)	Krótkookresowe pełzanie opóźnione; brak stałej prędkości pełzania wtórnego	HDPE, inne polimery	Rozciąganie	min – h	1-10	czas	Ferry, (1980); Ward i Sweeney, (2013)
Maxwell	(3.9)	Pełzanie wtórne (stała prędkość); nie oddaje faz I/III	HDPE, inne polimery	Rozciąganie	min – h	1-10	czas	Ferry, (1980); Ward i Sweeney, (2013)
Burgers	(3.10)	Krótko i długookresowe,	HDPE	Rozciąganie, zginanie	h – d	1-10	czas	Ferry, (1980); Rech i in., (2022); Zhao i in., (2024)
Burgers (Sarabi)	(3.11)	Krótko i długookresowe,	HDPE, inne polimery	Rozciąganie	h – d	1-10	czas	Sarabi, (1986)
Samarin	(3.12)	Krótko i długookresowe,	Polimery	Rozciąganie	s – d	1-10	czas	Samarin, (1974)
Findley	(3.13)	Krótko i długookresowe, nieliniowe	HDPE, PVC	Rozciąganie	do 26 lat	1-10	czas, naprężenie	Findley i in., (1989); Chevali i in., (2009)
Hadid (HRZ)	(3.14)	Krótko i długookresowe, nieliniowe	PA66, HDPE, PP	Zginanie, rozciąganie	do 112 h	1-10	czas, naprężenie	Chevali i in., (2009)
Norton-Bailey	(3.15)	Pełzanie wtórne, długookresowe	HDPE, metale	Rozciąganie	h - d	1-10	czas, naprężenie	May i in., (2013)
Leaderman	(3.16)	Krótko i długookresowe,	HDPE	Rozciąganie	h – d	1-10	czas, naprężenie	Findley i in., (1989); Nitta i Maeda, (2010)
Pipkin-Rogers	(3.17)	Krótko i długookresowe,	Polimery	Rozciąganie	h - d	1-10	czas, naprężenie (nieliniowo)	Papanicolaou i Zaoutsos, (2011)
Abu Al-Rub	(3.18)	Zaawansowane, sprężone	PMMA	Rozciąganie	h – d	1-5	czas, naprężenie, uszkodzenia	Abu Al-Rub i in., (2014)
Drozdv	(3.19)	Zaawansowane, fizyczne	HDPE	Rozciąganie	h – d	1-5	czas, naprężenie, mikrostruktura	Drozdv i in., (2023)
Wang	(3.20)	Ogólny	metale, polimery	Rozciąganie	h – d	1-5	czas, naprężenie, uszkodzenia	Wang i in., (2015)

4. Cel, teza oraz nowość naukowa pracy

4.1. Uzasadnienie wyboru tematu

Konieczność racjonalnego gospodarowania zasobami wodnymi z wykorzystaniem podziemnej infrastruktury technicznej wykonanej z polietylenu o dużej gęstości (HDPE) oraz zapewnienia jej bezpiecznej eksploatacji w długotrwałym okresie czasu wskazuje na potrzebę poszukiwania nowych podejść do opisu charakteru pracy elementów bezciśnieniowych zbiorników podziemnych i ich projektowania w praktyce inżynierskiej. Zasadnicze znaczenie, ma precyzyjne rozpoznanie i sformułowanie wiarygodnego opisu zjawiska pełzania polietylenu o dużej gęstości. Ważne jest ustalenie istotnych czynników kształtujących proces odpowiedzi materiału na obciążenie i wybór lub opracowanie modelu konstytutywnego, który opisuje proces pełzania HDPE z pewnością pozwalającą na predykcję docelowej wartości odkształcenia materiału w wymaganym okresie czasowym. Tylko takie podejście pozwoli na praktyczne wykorzystanie wyników badań w projektowaniu i eksploatacji konstrukcji z HDPE.

4.2. Przedmiot, cel i teza pracy

Projektowanie bezpiecznych elementów infrastruktury wymaga wykonania czasochłonnych badań, niezbędnych do poprawnego określenia wartości modułów odkształcenia. Ze względu na kłopotliwość wykonywania takich badań poszukiwane są inne, mniej czasochłonne i pracochłonne metody wyznaczania wartości modułów odkształcenia HDPE, przyjmowanych w procesie projektowania.

Głównym problemem naukowym podjętym w pracy jest określenie możliwości trafnego prognozowania rozwoju oraz wartości długookresowych odkształceń elementów konstrukcyjnych podziemnych, bezciśnieniowych zbiorników retencyjnych z polietylenu o dużej gęstości. Warunek użyteczności prognozowanych odkształceń z perspektywy praktyki inżynierskiej będzie spełniony, jeśli zostaną one określane z wykorzystaniem modelu konstytutywnego uwzględniającego zjawisko pełzania, którego parametry wyznaczone są na podstawie krótkookresowych badań laboratoryjnych. Kluczowym zagadnieniem jest również ujęcie wpływu interakcji konstrukcji z gruntem, determinowanej przez właściwości zasypki i warunki obciążenia, na długoterminową odpowiedź materiałową zbiorników.

Przedmiotem rozprawy jest długookresowe pełzanie polietylenu o dużej gęstości badane przy jednoosiowym rozciąganiu i trójpunktowym zginaniu, od reżimu stabilnego do przyspieszonego. Obejmuje analizę odkształceń zależnych od czasu, ewolucję modułu

odkształcenia i krzywych izochronowych naprężenie-odkształcenie, a także weryfikację literaturowych modeli materiałowych i propozycję modelu konstytutywnego do prognozowania deformacji na poziomie inżynierskim.

Głównym celem pracy jest wyznaczenie krótkookresowych modułów odkształcenia na podstawie badań laboratoryjnych w zakresie umożliwiającym określenie modułów długookresowych oraz sformułowanie modelu konstytutywnego opisującego proces rozwoju zmian geometrycznych elementów konstrukcji, uwzględniającego historię obciążenia. Model powinien stanowić narzędzie dla projektantów do prognozowania deformacji bezciśnieniowych zbiorników podziemnych w horyzoncie czasowym odpowiadającym projektowanemu okresowi ich eksploatacji. Jednocześnie, model ma pozwalać na trafne (obciążone akceptowalnym błędem) wyznaczenie długookresowego modułu odkształcenia.

Dodatkowym celem pracy jest opracowanie praktycznie użytecznego modelu materiałowego umożliwiającego wykrywanie zjawiska pełzania III rzędu na podstawie krótkookresowych badań laboratoryjnych. Model ten powinien umożliwiać bieżącą kontrolę rozwoju procesu deformacji, wspierając racjonalną redukcję czasu badań w zakresie kontroli jakości.

W ramach realizacji celu głównego sformułowano następujące problemy badawcze wymagające rozwiązania:

- 1) Jak kształtuje się ilościowa zależność między naprężeniem a odkształceniem HDPE poddanemu stałemu obciążeniu?
- 2) Jakie czynniki decydują o odkształceniach elementów konstrukcji zbiornika z HDPE?
- 3) W jakim stopniu (zakresie) modele konstytutywne zjawiska pełzania, dostępne w literaturze odpowiadają potrzebom praktyki inżynierskiej?
- 4) Czy możliwe jest sformułowanie modelu konstytutywnego, opisującego pełzanie HDPE w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, użytecznego z punktu widzenia praktyki inżynierskiej oraz jaki jest jego zakres zastosowania?

Na potrzeby realizacji celu pracy sformułowano następującą tezę:
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.

4.3. Nowość naukowa i praktyczna

Nowość naukowa pracy polega na:

- 1) Przeprowadzeniu analizy porównawczej dostępnych modeli literaturowych w kontekście ich przydatności w praktyce inżynierskiej,
- 2) Opracowaniu nowego hybrydowego modelu materiałowego pełzania polietylenu o dużej gęstości, łączącego trzy mechanizmy odpowiedzialne za różne fazy procesu,
- 3) Opracowaniu modelu konstytutywnego, uwzględniającego długookresowe odkształcenia spowodowane zjawiskiem pełzania HDPE,
- 4) Ustaleniu zakresu stosowalności i ograniczeń modeli materiałowych i konstytutywnych na podstawie własnych badań eksperymentalnych.

Rozwiązanie problemów podjętych w pracy ma następujące praktyczne znaczenie:

- 1) Pozwoli na prognozowanie długookresowych deformacji zbiorników z polietylenu o dużej gęstości na etapie projektowania,
- 2) Będzie mogło stanowić wsparcie dla racjonalnej redukcji czasu badań w zakresie kontroli jakości elementów konstrukcyjnych z HDPE,
- 3) Umożliwi poprawę niezawodności infrastruktury retencyjnej w systemach gospodarki wodno-ściekowej, wykorzystującej komponenty z tworzyw sztucznych.

5. Badania laboratoryjne

5.1. Wprowadzenie

Badania eksperymentalne stanowią podstawowe źródło informacji o procesie pełzania HDPE, niezbędnych zarówno do konstrukcji modeli konstytutywnych, jak i bezpośrednio do projektowania (wymiarowania) konstrukcji. Typowe badania pełzania HDPE obejmują testy rozciągania, ściskania lub zginania w stałej temperaturze, przy stałym obciążeniu lub stałym odkształceniu (*PE Pipe*, 2006). Stanowiska badawcze powinny zapewnić stabilne oraz powtarzalne warunki w seriach testów długookresowych i gwarantować precyzyjny pomiar przemieszczeń. Znormalizowane procedury badań pełzania przy rozciąganiu i zginaniu trójpunktowym są przedmiotem norm (ASTM D790, 2017; ASTM D2990, 2017; ISO 899-1, 2017; ISO 899-2, 2003). Uzyskanie wyników użytecznych dla zastosowań praktycznych wymaga określenia zasad ustalania geometrii próbek oraz wartości naprężenia odpowiadających warunkom oddziaływania w rzeczywistym obiekcie i gwarantujących powtarzalność wyników badań (uśrednienie efektów wynikających z naturalnej niejednorodności materiału na poziomie odpowiadającym obiektowi rzeczywistemu).

5.2. Program badań

Badania laboratoryjne zostały zaprojektowane w celu kompleksowej analizy zachowania się polietylenu o dużej gęstości (HDPE) w warunkach długookresowego obciążenia zginającego i jednoosiowo rozciągającego przy dużych odkształceniach. Głównym celem było określenie parametrów lepkosprężystych materiału, niezbędnych do przewidywania trwałości konstrukcji bezciśnieniowych zbiorników podziemnych. Badania podzielono na 3 etapy: badania wstępne, główne i uzupełniające. Badania wstępne i główne wykonano w laboratorium Wytrzymałości Materiałów Zakładu Budownictwa Wodnego i Hydrauliki Politechniki Warszawskiej. W ramach badań wstępnych wykonano badania niszczące przy rozciąganiu i ściskaniu. Badania główne obejmowały dwa rodzaje testów: jednoosiowe rozciąganie i trójpunktowe zginanie przy stałym obciążeniu. Każdy z tych testów został zaprojektowany tak, by odwzorowywał rzeczywiste warunki eksploatacyjne zbiorników, uwzględniając zarówno krótkookresowe obciążenia eksploatacyjne, jak i długookresowe procesy pełzania materiału. Badania uzupełniające w zakresie rozpoznania cech materiału na poziomie mikrostruktury zostały przeprowadzone w laboratorium Zakładu Projektowania Materiałów w ramach współpracy z Zespołem Kompozytów Polimerowych na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej pod kierownictwem Pani dr Magdaleny

Jurczyk-Kowalskiej. Badania uzupełniające w zakresie badań krótkookresowych ściskania dennic z HDPE przeprowadzono w laboratorium Zakładu Produkcji firmy Uponor Infra Sp. z o.o., a symulacje numeryczne w laboratorium komputerowym Analiz Geo i Hydrotechnicznych w Zakładzie Budownictwa Wodnego i Hydrauliki Politechniki Warszawskiej.

Zakres i cel badań wykonanych w poszczególnych etapach zawarto w programie badań laboratoryjnych, przedstawionym w Tabeli 5-1.

Tabela 5-1 Program badań laboratoryjnych

Table 5-1 Laboratory testing program

<i>Etap</i>	<i>Zakres badań</i>	<i>Cel badań</i>
I – Badania wstępne	• Badania niszczące przy rozciąganiu (6 testów) • Badania rozciągania przy wymuszonym przemieszczeniu (2 testy) • Badania niszczące przy ściskaniu (2 testy)	Określenie podstawowych właściwości mechanicznych HDPE oraz ustalenie zakresu wartości naprężeń do badań głównych.
II – Badania główne	• Testy zginania próbek HDPE pod stałym obciążeniem (24 testy) • Testy rozciągania próbek HDPE pod stałym obciążeniem (12 testów)	Rozpoznanie cech materiału na podstawie badań krótkookresowych i długookresowych pod stałym obciążeniem, z uwzględnieniem zjawiska pełzania. Ilościowa analiza zjawiska pełzania oraz identyfikacja etapów pełzania (I, II i III rzędu) poprzez rejestrację przemieszczeń w funkcji czasu.
III – Badania uzupełniające	• Badania mikrostruktury HDPE za pomocą skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC), spektroskopii (FTIR-ATR), oraz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) (6 próbek) • Krótkookresowe badania ściskania dennic HDPE (4 testy) i analiza numeryczna	Analiza mikrostruktury materiału w tym m.in. ustalenie różnic w mikrostrukturze materiałów oraz rozpoznanie zachowania materiału pod obciążeniami złożonymi w rzeczywistym elemencie konstrukcyjnym zbiornika.

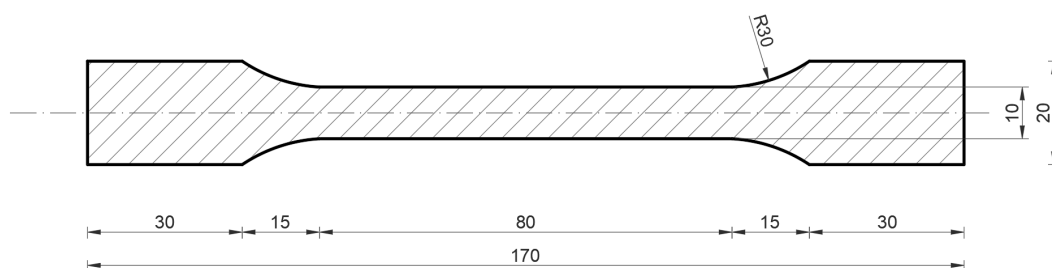
Łącznie wykonano 10 testów na etapie badań wstępnych i 36 na etapie badań głównych: 24 testy pełzania przy zginaniu i 12 testów pełzania przy jednoosiowym rozciąganiu. W przypadku badań głównych pełzania przy zginaniu, 8 testów wykonano na ma materiale pierwotnym (HDPE – oznaczanym w badaniach jako PE) oraz 16 testów na materiale z recyklingu (rHDPE – oznaczanym w badaniach jako RPE). Wszystkie testy na rozciąganie wykonano na materiale pierwotnym HDPE (PE).

5.3. Badania wstępne

5.3.1. Badania rozciągania – próby niszczące

Celem testów rozciągania było określenie wartości granicznych naprężeń rozciągających, jakie mogą wystąpić w materiale HDPE podczas statycznej próby niszczącej.

Do badań wykorzystano 6 próbek o tzw. geometrii „wiosełek”, wyciętych techniką *water jet* z profili HDPE przeznaczonych do formowania rur WEHOLITE, otrzymanych dzięki uprzejmości firmy Uponor Infra Sp. z o.o. Próbki miały przekrój poprzeczny o kształcie prostokątnym z główkami montażowymi, a ich wymiary wynosiły: długość całkowita 170 mm, długość pomiarowa 80 mm, grubość w zakresie 9,5-11,7 mm, oraz szerokość w zakresie $10,0 \pm 1$ mm (Rys. 5-1). Przygotowanie próbek przeprowadzono zgodnie z normą (ISO 527-2, 2012).



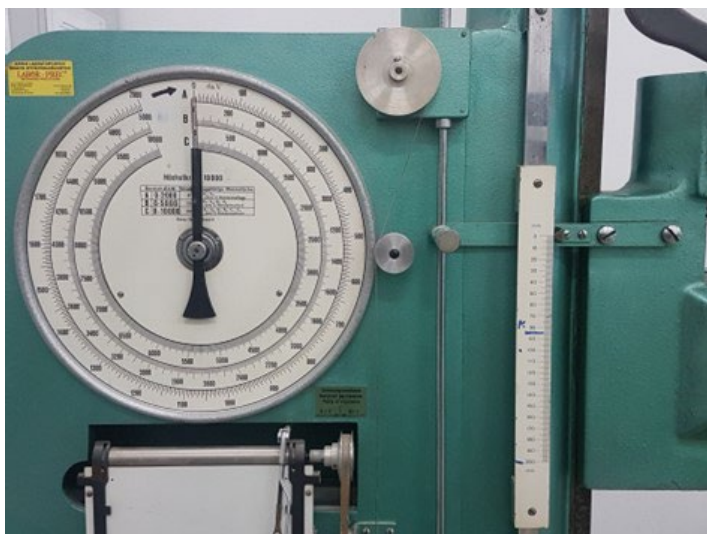
Rys. 5-1 Kształt i podstawowe wymiary próbki typu „wioselko” do badań pełzania przy rozciąganiu, zgodne z normą ISO 527-2:1993

Fig. 5-1 Shape and basic dimensions of a dogbone type specimen for creep testing under tension, compliant with the standard ISO 527-2:1993

Oznaczenia próbek przyjęto zgodnie ze schematem: **oznaczenie profilu / oznaczenie ścianki / nr próbki**. Przy czym do oznaczenia profilu i ścianki przyjęto symbole:

- **d** – duży profil (150x150 mm), **m** – mały profil (125x125 mm),
- **e4, e5, e6** – oznaczenia ścianek wg katalogu produkcyjnego.

Badanie rozciągania wykonano wykorzystując maszynę wytrzymałościową Heckert. Badanie wykonywano w temperaturze otoczenia, która wynosiła średnio $21 \pm 0,5$ °C. Pomiar dokonywany był za pomocą termometru elektronicznego. Wydłużenie próbki, ze względu na znaczne wartości wydłużenia, uniemożliwiające zastosowanie ekstensometru, odczytywano z przemieszczenia trawersy urządzenia o dokładności 0,5 mm (Rys. 5-2). Jako uśrednioną wartość bazy pomiarowej przyjęto 100 mm.



a)



b)

Rys. 5-2 Badania niszczące na maszynie wytrzymałościowej do rozciągania Heckert:
a) tarcza do pomiaru siły i wskaźnik przemieszczenia, b) próbka w fazie po osiągnięciu szyjki
Fig. 5-2 Tensile strength testing on a Heckert machine: a) force measurement dial and displacement indicator;
b) specimen at the necking stage

Próby rozciągania prowadzono w dwóch etapach: do chwili rozpoczęcia tworzenia się szyjki na próbce stosowano prędkość wydłużenia równą 5 mm/min., następnie, po zatrzymaniu i ponownym uruchomieniu maszyny, z maksymalną dostępną prędkością doprowadzano do zerwania próbki lub wyczerpania zakresu maszyny (Rys. 5-3).



Rys. 5-3 Próbki po zakończeniu testu rozciągania: a) próbka zerwana,
b) próbka wydłużona do wyczerpania zakresu maszyny wytrzymałościowej

Fig. 5-3 Specimens after completion of tensile testing: a) fractured specimen,
b) specimen elongated to the limit of the testing machine's range

Wyniki badań zestawiono w Tabeli 5-2. Do ustalenia maksymalnej wartości dopuszczalnego, krótkookresowego naprężenia normalnego przy rozciąganiu (superpozycja obciążenia stałego oraz obciążenia zmiennego krótkotrwałego) przyjęto wartość średnią naprężenia normalnego w chwili pojawienia się szyjki (σ), pomniejszoną o dwukrotność odchylenia standardowego. Jako podstawę do ustalenia wartości krótkookresowego naprężenia niszczącego przyjęto najmniejszą uzyskaną wartość maksymalnego naprężenia normalnego maksymalnego (σ_{max}), pomniejszoną o wartość średniej niepewności pomiarowej wyznaczonej dla tego naprężenia.

Tabela 5-2 Zestawienie wyników badań HDPE przy rozciąganiu – próba niszcząca

Table 5-2 Summary of HDPE tensile test results – destructive testing

L.p.	Oznaczenie próbki	Pole przekroju	Długość bazy pomiarowej	Sila	Naprężenie	Wydłużenie	Odkształcenie	Sila maksymalna	Naprężenie maksymalne
		A	l_0	F	σ	ΔL	ε	F_m	σ_{max}
		[mm ²]	[mm]	[N]	[MPa]	[mm]	[-]	[N]	[MPa]
1	m/e5/1	76,20	100,0	1150	15,09	13,50	0,14	1200	15,75
2	m/e5/2	82,95	100,0	1300	15,67	13,00	0,13	1350	16,27
3	m/e4/1	103,66	100,0	1300	12,54	7,50	0,08	1650	15,92
4	m/e4/2	97,42	100,0	1400	14,37	9,00	0,09	1600	16,42
5	d/e4/1	117,65	100,0	1700	14,45	9,00	0,09	2025	17,21
6	d/e4/2	128,05	100,0	2100	16,40	11,00	0,11	2250	17,57
Średnia:					14,75		0,11		16,52
Odchylenie standardowe:					1,33		0,01		0,72
Niepewność pomiarowa:					±0,54		±0,02		±0,30

Uwaga: F, σ , Δl i ε odnoszą się do chwili pojawienia się szyjki.

Na podstawie przeprowadzonych badań można przyjąć, że maksymalna wartość dopuszczalnego, krótkookresowego naprężenia normalnego przy rozciąganiu badanych próbek wynosi 12 MPa, zaś wartość krótkookresowego naprężenia niszczącego wynosi 15 MPa. Wartości te zostały zaokrąglone w dół do pełnych megapaskali ze względu na niepewność związaną z ustaleniem bazy pomiarowej oraz dokładności wskazań siłomierza maszyny wytrzymałościowej.

5.3.2. Badania rozciągania – pełzanie przy wymuszonym przemieszczeniu

Badanie rozciągania przy wymuszonym przemieszczeniu wykonano na 2 próbkach. Celem badania było rozpoznanie granicy stabilizacji naprężeń w próbkach przy wymuszonym przemieszczeniu w procesie relaksacji. Badanie polegało na obciążaniu próbek wyciętych z dużego profilu HDPE, o przekroju prostokątnym, oznaczonych jako d/e4/3 i d/e4/4, siłami o wartościach odpowiednio 1490 N i 1520 N, które odpowiadały wartości naprężenia średniego

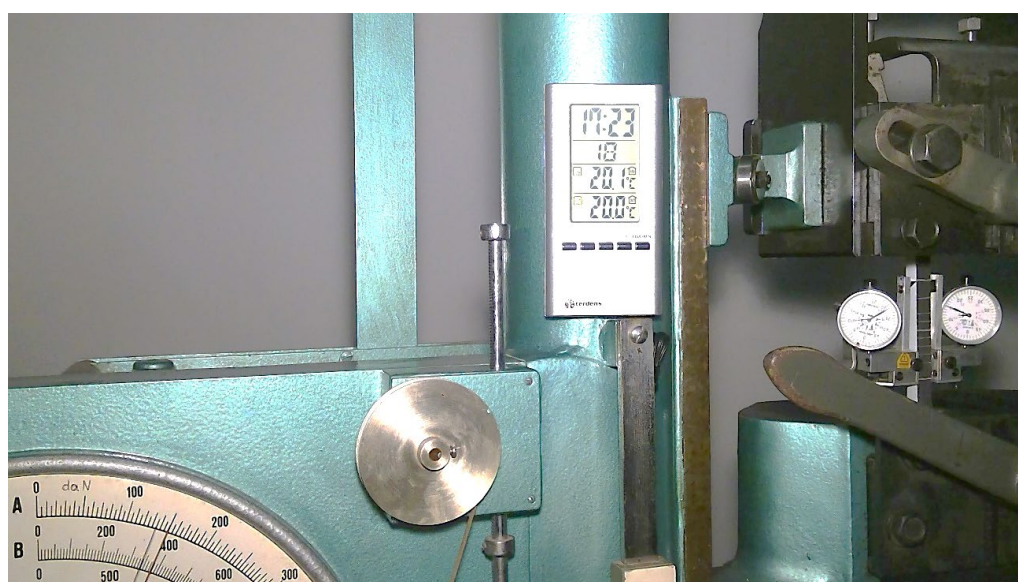
w przekroju poprzecznym, równego 12,01 MPa (Tabela 5-3). Badanie wykonane zostało za pomocą maszyny wytrzymałościowej Heckert.

Obie próbki charakteryzowały się bardzo zbliżonymi wymiarami geometrycznymi oraz wartościami naprężeń w trakcie testu rozciągania. Temperatura otoczenia podczas wykonywania badania wynosiła $20,1 \pm 0,9^{\circ}\text{C}$ dla próbki d/e4/3 oraz $19,7 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ dla próbki d/e4/4 i była mierzona za pomocą termometru elektronicznego. Wydłużenie próbki rejestrowano za pomocą ekstensometru motylkowego o zakresie 60 mm. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na (Rys. 5-4).

Tabela 5-3 Zestawienie wymiarów próbek rozciąganych przy wymuszonym przemieszczeniu i wartości charakterystycznych danych pomiarowych

Table 5-3 Summary of tensile specimen dimensions under imposed displacement and characteristic measurement values

<i>Parametr</i>	<i>Jednostka</i>	<i>d/e4/3</i>	<i>Niepewność</i>	<i>d/e4/4</i>	<i>Niepewność</i>
Średnia szerokość <i>b</i>	[mm]	10,47	$\pm 0,006$	10,58	$\pm 0,012$
Średnia grubość <i>h</i>	[mm]	11,85	$\pm 0,012$	11,96	$\pm 0,010$
Pole przekroju <i>A</i>	[mm ²]	124,03	$\pm 0,19$	126,54	$\pm 0,25$
Siła <i>F</i>	[N]	1490	$\pm 10,0$	1520	$\pm 10,0$
Naprężenie σ	[MPa]	12,01	$\pm 0,083$	12,01	$\pm 0,081$
Temperatura otoczenia <i>T</i>	[°C]	20,1	$\pm 0,9$	19,7	$\pm 0,4$
Łączny czas badania <i>t</i>	[h]	452	-	615	-

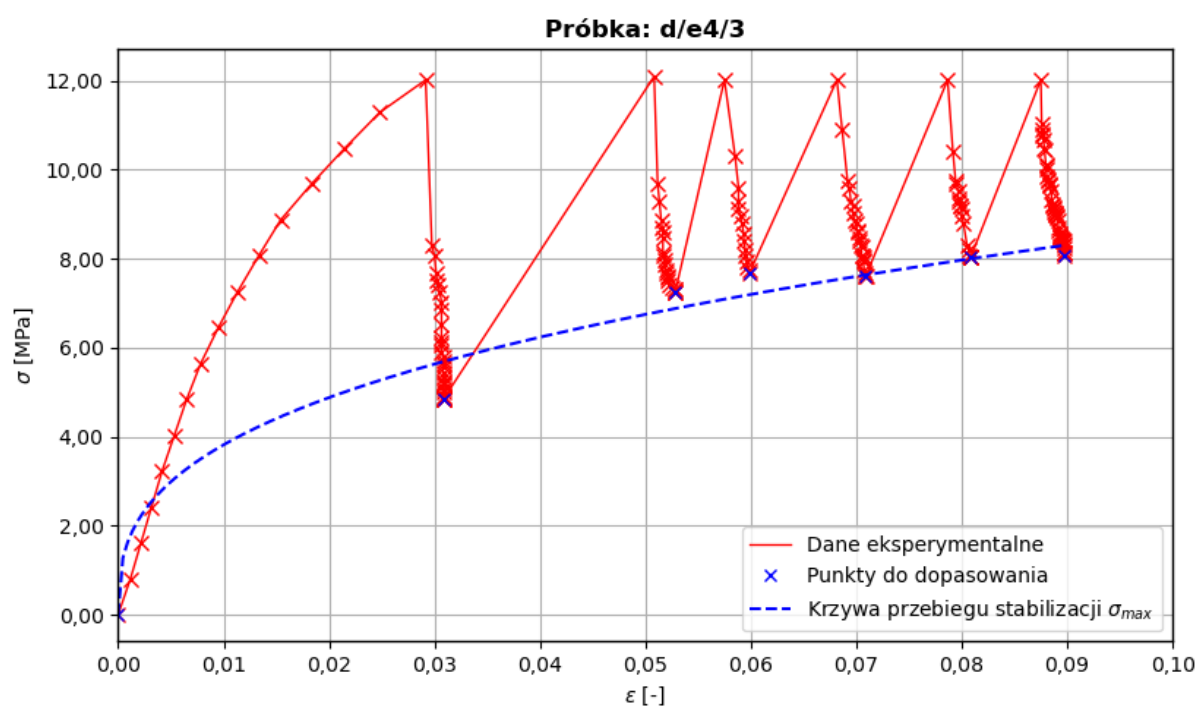


Rys. 5-4 Badania rozciągania przy wymuszonym przemieszczeniu na maszynie wytrzymałościowej do rozciągania Heckert. Po lewej tarcza do odczytu wartości siły, po prawej próbka umieszczona w szczękach maszyny oraz ekstensometr motylkowy, mierzący wydłużenie próbki

Fig. 5-4 Tensile testing under controlled displacement on a Heckert tensile testing machine. On the left, the force reading dial; on the right, the specimen mounted in the machine grips with a clip-on extensometer measuring specimen elongation

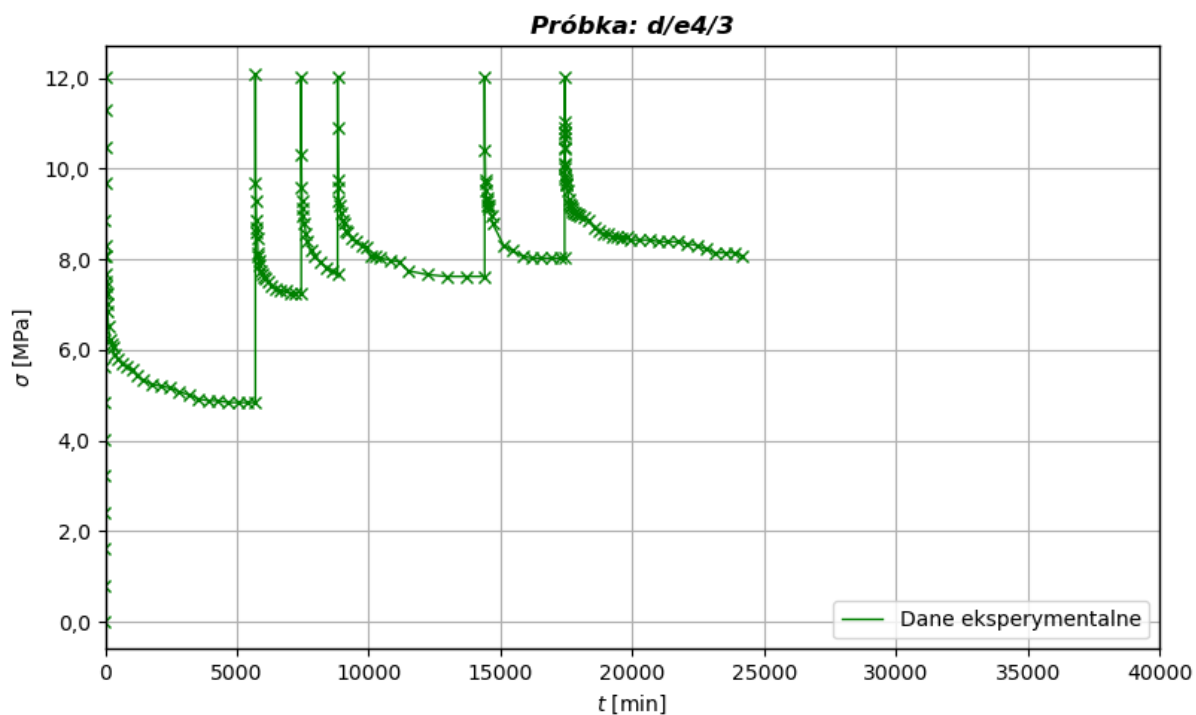
Utrzymując stałą wartość wydłużenia, próbki poddawane były relaksacji przez okres ok. 1000-5000 min., do momentu, w którym odczyty wydłużenia z czujnika pomiarowego nie różniły się od siebie więcej niż o 0,1 % odkształcenia. Po czym ponownie wyrównywano do wartości początkowej siły poddając próbki kolejnemu etapowi relaksacji. Maksymalnie wykonano 7 etapów relaksacji próbki d/e4/3 w czasie łącznym 27120 min. (452h) oraz 4 etapy relaksacji próbki d/e4/4 w czasie łącznym 36871 min. (615h).

Odczyty wskazań siłomierza oraz ekstensometru rejestrowane były za pomocą sekwencji fotografii wykonywanych w odstępach czasu definiowanych w każdym kroku testu. Zarejestrowane fotograficznie odczyty siły, przemieszczenia i temperatury zostały przeniesione do zestawienia tabelarycznego z maksymalną dostępną dokładnością. Przy zapisie wyników uwzględniano korektę paralaksy, ustaloną na podstawie odczytów bezpośrednich, wykonywanych na stanowisku pomiarowym w odstępach czasu od 5 min. do 24 godz., w zależności od prędkości rozwoju obserwowanego procesu. Wyniki pomiarów próbki d/e4/3 przedstawiono na wykresach Rys. 5-5 i 5-6, a próbki d/e4/4 na wykresach Rys. 5-7 i 5-8.



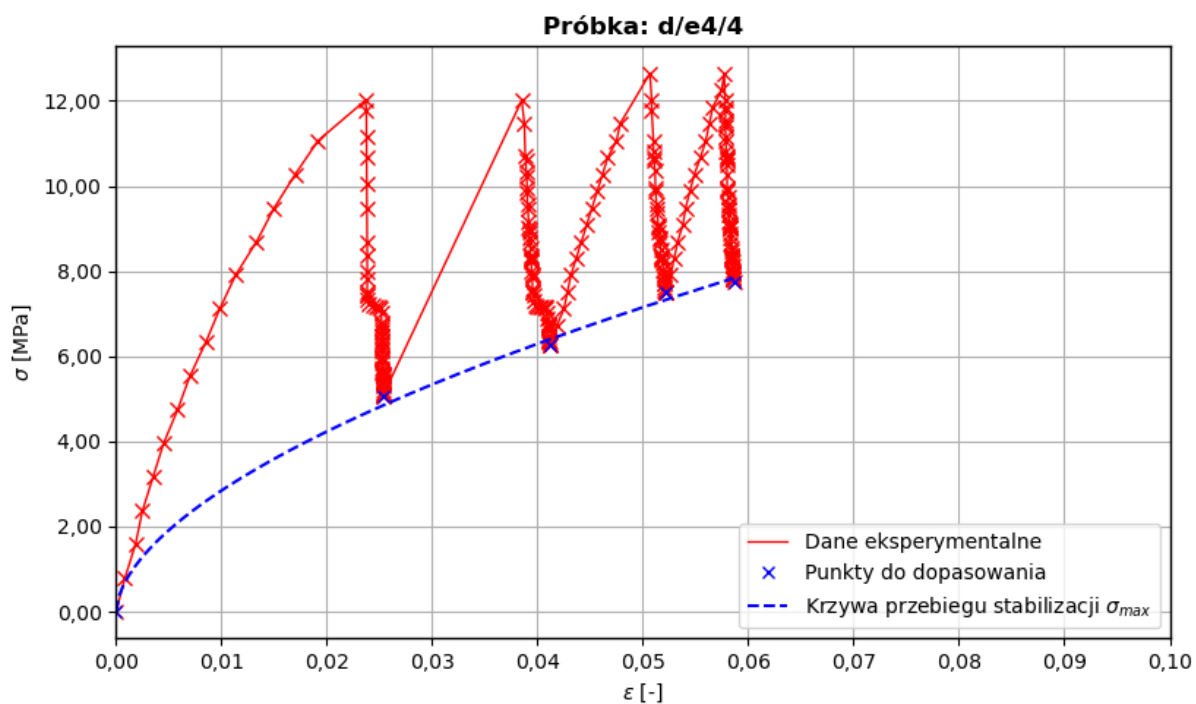
Rys. 5-5 Zależność naprężenie-odkształcenie dla próbki d/e4/3, materiał PE, w teście rozciągania. Niebieska krzywa prezentuje prognozowany przebieg stabilizacji maksymalnego naprężenia normalnego w warunkach obciążenia długookresowego

Fig. 5-5 Stress-strain relationship for d/e4/3 sample (PE material) in the tensile test. The blue curve represents the predicted stabilization of the maximum normal stress under long-term loading conditions



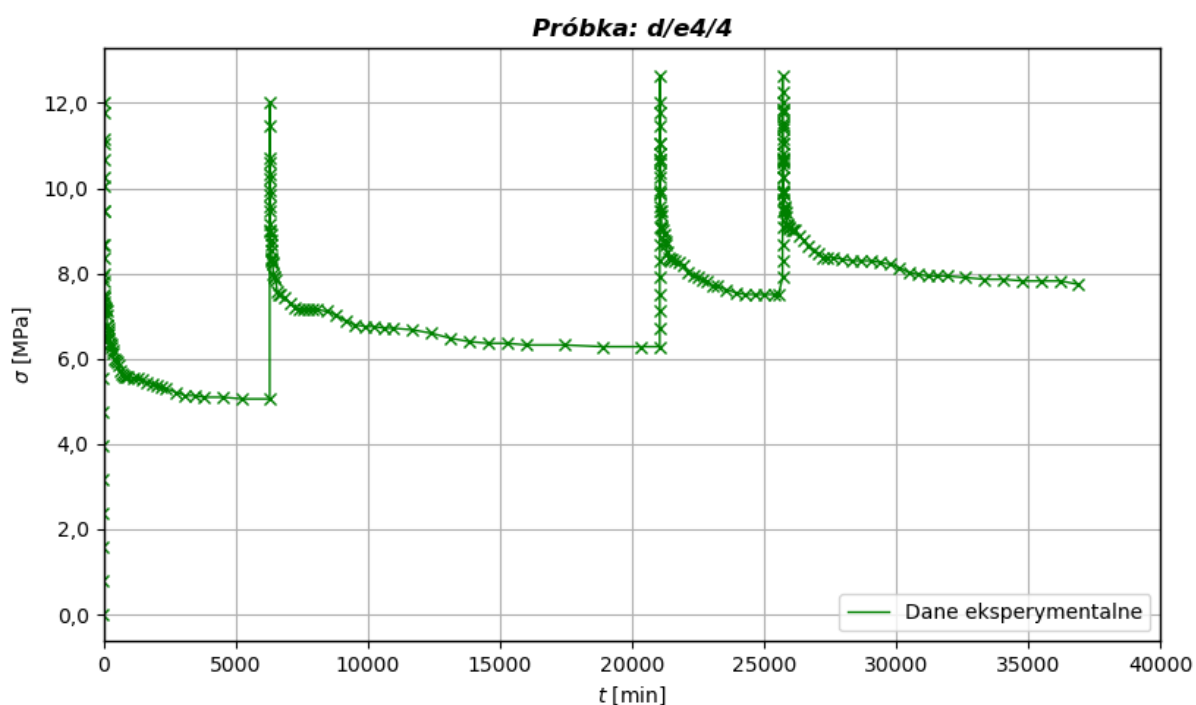
Rys. 5-6 Przebieg procesu relaksacji próbki d/e4/3, materiał PE, w teście rozciągania

Fig. 5-6 Relaxation process of d/e4/3 sample (PE material) in the tensile test



Rys. 5-7 Zależność naprężenie-odkształcenie dla próbki d/e4/4, materiał PE, w teście rozciągania. Niebieska krzywa prezentuje prognozowany przebieg stabilizacji maksymalnego naprężenia normalnego w warunkach obciążenia długookresowego

Fig. 5-7 Stress-strain relationship for d/e4/4 sample (PE material) in the tensile test. The blue curve shows the predicted stabilization of the maximum normal stress under long-term loading conditions



Rys. 5-8 Przebieg procesu relaksacji próbki d/e4/4, materiał PE, w teście rozciągania

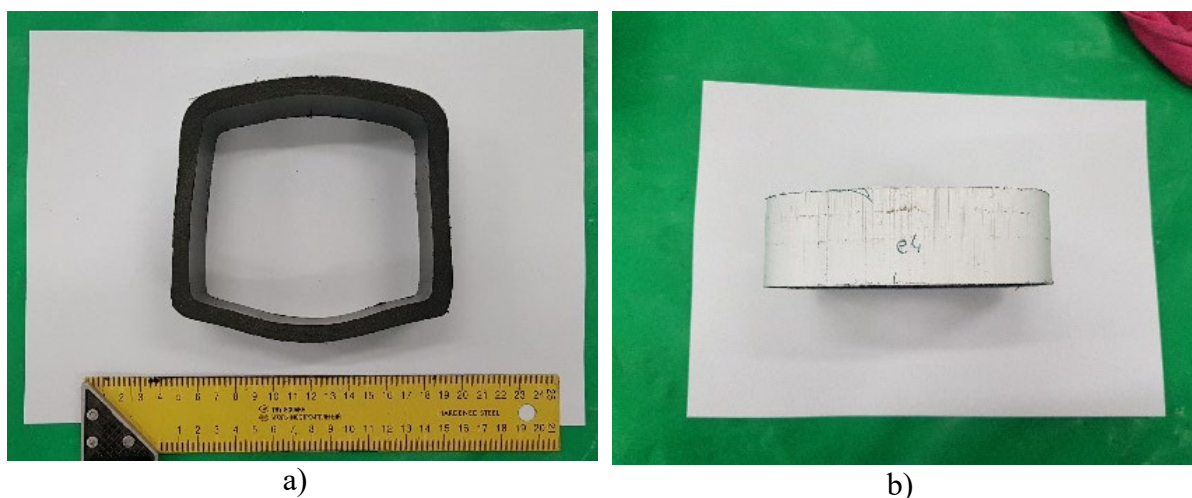
Fig. 5-8 Relaxation process of d/e4/4 sample (PE material) in the tensile test

W obu przypadkach naprężenie normalne przy rozciąganiu stabilizowało się na wartości ok. 8 MPa przy odkształceniu równym ok. 6-8 %. Charakter wykresu wskazuje, że dalszy wzrost obciążenia o charakterze długotrwałym będzie powodował rozwój procesu odkształcenia, bez istotnego wzrostu wartości siły stanowiącej długookresową odpowiedź materiału na obciążenie. Może więc prowadzić do niekontrolowanych, znacznych zmian geometrii elementu konstrukcyjnego, a w konsekwencji – w przypadku zbiorników podziemnych – do deformacji zasyпки (aż do powierzchni terenu) oraz sąsiadującej infrastruktury. Na wykresie (Rys. 5-7), w dwóch pierwszych cyklach relaksacji, widoczne są nagłe wzrosty odkształcenia próbki przy wartości naprężenia ok. 7 MPa. Ich przyczynami mogą być imperfekcje materiału próbki (niejednorodności powstałe na etapie przygotowania mieszanki surowca w procesie produkcji) w obrębie bazy pomiarowej lub w strefie kontaktu końcówek próbki ze szczękami maszyny wytrzymałościowej, względnie poślizg próbki w szczękach maszyny. W celu ustalenia jednoznacznej przyczyny tego zjawiska należałoby wykonać znacznie większą liczbę badań. Jeżeli jednak przyczyna ta leży po stronie materiału, może być źródłem znacznych rozrzutów wyników badań parametrów mechaniczno-wytrzymałościowych. W celu redukcji rozrzutów w przyszłości warto rozważyć zwiększenie wymiarów znormalizowanych próbek badawczych.

5.3.3. Badania ściskania

W celu oceny granicy wytrzymałości profili strukturalnych wykorzystywanych do produkcji dennic i korpusów zbiorników przeprowadzono nienormowe badania ściskania.

Statyczne, krótkookresowe testy ściskania wykonano przy użyciu uniwersalnej hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej ZD-20 na 2 próbkach. Próbki badawcze, wycięte z profilu PE, oznaczono jako S_M2 oraz S_M3 (Rys. 5-9). Były to proste odcinki profilu zamkniętego o różnych długościach. Pola przekroju poprzecznego próbek zostały splanimetrowane cyfrowo na podstawie skalibrowanych skanów przekrojów profilu na obu końcach każdej próbki, a do obliczeń przyjęto wartości średnie. Wyniki testów wraz z geometrią próbek zestawiono w Tabeli 5-4.



Rys. 5-9 Próбка S_M3 przygotowana do badania: a) widok z góry, b) widok z boku

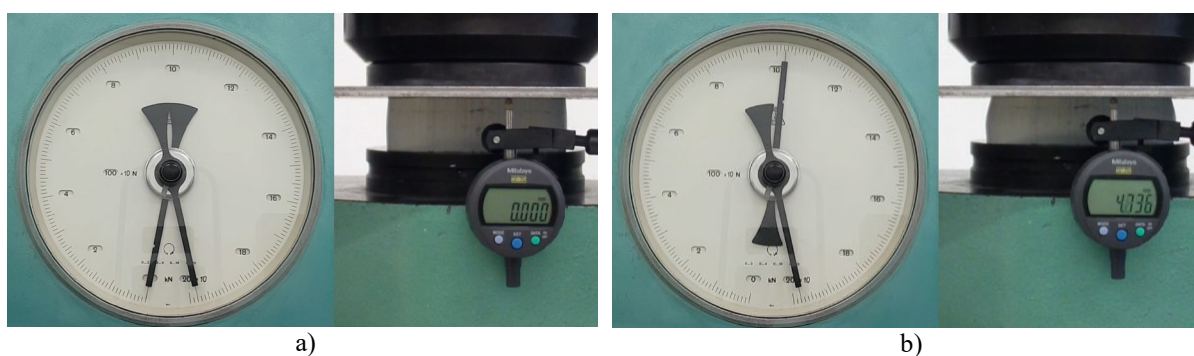
Fig. 5-9 Specimen S_M3 prepared for testing: a) top view, b) side view

Badania ściskania przeprowadzono z prędkością przesuwu głowicy równą 5 mm/min, aż do osiągnięcia maksymalnej wartości siły, a następnie do maksymalnej wartości zakresu pomiarowego elektronicznego czujnika przemieszczenia. Dokładność odczytu wartości siły z tarczy zegara wynosiła 1000 N. Temperatura otoczenia podczas badania wynosiła 21°C. Przykład próbki przygotowanej do badania oraz jej widok po zakończeniu testu przedstawiono na rysunku Rys. 5-10. Typowy przebieg testu ściskania, w postaci wykresu zależności naprężenia od odkształcenia dla próbki S_M3, zaprezentowano na Rys. 5-11. Maksymalne krótkookresowe naprężenia normalne przy ściskaniu wyniosły nie mniej niż 25 MPa przy maksymalnej wartości odkształcenia podłużnego równego ok. 10 %.

Tabela 5-4 Zestawienie wymiarów próbek z krótkookresowych testów ściskania i wyników przeprowadzonych testów

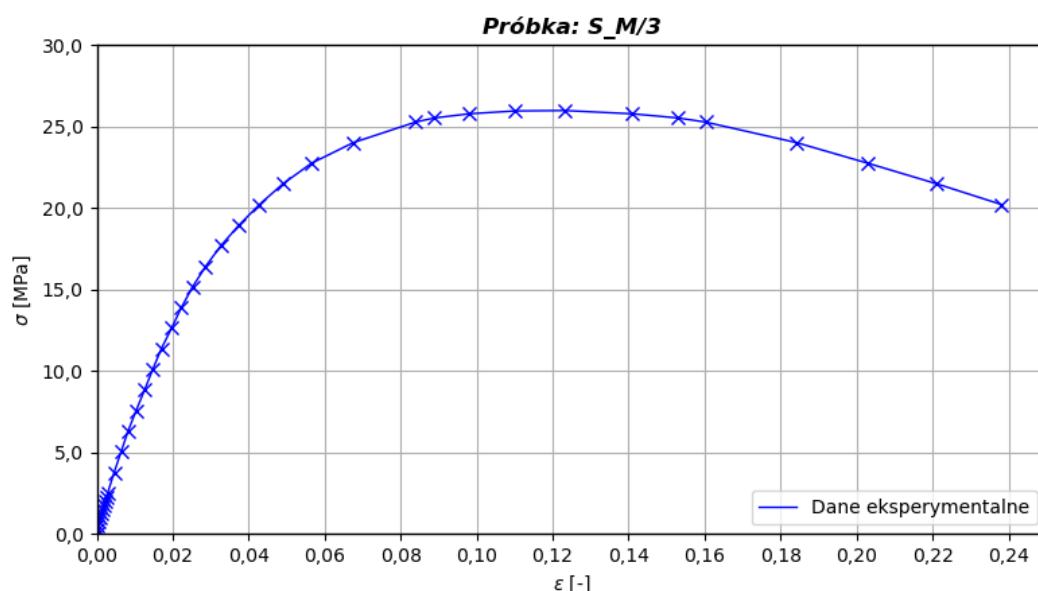
Table 5-4 Summary of specimen dimensions from short-term compression tests and corresponding test results

L.p.	Oznaczenie próbki	Pole przekroju	Długość początkowa	Maksymalna siła podłużna	Maksymalne naprężenie normalne
		A	l_0	F_m	σ_{max}
		[mm ²]	[mm]	[kN]	[MPa]
1	S_M2	3775,50	52,05	103,0	27,28
2	S_M3	3955,05	39,15	102,8	25,99
Średnia:					26,6
Odchylenie standardowe:					0,91
Niepewność pomiarowa rozszerzona (k=2):					0,7



Rys. 5-10 Test ściskania, próbka S_M3: a) próbka przed rozpoczęciem badania, b) próbka po uzyskaniu maksymalnej wartości obciążenia

Fig. 5-10 Compression test, specimen S_M3: a) specimen before testing, b) specimen after reaching maximum load



Rys. 5-11 Wykres testu ściskania – zależność naprężenia do odkształcenia, próbka S_M3

Fig. 5-11 Compression test graph – stress versus strain relationship, specimen S_M3

5.3.4. Podsumowanie

W ramach badań wstępnych przeprowadzono zarówno próby rozciągania, jak i ściskania na profilach strukturalnych z HDPE, wykorzystywanych w produkcji elementów zbiorników. Testy rozciągania pozwoliły na określenie maksymalnych wartości naprężeń rozciągających oraz krótkookresowych naprężeń niszczących, przy czym za wartość dopuszczalną naprężenia rozciągającego przyjęto 12 MPa, a za wartość niszczącą 15 MPa. W badaniach zaobserwowano zjawiska typowe dla materiałów polimerowych, takie jak powstawanie szyjki oraz znaczne wydłużenia próbek, a także relaksację naprężeń w warunkach długotrwałego obciążenia. Uzyskane wyniki wskazują, że naprężenie normalne stabilizuje się przy wartości ok. 8 MPa przy odkształceniu 6-8 %, co potwierdza podatność materiału na pełzanie i relaksację pod wpływem długotrwałych obciążeń. Według (US Fusion, 2021) bezpieczne naprężenie hydrostatyczne w temperaturze 23 °C dla materiału PE4710 (odpowiednik PE100) wynosi 1100psi co odpowiada ok. 7,6 MPa potwierdzając, że wyniki uzyskane dla przedmiotowego materiału mieszczą się w granicach wartości referencyjnych. Podobne rezultaty uzyskali również (Amjadi i Fatemi, 2021; Frank i in., 2009), którzy podczas badań HDPE odnotowali stabilizację naprężenia przy wartości ok. 8 MPa przy odkształceniach rzędu 5-10 % przy temperaturze otoczenia ok. 23 °C.

W testach ściskania, przeprowadzonych na próbkach o różnych wymiarach, uzyskano maksymalne krótkookresowe naprężenia normalne nie mniejsze niż 25 MPa, przy maksymalnym odkształceniu podłużnym ok. 10 %. Na podstawie tych wyników można zauważyć blisko dwukrotnie większą wartość wytrzymałości profili HDPE na ściskanie niż na rozciąganie. Należy jednak uwzględnić przy tym wysoką niepewność, wynikającą z warunków prowadzenia eksperymentu oraz specyfiki materiału.

Przeprowadzone badania wstępne dostarczyły istotnych informacji na temat zachowania się materiału w warunkach obciążeń statycznych i krótkotrwałych. Przeprowadzone testy pozwalają na ogólne zobrazowanie zachowania się materiału w warunkach dużych obciążeń, zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych, stanowiąc wartościowy punkt odniesienia do dalszych badań. Na ich podstawie przyjęty został plan badań głównych, gdzie ustalono zakresy naprężeń do badania pełzania przy zginaniu i rozciąganiu.

5.4. Badania główne

5.4.1. Wprowadzenie

Celem badań głównych była kompleksowa analiza zachowania polietylenu o dużej gęstości (HDPE) pod długookresowym obciążeniem zginającym i rozciągającym, prowadzonym w identycznych warunkach otoczenia.

Głównym celem było wyznaczenie parametrów lepkościowych, takich jak czas relaksacji oraz moduły odkształcenia krótko- i długookresowego, niezbędnych do oceny trwałości bezciśnieniowych zbiorników podziemnych. Dodatkowo oceniano wpływ geometrii próbek i rodzaju materiału na długookresową wytrzymałość. Szczególną uwagę poświęcono właściwościom mechanicznym HDPE w warunkach jednoosiowego rozciągania i trójpunktowego zginania. Badania przeprowadzono na stanowiskach pomiarowych przedstawionych na Rys. 5-12 i szczegółowo opisanych w podrozdziałach 5.4.2.1. (zginanie trójpunktowe) oraz 5.4.3.1 (rozciąganie jednoosiowe).



Rys. 5-12 Stanowiska do badania pełzania tworzyw sztucznych przy zginaniu oraz rozciąganiu

Fig. 5-12 Benches for creep testing of plastics under bending and tension

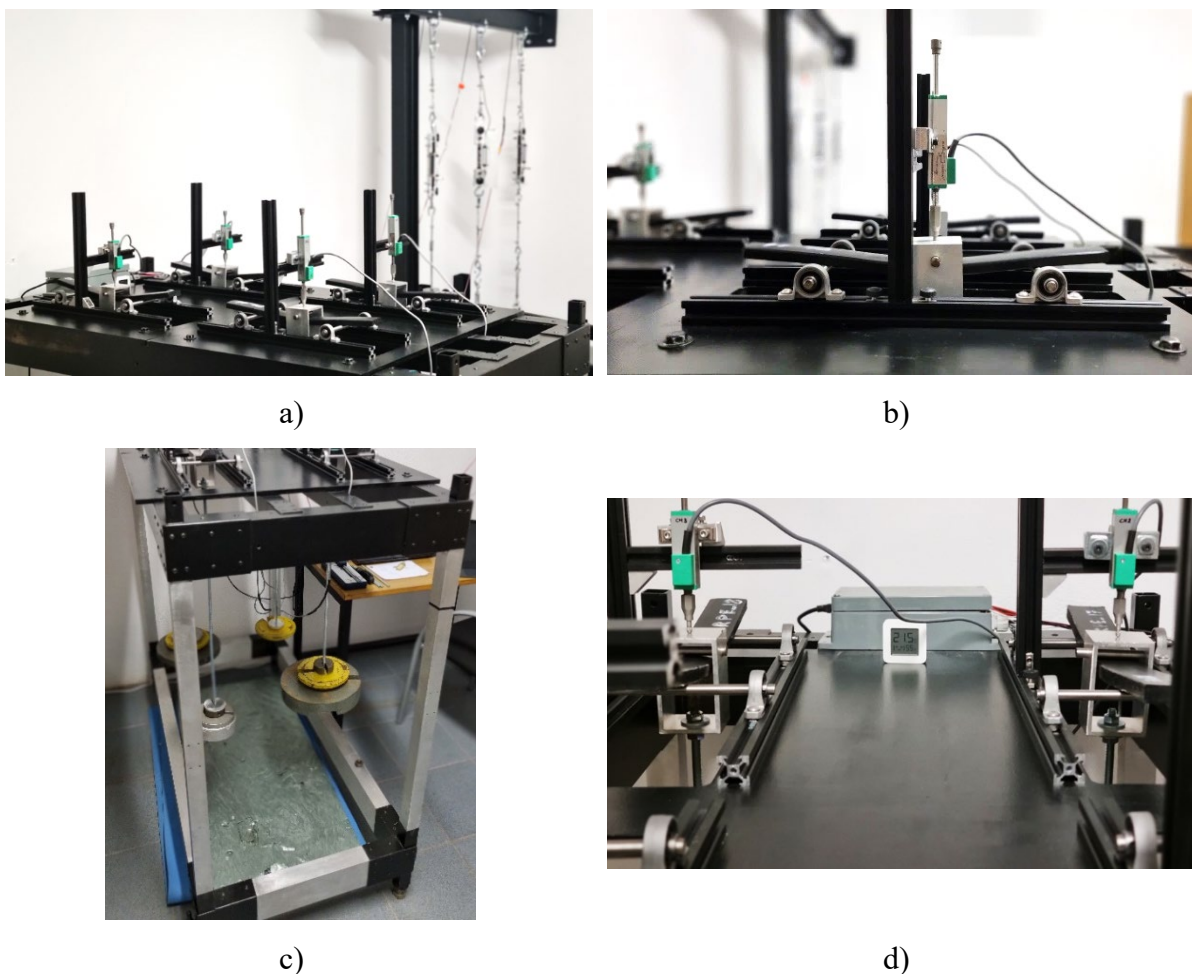
5.4.2. Badania pełzania HDPE przy zginaniu trójpunktowym

5.4.2.1. Opis stanowiska pomiarowego

Testy zginania przeprowadzono na samodzielnie zaprojektowanym i wykonanym stanowisku pomiarowym, opracowanym w oparciu o normy branżowe (ASTM D790, 2017; ASTM D2990, 2017; ISO 899-2, 2003) oraz na podstawie rozwiązań opisanych w literaturze (Chevali i in., 2009). Zasada działania stanowiska opiera się na swobodnie podpartych próbkach, które są obciążane stałą siłą skupioną przyłożoną w środku rozpiętości próbki, generowaną przez obciążniki podwieszone za pośrednictwem cienkiego, prostego pręta. Wybrano rozwiązanie oparte na stalowej konstrukcji ramowej z płytą stalową z otworami na cztery stanowiska testowe i profilami aluminiowymi v-Slot przy dłuższych krawędziach otworu (Rys. 5-13a). Taka konfiguracja umożliwia swobodne rozmieszczenie aparatury pomiarowej oraz płynną regulację rozpiętości podpór w zakresie od 50 do 350 mm. Podpory wykonano z wałków stalowych o średnicy 8 mm, osadzonych w samonastawnych łożyskach kulkowych w oprawach aluminiowych, zamocowanych do profili v-Slot. Zapewniało to swobodę obrotu na podporach, eliminując wpływ sił tarcia na wyniki ugięcia próbek (Rys. 5-13b). Obciążenie przykładano ręcznie w środku rozpiętości próbki przez element w postaci wałka stalowego o średnicy 8 mm umieszczonego w profilu aluminiowym, przez który ręcznie przekładana była testowana próbka. Do profilu przymocowano stalowy pręt gwintowany o długości 1,0-1,2 m, na którego końcu umieszczano obciążniki o masie w zakresie od 0,1 do 25,0 kg (Rys. 5-13c). Pełne obciążenie przykładano szybko i płynnie, w czasie od 1 do 3 sekund.

Stanowisko wyposażono w precyzyjny system pomiaru ugięć, wykorzystujący potencjometry liniowe o zakresie od 0 do 50 mm i dokładności $\pm 0,5$ % wartości zakresu pomiarowego czujnika. Czujniki umieszczone zostały na wspornikach z profilu v-Slot, aby umożliwić swobodne ustawienie czujnika względem badanej próbki. Pomiar rozpoczynał się w chwili przyłożenia obciążenia, przy czym przed właściwym testem wykonywano pomiar zerowy, rejestrując położenie czujnika bez obciążenia.

Przed pierwszym pomiarem oraz w odstępach kilku serii pomiarowych przeprowadzano kalibrację czujników przemieszczeń, wykorzystując wzorniki długości o znanej wartości. Kalibracja obejmowała sprawdzenie liniowości odpowiedzi czujnika na przyłożone obciążenia oraz powtarzalności wskazań w całym zakresie pomiarowym.



Rys. 5-13 Stanowisko do badań pełzania przy zginaniu: a) widok ogólny na platformę, b) pojedyncze stanowisko pomiarowe, c) obciążniki do generowania stałego obciążenia na próbki, d) urządzenie do akwizycji danych oraz termometr elektroniczny

Fig. 5-13 Creep at bending testing bench: a) general view of the platform, b) individual measurement station, c) weights for applying constant load to specimens, d) data acquisition device and electronic thermometer

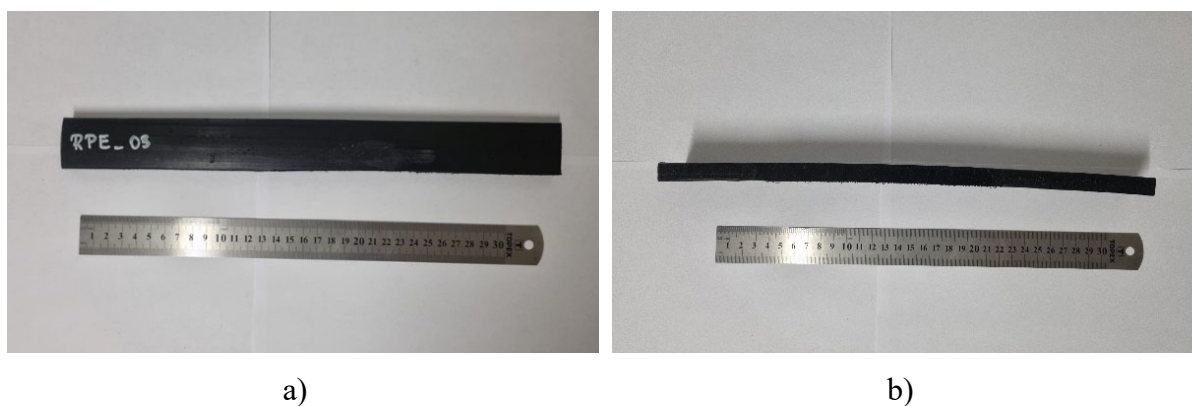
Badania prowadzono w warunkach laboratoryjnych, przy temperaturze $20,9 \pm 2$ °C i wilgotności względnej $42,0 \pm 10,9$ %, zgodnie z zaleceniami normy (ASTM D2990, 2017). Stanowisko było wyposażone w termometr elektroniczny, który rejestrował temperaturę i wilgotność względną z częstotliwością jednej godziny (Rys. 5-13d). Stanowisko pomiarowe było zabezpieczone przed przypadkowym przemieszczeniem oraz wstrząsami zewnętrznymi, a obszar roboczy był odizolowany od źródeł drgań i przeciągów.

5.4.2.2. Charakterystyka próbek przyjętych do badań

Do badań wykorzystano dwa typy materiałów: standardowy polietylen o dużej gęstości (oznaczony jako PE) oraz zmodyfikowaną wersję z domieszkami recyklatu oznaczoną jako RPE uzyskane z profili rur WEHOLITE dzięki uprzejmości firmy Uponor Infra Sp. z o.o.

Materiał bazowy charakteryzował się temperaturą topnienia wynoszącą ok. 130 °C (badania uzupełniające – Rozdział 5.5.1) i gęstością ok. 950 kg/m³, przyjętą na podstawie literatury (Posch, 2011). Próbki do badań zostały wycięte z rzeczywistych elementów zbiorników, co pozwoliło na uwzględnienie ewentualnej anizotropii właściwości mechanicznych. Przygotowywano je zgodnie z wymaganiami normy ASTM D790–17, dbając o zachowanie odpowiednich wymiarów oraz gładkości powierzchni. Przed rozpoczęciem testów każda próbka była dokładnie oczyszczana i sprawdzana pod względem ewentualnych uszkodzeń mechanicznych, które mogłyby wpłynąć na wyniki pomiarów.

Do testów zginania zastosowano próbki pryzmatyczne wycięte ze ścianek profili produkcyjnych o długości 350 mm, szerokości 34,2-37,9 mm i grubości 10,4-15,5 mm, pochodzące z materiału odpadowego pozostałego po formowaniu i obróbce dennicy (Rys. 5-14). Grubość próbek zależała od miejsca ich wycięcia z pojedynczego profilu dennicy, ponieważ ścianki boczne mają w profilu równą sobie grubość produkcyjną, ścianka zewnętrzna ma większą grubość od pozostałych, a ścianka wewnętrzna mniejszą od pozostałych.



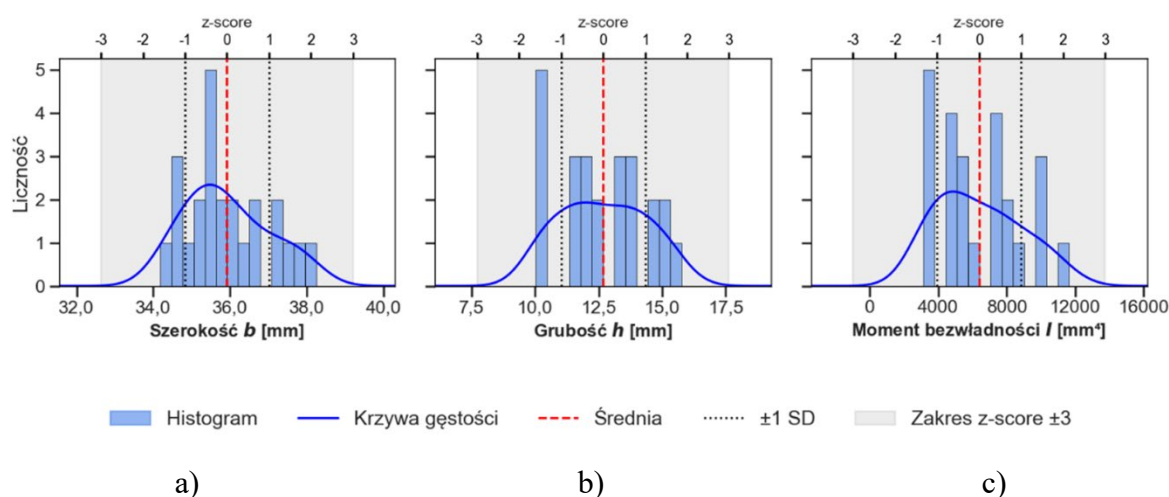
Rys. 5-14 Próbkki do badań pełzania przy zginaniu: a) widok próbki od góry, b) widok próbki z boku

Fig. 5-14 Specimens for creep bending tests: a) top view of the specimen, b) side view of the specimen

Do badań przygotowano 8 próbek z materiału PE, oraz 16 próbek z materiału RPE. Szczególną uwagę zwrócono na precyzyjne przygotowanie wszystkich próbek m.in. poprzez ich kilkudniowe kondycjonowanie. Wymiary każdej próbki (szerokość b oraz grubość h) były mierzone suwmiarką cyfrową o dokładności 0,05 mm. Dla każdego wymiaru wykonano sześć niezależnych pomiarów w różnych miejscach próbki, aby uwzględnić ewentualną niejednorodność oraz lokalne odchylenia geometryczne. Wyznaczono odchylenie standardowe oraz niepewność standardową średniej. Obliczono również moment bezwładności próbek

oraz niepewność i odchylenie standardowe jako efekt propagacji błędu za pomocą metody różniczki zupełnej.

Szczegółowe zestawienie charakterystycznych parametrów badanych próbek przedstawiono w Tabeli Z1-1 w Załączniku 1. Rozkład geometrycznych parametrów przekrojów poprzecznych próbek zilustrowano na Rys. 5-15. Wykresy przedstawiają rozkład szerokości (b) grubości (h) oraz momentu bezwładności (I) próbek, ukazując zarówno histogram licznosci, jak i krzywą gęstości każdej z tych cech geometrycznych. Szerokość próbek wahała się od 34,21 mm do 38,05 mm, średnia szerokość dla całej populacji wyniosła 35,92 mm, a odchylenie standardowe 1,10 mm. Największa niepewność pomiarowa wśród populacji wyznaczonych średnich szerokości wyniosła 0,61 mm, przy odchyleniu standardowym 1,49 mm. Natomiast uśredniona grubość próbek wahała się w całej populacji od 10,35 mm do 15,52 mm, średnia grubość dla całej populacji wynosi 12,68 mm, a odchylenie standardowe 1,65 mm. Największa niepewność pomiarowa wśród populacji wyznaczonych średnich grubości wyniosła 0,23 mm, przy odchyleniu standardowym 0,55 mm. Zmienność grubości była wyraźnie większa niż szerokości, ze względu na wybór próbek z rzeczywistych ścianek profili. Momenty bezwładności (Rys. 5-15c) mieszczą się w pomiędzy 3258,4 a 11386,3 mm⁴. Analiza wskaźnika z-score wykazała, że żaden z parametrów (szerokość, grubość, moment bezwładności) nie różni się od średniej więcej niż $\pm 2SD$. Oznacza to, że w badanej populacji nie wystąpiły wartości odstające według przyjętego kryterium ($z\text{-score} > 3$) (Koronacki i Mielniczuk, 2006), co potwierdza dobrą jakość przygotowania próbek oraz powtarzalność uzyskanych wyników ich pomiarów geometrycznych.



Rys. 5-15 Rozkład geometryczny i wskaźnik z-score parametrów przekrojów poprzecznych próbek zginanych: a) szerokość, b) grubość, c) moment bezwładności

Fig. 5-15 Distribution of geometric and Z-score for parameters of cross-sections of bending specimens: a) width, b) thickness, c) moment of inertia

5.4.2.3. *Metodyka badań*

Badania przeprowadzono na dwóch typach materiału: 8 próbkach z PE i 16 próbkach z RPE przy dwóch rozpiętościach podpór: 9 próbek przy 200 mm (3 próbki PE i 6 próbek RPE) i 15 próbek przy 250 mm (5 próbek PE i 10 próbek RPE). Dobór rozstawu podpór wynikał z założeń normowych (ASTM D2990, 2017) gdzie stosunek grubości próbki do rozpiętości między podporami powinien wynosić 1:16 [+4;-2] (ok. 5-7 %). Taki stosunek odpowiada również proporcjom grubości próbki równej wysokości pełnego profilu dennicy do rozpiętości pomiędzy ściankami korpusu w osi zbiornika. Zakres wartości naprężeń został dobrany tak, aby obejmował typowe obciążenia eksploatacyjne występujące w konstrukcjach z HDPE oraz umożliwiał obserwacje pełzania zarówno w zakresie sprężystym, jak i przy zbliżaniu się do granicznych wartości wytrzymałościowych materiału.

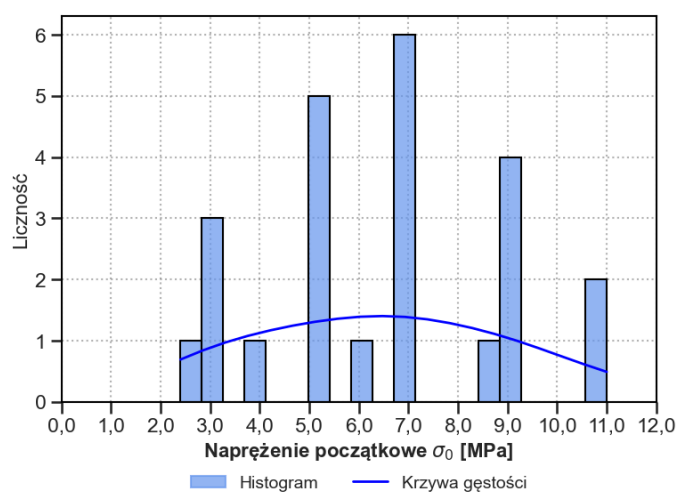
Badania objęły łącznie 24 serie pomiarowe, w zakresie wartości naprężenia początkowego od 2,4 do 11,0 MPa z interwałem 3, 5, 7, 9 oraz 11 MPa. Dodatkowo wykonano badania na 3 próbkach przy wartościach naprężenia pomiędzy ustalonymi wstępnie interwałami. Testów przy naprężeniach początkowych poniżej 3 MPa nie przeprowadzono ze względu na ograniczenia aparatury pomiarowej. W tym zakresie obciążenia urządzenia pomiarowe charakteryzowałyby się zbyt dużą niepewnością wyznaczenia siły początkowej oraz istotnym błędem pomiarowym ugięcia. Badania każdej z próbek trwały od 51h do 17252h (ok. 2 lat), średnio 2246h (ok. 3 miesiące). Mediana czasu badania próbek o rozstawie podpór 200 mm wyniosła 1395h, próbek o rozstawie 250 mm 1210,5h, a mediana czasu badania wszystkich próbek to 1241h. Pełzanie III rzędu osiągnęły 2 z 24 badanych próbek; próbka RPE_15 przy rozstawie 200 mm oraz RPE_04 przy rozstawie 250 mm wykazały gwałtowny wzrost deformacji, co świadczy o wyczerpaniu nośności próbki pod zadaniem obciążeniem.

W Tabeli 5-6 zestawiono wartości początkowych naprężeń zginających. Dla każdej próbki podano rozstaw podpór, a także bezwzględną i względną niepewność tego parametru U_{σ_0} w [MPa] oraz w [%]. Niepewności zostały oszacowane z wykorzystaniem metody różniczki zupełnej, uwzględniającej błędy pomiarowe geometrii próbek, momentu bezwładności, siły oraz rozstawu podpór. Na Rys. 5-16 przedstawiono rozkład przyjętych naprężeń początkowych, co pozwoliło ocenić równomierność rozkładu obciążeń w przyjętej metodyce badań.

*Tabela 5-5 Zestawienie parametrów obciążenia badanych próbek HDPE
– pełzanie przy zginaniu trójpunktowym*

Table 5-5 Summary of loading parameters for the tested HDPE specimens – three-point bending creep

<i>Lp.</i>	<i>Nazwa próbki</i>	<i>Typ materiału</i>	<i>Rozstaw podpór</i>	<i>Siła</i>	<i>Napężenie początkowe</i>	<i>Niepewność</i>	<i>Niepewność</i>
			<i>l</i>	<i>F</i>	σ_0	U_{σ_0}	U_{σ_0}
			[mm]	[N]	[MPa]	[MPa]	[%]
1	RPE_13	RPE	200	41,11	2,40	0,03	1,2
2	PE_03	PE	250	51,71	3,00	0,03	1,1
3	PE_07	PE	200	68,88	3,00	0,03	1,0
4	RPE_01	RPE	250	46,02	3,00	0,09	3,0
5	PE_06	PE	250	69,37	3,76	0,04	1,1
6	PE_01	PE	250	50,24	5,00	0,04	0,8
7	PE_02	PE	200	65,94	5,00	0,06	1,1
8	PE_08	PE	250	84,87	5,00	0,03	0,5
9	RPE_02	RPE	250	67,90	5,00	0,07	1,4
10	RPE_06	RPE	200	77,71	5,00	0,07	1,4
11	RPE_08	RPE	200	110,09	6,00	0,15	2,6
12	PE_04	PE	250	117,45	7,00	0,03	0,5
13	PE_05	PE	200	157,19	7,00	0,06	0,9
14	RPE_03	RPE	250	97,34	7,00	0,08	1,1
15	RPE_10	RPE	200	111,37	7,00	0,07	1,0
16	RPE_11	RPE	250	154,74	7,00	0,08	1,1
17	RPE_16	RPE	250	77,42	7,00	0,08	1,2
18	RPE_09	RPE	250	172,40	8,77	0,10	1,1
19	RPE_04	RPE	250	123,83	9,00	0,10	1,1
20	RPE_05	RPE	250	211,15	9,00	0,21	2,3
21	RPE_12	RPE	250	189,76	9,00	0,13	1,4
22	RPE_14	RPE	200	115,19	9,00	0,11	1,2
23	RPE_07	RPE	250	233,72	11,00	0,18	1,6
24	RPE_15	RPE	200	140,22	11,00	0,09	0,8



Rys. 5-16 Rozkład naprężeń początkowych próbek zginanych

Fig. 5-16 Distribution of initial stresses for bending specimens

Dla próbek z PE wartości nominalnych naprężeń mieściły się w zakresie od 3,0 MPa (PE_03, PE_07) do 11,0 MPa (PE_05). Bezwzględne niepewności U_{σ_0} kształtowały się na poziomie 0,03-0,06 MPa, co odpowiada względnym niepewnościom rzędu 0,5-1,1 %. Oznacza to bardzo dobrą powtarzalność wyników oraz niewielki wpływ niepewności pomiarowych na wynik końcowy w tej grupie materiałowej. W przypadku próbek z RPE zakres nominalnych naprężeń jest szerszy: od 2,4 MPa (RPE_13) do 11,0 MPa (RPE_15). Bezwzględne niepewności są bardziej zróżnicowane, osiągały wartości od 0,03 MPa (RPE_13) do 0,21 MPa (RPE_05). Wartości względne wynosiły od 0,8 % do 3,0 % (RPE_01), co wskazuje na wyraźnie większe rozrzuty w tej grupie materiałowej. Największą liczbę próbek zbadano przy naprężeniach początkowych 7-9 MPa, czyli zbliżonych do naprężenia, na jakim stabilizowały się naprężenia normalne w badaniach wstępnych (procesie relaksacji przy rozciąganiu z wymuszonym przemieszczeniem), aby mieć możliwość oceny zachowania się materiału przy tej granicy na większej liczbie próbek. Tak szeroki i zróżnicowany rozkład parametrów wejściowych i wynikowych stanowi odpowiednią podstawę do dalszych analiz statystycznych, umożliwiając ocenę wpływu różnych czynników na zachowanie próbek w badaniach pełzania.

Odczyty położenia czujnika pomiarowego do określenia ugięcia próbki rejestrowano za pomocą urządzenia do akwizycji danych USB-1608G DAQ ze zmienną częstotliwością odczytu, zależną od fazy badania, od jednego odczytu na sekundę w początkowej fazie testu do jednego odczytu na 15 minut w fazie końcowej. Odczyty rejestrowano za pomocą komputera wykorzystując dedykowane oprogramowanie DAQami firmy Digilent. W celu redukcji błędów przypadkowych spowodowanych zakłóceniami mechanicznymi i elektrycznymi wyniki do dalszych analiz uśredniono, do postaci średniej godzinowej (ruchoma średnia), powiązanej z wariancją godzinową, charakteryzującą wahania błędu pomiarowego. Największe odchylenie standardowe średniej godzinowej odnotowano o wartości 0,233 mm (RPE_04). Wartość początkową pomiaru ugięcia ustalano na podstawie zarejestrowanych odczytów z czujnika na podstawie obserwacji stabilności przyrostu wartości odczytów w pierwszych sekundach obciążenia, eliminując w ten sposób rejestrację ewentualnych luzów.

5.4.2.4. Wyniki i analiza pomiarów

Wyniki pomiarów maksymalnego ugięcia $f(t_{max})$ badanych próbek HDPE poddanych pełzaniu przy zginaniu trójpunktowym zestawiono w Tabeli 5-6. Poszczególne krzywe pełzania przedstawione zostały w kartach badawczych (Załącznik 2). Dla zadanych wartości

obciążenia wyznaczone zostały również maksymalne odkształcenia $\varepsilon(t_{max})$ ze wzoru (3.23) oraz maksymalne podatności $J(t_{max})$ ze wzoru (3.6). W przeprowadzonej analizie 24 próbek maksymalne odkształcenie $\varepsilon(t_{max})$ mieściło się w zakresie od 0,008 (PE_07, RPE_13) do 0,106 (RPE_15), natomiast maksymalna podatność $J(t_{max})$ przyjmowała wartości od $2,69 \cdot 10^{-3}$ (PE_07) do $9,66 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (RPE_15). Wartości te mieszczą się w zakresie podatności jakie opisane zostały w literaturze, gdzie np. Janson (Janson, 1993) otrzymał po 1000h badania próbki HDPE obciążonej ok. 5 MPa podatność o wartości ok. $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$.

Zmianę ugięcia próbek w czasie, z podziałem na rozstaw podpór i grubość próbek przedstawiono na wykresach Z3-1 do Z3-9 (Załącznik 3.). Porównanie krzywych ugięcia w funkcji czasu pokazuje wyraźny wpływ naprężenia początkowego na przebieg pełzania belek zginanych. Przy mniejszych naprężeniach (do ok. 5 MPa) ugięcie rośnie w sposób quasi liniowy, a tempo deformacji stopniowo maleje, prowadząc do stabilizacji przemieszczeń po stosunkowo krótkim czasie obciążenia. Wraz ze wzrostem naprężenia początkowego (od ok. 5 do 8 MPa) obserwuje się nieliniowe przyspieszenie rozwoju ugięcia, wskazujące na aktywację procesów lepkosprężystych i plastycznych oraz intensyfikację pełzania. Dla największych naprężeń początkowych (powyżej 8 MPa) krzywe wykazują tendencję do gwałtownego wzrostu deformacji w czasie, co może oznaczać przejście w stadium pełzania III rzędu i początek utraty stabilności geometrycznej układu przy obciążeniu długookresowym. Otrzymane wyniki wskazują, że materiał wykazuje wyraźne odchylenie od zachowania sprężystego i zwiększoną podatność na długookresowe odkształcenia. Przedstawione zależności pokazują również, że próbki o większej grubości (wysokości przekroju poprzecznego) ulegają mniejszym ugięciom, co potwierdza związek sztywności giętnej i odporności na pełzanie. Największe ugięcia odnotowano dla próbek o najmniejszej grubości, zwłaszcza w dłuższym okresie obciążenia. Grubość przekroju próbki okazuje się być jednym z kluczowych czynników, które determinują podatność materiału na pełzanie podczas zginania. Zmniejszenie grubości przekroju skutkuje istotnym, nieproporcjonalnym wzrostem ugięcia, nawet jeśli pozostałe parametry geometryczne i warunki obciążenia pozostają niezmiennic. Oznacza to, że w przypadku długookresowego obciążenia, geometria przekroju (a zwłaszcza grubość próbki) ma bezpośredni i istotny wpływ na prędkość i przebieg zjawiska pełzania, co należy uwzględniać zarówno na etapie interpretacji wyników badań jak również przy projektowaniu konstrukcji.

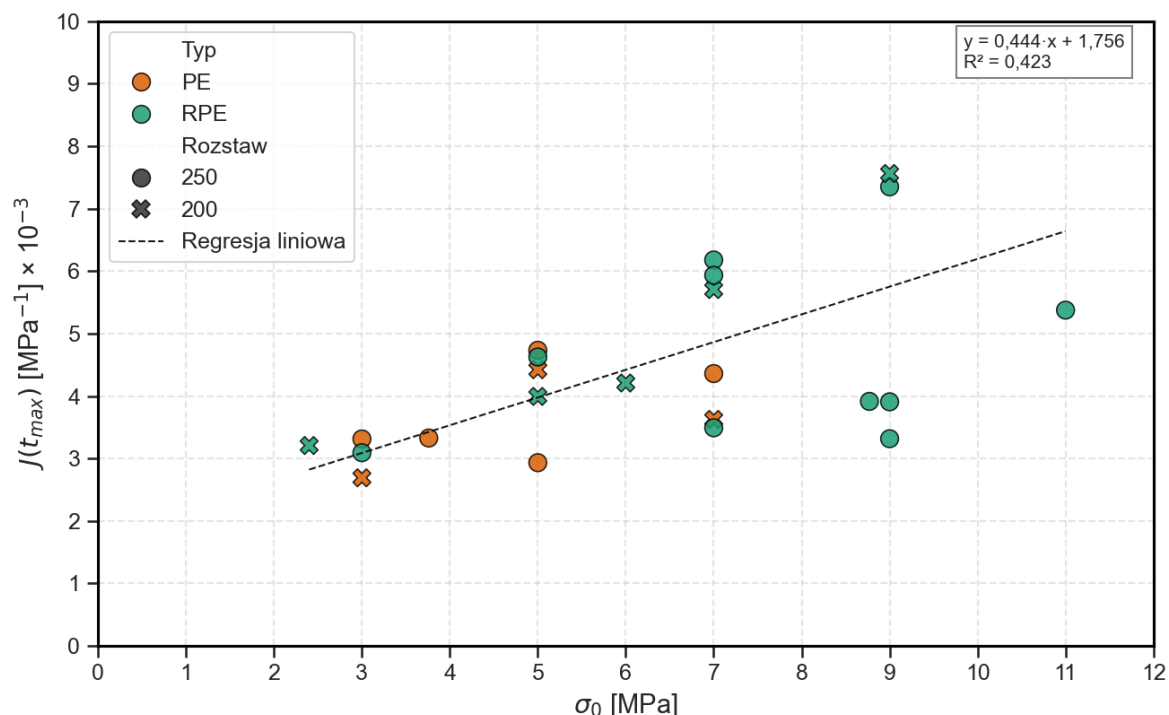
Analiza wyników uwzględniająca typ materiału wykazała, że próbki wykonane z surowca PE charakteryzowały się mniejszymi wartościami obu parametrów, przy czym odkształcenie w tej grupie wynosiło od 0,008 (PE_03, PE_07) do 0,031 (PE_04), a podatność od $2,69 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (PE_07) do $4,73 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (PE_01). W przypadku próbek z RPE zakresy były znacznie szersze: odkształcenie wahało się od 0,008 (RPE_13) do 0,106 (RPE_15), a podatność od $2,93 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (RPE_08) do $9,66 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (RPE_15), co może wskazywać na większą niejednorodność struktury materiału. Należy jednak zaznaczyć, że w grupie próbek poddanych naprężeniom początkowym większym niż 8 MPa nie występowały próbki z PE. Z analizy wyników uwzględniających rozstaw podpór wynika, że przy rozstawie 200 mm maksymalne odkształcenie wynosiło od 0,008 (PE_07, RPE_13) do 0,106 (RPE_15), a podatność od $2,69 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (PE_07) do $9,66 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (RPE_15), natomiast dla rozstawu 250 mm wartości te były mniejsze: odkształcenie wahało się od 0,008 (PE_03) do 0,068 (RPE_14), a podatność od $2,93 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (RPE_08) do $7,56 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (RPE_14). Największe wartości obu parametrów, zarówno wśród wszystkich próbek, jak i w poszczególnych podgrupach odnotowano w próbkach RPE przy rozstawie 200 mm.

Tabela 5-6 Zestawienie parametrów testu i wyników badań próbek HDPE – pełzanie przy zginaniu trójpunktowym

Table 5-6 Summary of test parameters and results for HDPE specimens – creep in three-point bending

Lp.	Nazwa próbki	Typ materiału	Rozstaw podpór	Siła	Naprężenie początkowe	Maksymalne ugięcie	Maksymalne odkształcenia	Maksymalna podatność	Czas badania	Uwagi
			l	F	σ_0	$f(t_{max})$	$\varepsilon(t_{max})$	$J(t_{max})$	t_{max}	
			[mm]	[N]	[MPa]	[mm]	[-]	[$\cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$]	[h]	
1	RPE_13	RPE	200	41,11	2,40	4,38	0,008	3,21	1032	Dodatkowo wzrost naprężenia do 5 MPa
2	PE_03	PE	250	51,71	3,00	7,64	0,010	3,31	1469	
3	PE_07	PE	200	68,88	3,00	3,95	0,008	2,69	1719	
4	RPE_01	RPE	250	46,02	3,00	7,76	0,009	3,09	577	Dodatkowo wzrost naprężenia do 5 oraz 7 MPa
5	PE_06	PE	250	69,37	3,76	9,46	0,013	3,33	1180	
6	PE_01	PE	250	50,24	5,00	23,67	0,024	4,73	837	
7	PE_02	PE	200	65,94	5,00	14,08	0,022	4,42	837	
8	PE_08	PE	250	84,87	5,00	11,38	0,015	2,93	1719	
9	RPE_02	RPE	250	67,9	5,00	20,24	0,023	4,62	578	
10	RPE_06	RPE	200	77,71	5,00	11,48	0,020	3,99	663	
11	RPE_08	RPE	200	110,09	6,00	13,40	0,025	4,21	1395	
12	PE_04	PE	250	117,45	7,00	23,64	0,031	4,36	1695	
13	PE_05	PE	200	157,19	7,00	12,33	0,025	3,63	1695	
14	RPE_03	RPE	250	97,34	7,00	37,73	0,043	6,18	1241	
15	RPE_10	RPE	200	111,37	7,00	22,98	0,040	5,70	2277	
16	RPE_11	RPE	250	154,74	7,00	17,21	0,024	3,49	2277	
17	RPE_16	RPE	250	77,42	7,00	41,44	0,042	5,93	8132	
18	RPE_09	RPE	250	172,4	8,77	24,37	0,034	3,91	1395	
19	RPE_04	RPE	250	123,83	9,00	57,73	0,066	7,35	51	pełzanie III rzędu
20	RPE_05	RPE	250	211,15	9,00	20,03	0,030	3,32	1148	
21	RPE_12	RPE	250	189,76	9,00	24,50	0,035	3,91	2064	
22	RPE_14	RPE	200	115,19	9,00	43,57	0,068	7,56	8132	
23	RPE_07	RPE	250	233,72	11,00	41,09	0,059	5,37	17252	
24	RPE_15	RPE	200	140,22	11,00	68,47	0,106	9,66	799	

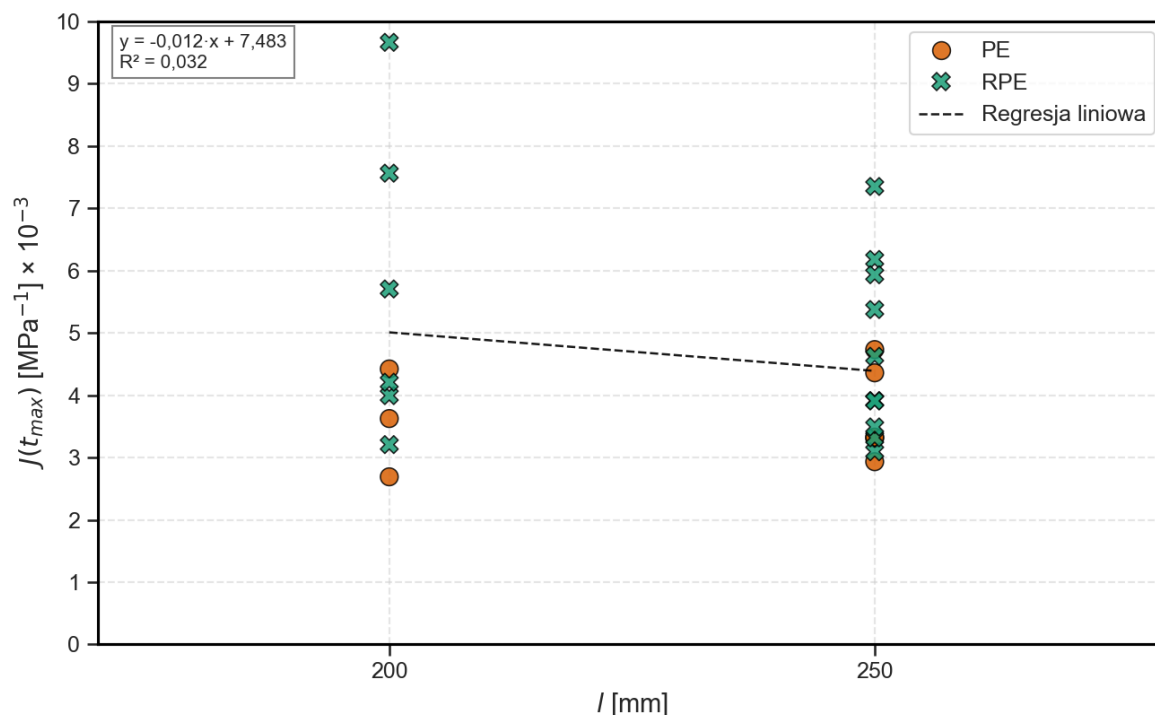
Na Rys. 5-17 przedstawiono maksymalną podatność $J(t_{max})$ w funkcji naprężenia początkowego σ_0 , z rozróżnieniem na typ materiału oraz rozstaw podpór.



Rys. 5-17 Maksymalne wartości podatności $J(t_{max})$ w funkcji naprężenia początkowego σ_0 . Wartości podzielone na pary Typ – Rozstaw (N = 24)

Fig. 5-17 Maximum values of creep compliance $J(t_{max})$ as a function of initial stress σ_0 . The values are grouped by material type and span (N = 24)

Przedstawiona zależność pokazuje słabą korelację podatności i naprężenia początkowego ($R^2 = 0,423$). Rozkład punktów pomiarowych na wykresie wskazuje, że próbki wykonane z RPE charakteryzują się nieznacznie większą podatnością w porównaniu do próbek z PE w zakresie wartości naprężeń do 7,0 MPa. Zgodnie z definicją podatności jako odwrotności sztywności, zależnej od materiału i geometrii przekroju, nie powinien mieć na nią wpływu rozstaw podpór. Na Rys. 5-17 nie obserwuje się jednoznacznej, systematycznej różnicy w wartościach podatności określonej na próbkach o rozstawie 200 mm i 250 mm, ale nieznacznego wpływu rozstawu podpór na rozrzut wyników nie można wykluczyć. W celu weryfikacji tego założenia sporządzono wykres zależności wartości maksymalnej podatności $J(t_{max})$ w funkcji rozstawu podpór l z rozróżnieniem na typ materiału (Rys. 5-18) i dokonano analizy wartości $J(t_{max})$ dla dwóch wariantów rozpiętości (200 i 250 mm).

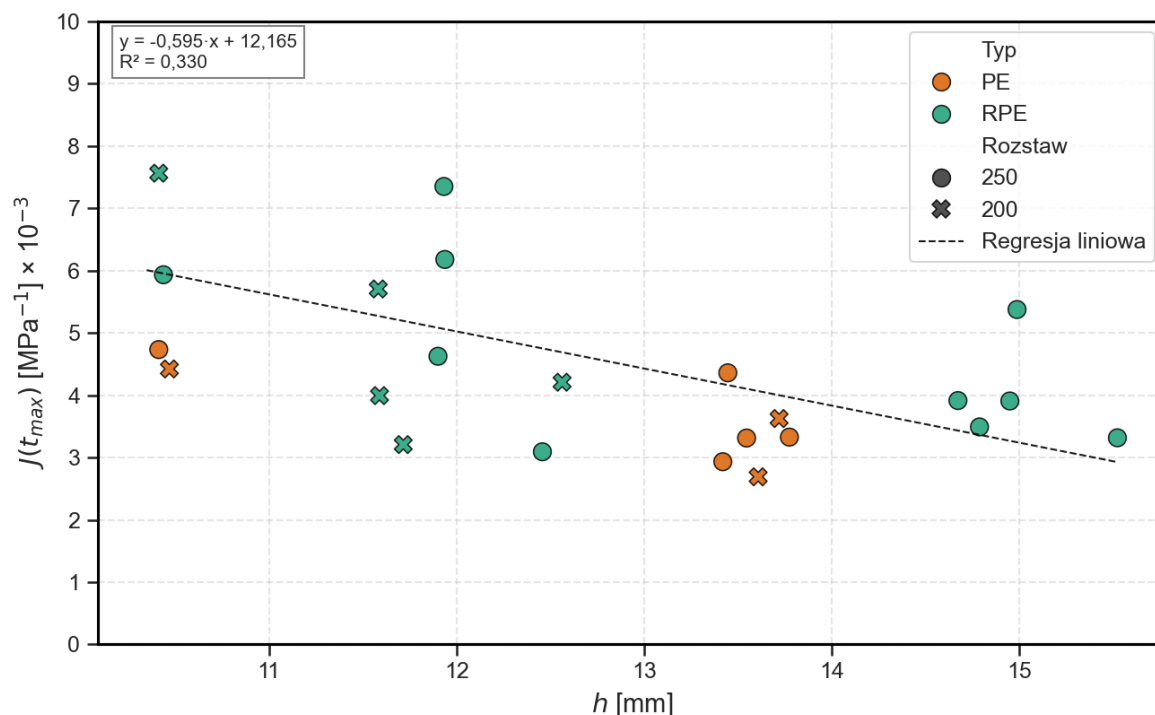


Rys. 5-18 Maksymalne wartości podatności $J(t_{max})$ w funkcji rozstawu l .
Wartości podzielone na Typ materiału ($N = 24$)

Fig. 5-18 Maximum values of creep compliance $J(t_{max})$ as a function of specimen span l .
The values are grouped by material type ($N = 24$)

Wyniki potwierdziły brak istotnej zależności między rozstawem podpór a maksymalną podatnością $J(t_{max})$. Wartość współczynnika determinacji ($R^2 = 0,032$) potwierdza brak istotnego dopasowania regresji liniowej do danych. Średnie wartości podatności przy rozstawach 200 mm i 250 mm są zbliżone, co wskazuje, że zmiana rozstawu podpór w badanym zakresie naprężeń nie ma istotnego wpływu na zachowanie HDPE przy pełzaniu. Potwierdza zgodność z teorią, a tym samym poprawność wykonania badań.

Na Rys. 5-19 przedstawione zostały wartości maksymalnej podatności $J(t_{max})$ w funkcji grubości próbki h , z rozróżnieniem na typ materiału oraz rozstaw podpór.



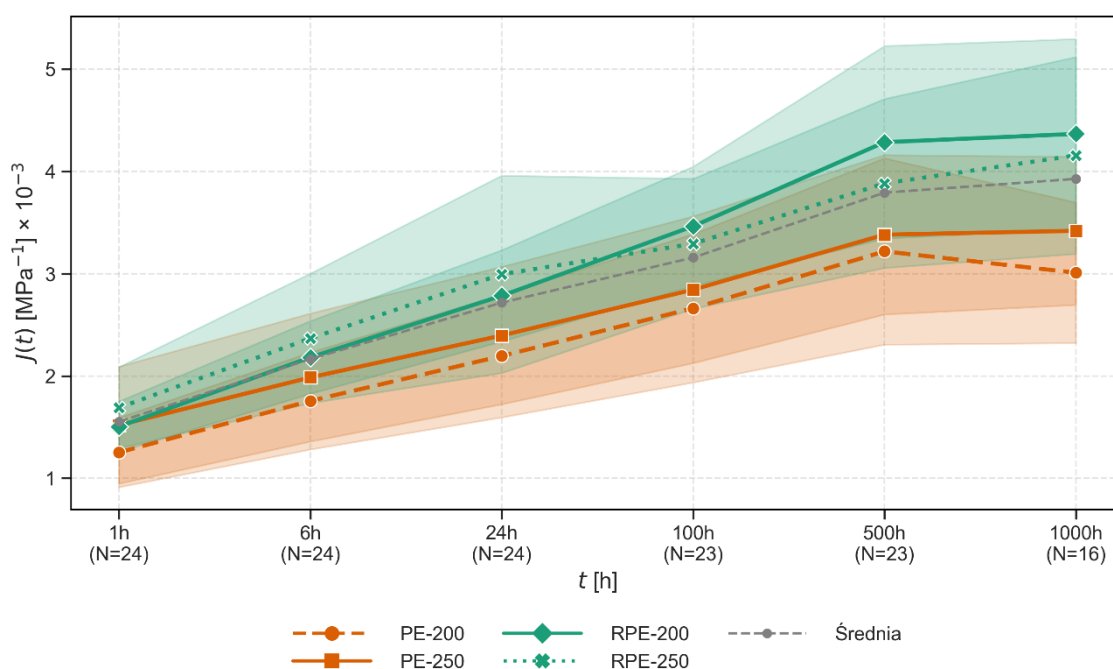
Rys. 5-19 Maksymalne wartości podatności $J(t_{max})$ w funkcji grubości próbki h .
Wartości podzielone na pary Typ – Rozstaw (N = 24)

Fig. 5-19 Maximum values of creep compliance $J(t_{max})$ as a function of specimen thickness h .
The values are grouped by material type and span (N = 24)

Analiza wykresu wskazuje, że nie występuje jednoznaczna, liniowa zależność ($R^2 = 0,330$) między grubością próbki a maksymalną podatnością $J(t_{max})$. Można jednak zauważyć tendencję do zwiększenia podatności wraz ze zmniejszeniem grubości próbek. Oznacza to, że pomimo uwzględnienia geometrii próbek w przeliczeniach odkształceń (zgodnie ze wzorem (3.23)), oraz wyznaczaniu podatności z uwzględnieniem naprężenia początkowego, grubość próbki nadal istotnie wpływa na podatność na pełzanie HDPE. Efekt ten może być również zależny od rodzaju materiału oraz innych czynników, takich jak naprężenie czy być może niejednorodność próbek. Widoczna jest natomiast pewna różnica w podatnościach materiałów RPE i PE (Rys. 5-18 i Rys. 5-19). Próbki z RPE charakteryzują się większym rozrzutem wartości podatności, szczególnie wśród próbek o mniejszej grubości, gdzie pojawiają się największe wartości $J(t_{max})$. Największe wartości podatności dla próbek RPE o mniejszej grubości mogą wskazywać na większą wrażliwość tego materiału na zmiany geometrii w warunkach pełzania HDPE. Problem ten szerzej omówiono w rozdziale 7.5.

Próbki z materiału PE wykazują się mniejszą podatnością o mniejszym rozrzucie wartości, jednakże jej wyniki koncentrują się w zakresie większych grubości.

Dodatkowo wyznaczono średnie wartości podatności $J(t)$ w wybranych chwilach czasowych: 1, 6, 12, 24, 100, 500 oraz 1000 godzin, a ich zmianę w czasie, z rozróżnieniem typu materiału oraz rozstawu podpór, wraz z wartością średnią i krzywą regresji przedstawiono na Rys. 5-20. Charakter wykresu wskazują na zależność podatności od czasu przenoszenia obciążenia, jaka wzrasta wraz z czasem. Większa podatność materiału z recyklingu od podatności czystego HDPE utrzymuje się w całym okresie trwania eksperymentu. W przypadku badań wykonanych na próbkach z PE podatność obserwowana dla rozstawu 250 mm jest większa od podatności dla rozstawu 200 mm. Podatność RPE oznaczona na próbkach o rozstawie 250 mm jest większa od podatności określonej dla rozstawu 200 mm w pierwszych 51 godzinach badania (ze względu na uwzględnienie podatności próbki RPE_04).



Rys. 5-20 Średnie krzywe podatności $J(t)$ w funkcji czasu.
Krzywe podzielone na pary Typ – Rozstaw. Półprzezroczyste pola zakreślają przedział ufności w danej chwili czasowej dla $p\text{-value}=0,05$

Fig. 5-20 Mean creep compliance $J(t)$ as a function of time.
The curves are grouped by material type and span. The semi-transparent shaded areas indicate the confidence interval at each time point for $p\text{-value}=0,05$

W celu jednoznacznego określenia wpływu typu materiału, rozstawu podpór oraz grubości próbek na podatność na pełzanie w wybranych chwilach czasowych: 1, 6, 12, 24, 100, 500 oraz 1000 godzin wykonano analizę statystyczną wyników z zastosowaniem analizy

wariancji (ANOVA). Ponieważ klasyczna analiza ANOVA zakłada normalność rozkładu w każdej porównywanej grupie (Dembińska, 2021; Faraway, 2002), przed przystąpieniem do analizy, dla każdej grupy czasowej przeprowadzono test Shapiro-Wilka. Test ten pozwolił ocenić zgodność rozkładu wartości reszt uzyskanych z modelu trójczynnika ANOVA z rozkładem normalnym. Test Shapiro-Wilka wykonany na zbiorze wszystkich próbek potwierdził normalność rozkładów w poszczególnych chwilach czasowych ($p > 0,05$), z wyjątkiem przedziału czasowego 24h, w którym wartość p była istotnie mniejsza od progu istotności ($p = 0,014$) (Tabela Z1-2, Załącznik 1). Uzyskane wyniki testu Shapiro-Wilka wskazują, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt rozkładu, kluczowej dla poprawności wnioskowania na podstawie ANOVA, w czasie: t_{max} , 1h, 6h, 12h, 100h, 500h oraz 1000h. Natomiast wyniki analizy wariancji ANOVA dla 24h należy interpretować z ostrożnością. Wyniki analizy statystycznej wykonanej na pełnym zbiorze danych ($N = 24$) przedstawiono w Załączniku 1.

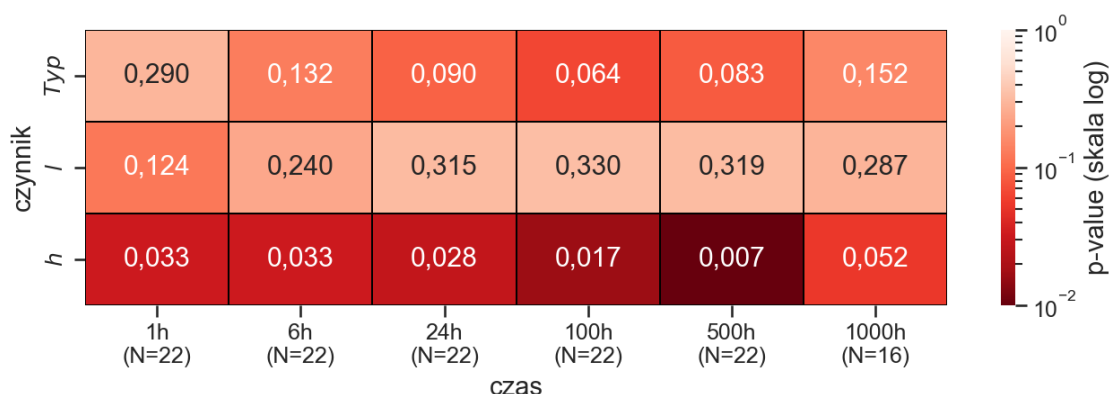
Analizując przebieg procesu pełzania oraz wyniki analizy statystycznej postawiono hipotezę, że zaburzenie normalności rozkładu reszt modelu ANOVA może być powodowane przez próbki, które uległy pełzaniu III rzędu. W celu jej weryfikacji przeprowadzono ponownie test Shapiro-Wilka na zbiorze $N = 22$, pomniejszonym o wyniki badań próbek RPE_04 i RPE_15. Test wykazał, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt ($p > 0,05$). Wartości p -value dla poszczególnych chwil czasowych zestawiono w Tabeli 5-7.

Tabela 5-7 Wyniki testu Shapiro-Wilka reszt modelu trójczynnika ANOVA na podstawie wszystkich badanych próbek z odrzuceniem próbek, które osiągnęły III stadium pełzania ($N = 22$)

Table 5-7 Shapiro-Wilk test results for residuals of the three-factor ANOVA model (excluding specimens that reached tertiary creep) ($N = 22$)

<i>Czas</i>	<i>p-value</i>	<i>Liczba próbek</i>	<i>Interpretacja</i>
1h	0,815	22	Normalność reszt potwierdzona
6h	0,883	22	Normalność reszt potwierdzona
12h	0,747	22	Normalność reszt potwierdzona
24h	0,587	22	Normalność reszt potwierdzona
100h	0,391	22	Normalność reszt potwierdzona
500h	0,652	22	Normalność reszt potwierdzona
1000h	0,814	16	Normalność reszt potwierdzona

Dalszą analizę istotności wpływu poszczególnych czynników na podatność na pełzanie wykonano na zbiorze $N = 22$ próbek, które nie uległy zjawisku pełzania III rzędu. Na wykresie (Rys. 5-21) przedstawione zostały wyniki trójczynnika analizy wariancji (ANOVA). Wykres został opracowany jako diagram intensywności z zastosowaniem kolorystyki w skali logarytmicznej, co pozwala na rozróżnienie czynników istotnych statystycznie (ciemniejsze pola, $p < 0,05$) od tych, które nie wykazują istotności (jaśniejsze pola, $p > 0,05$). Liczba analizowanych próbek wynosi $N=22$ dla przedziału 1-500 godzin oraz $N=16$ dla 1000 godzin.



Rys. 5-21 Trójczynnika analiza wariancji (ANOVA) dla Typu materiału (Typ), rozstawu (l) i grubości próbek (h) w wybranych siedmiu chwilach czasowych. Wykres dla wszystkich zbadanych próbek z odrzuceniem próbek, które osiągnęły III stadium pełzania (liczba próbek $N=22$ od 1 do 500h oraz $N=16$ dla 1000h).

Fig. 5-21 Three-factor analysis of variance (ANOVA) for material type (Typ), span (l), and specimen thickness (h) at seven selected time points. The analysis was performed for all tested samples, excluding those that reached the tertiary creep stage (sample size: $N=22$ for 1 to 500h, and $N=16$ for 1000h).

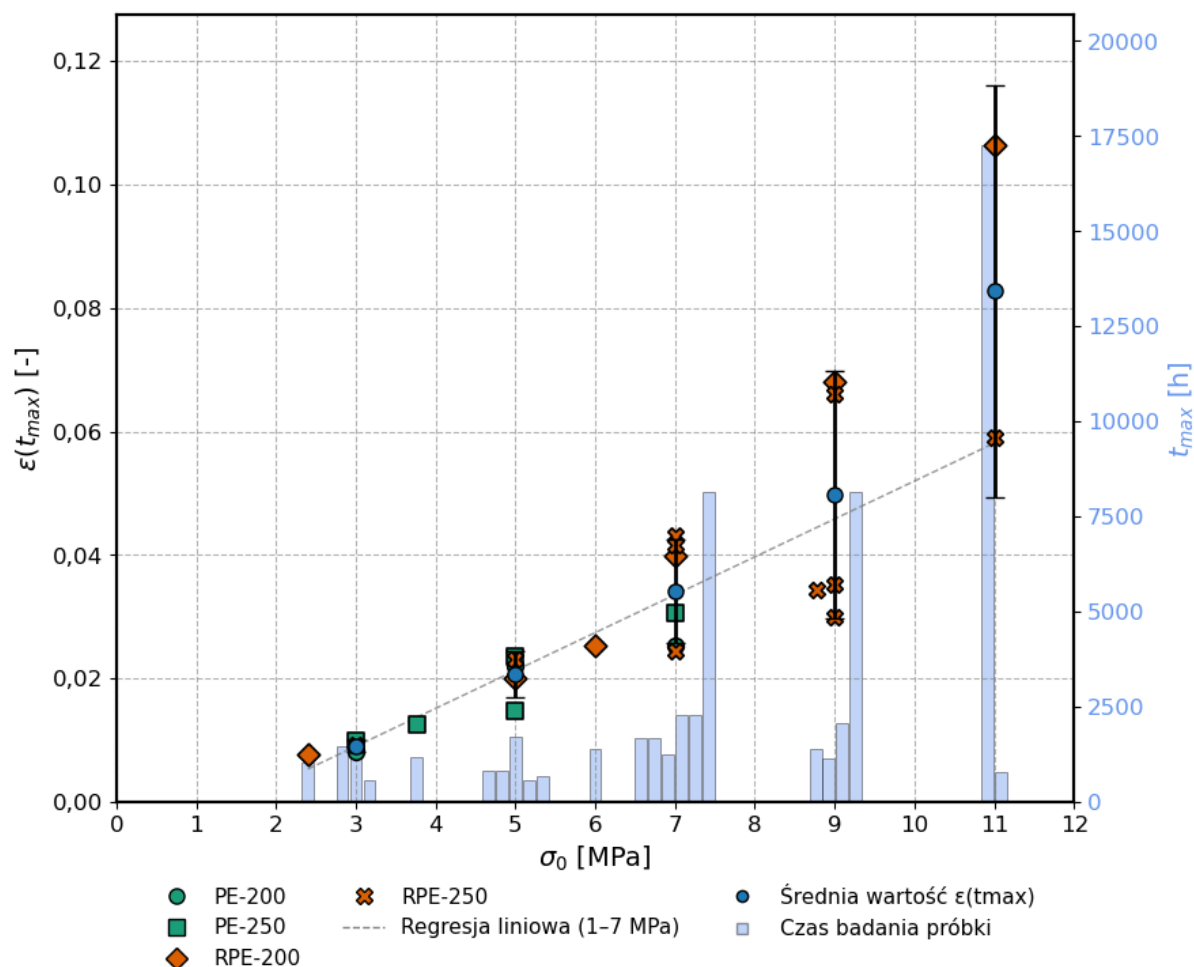
Wartości p dla grubości próbki są najmniejsze spośród wszystkich czynników i przez cały analizowany okres (od 1h do 500h) utrzymują się poniżej progu istotności statystycznej ($p < 0,05$). Najmniejsze wartości p zaobserwowano w 500h ($p = 0,007$), a także w 100h ($p = 0,017$). Nawet w czasie 1000h wartość p (0,052) jest bardzo bliska progu istotności. Oznacza to, że grubość próbki ma istotny wpływ na podatność na pełzanie w całym badanym okresie, jaki nie maleje nawet po wykluczeniu najbardziej podatnych próbek. Wartości p dla rozstawu podpór są wyraźnie większe niż dla grubości próbki i w żadnym z analizowanych czasów nie obniżają się poniżej progu istotności (najmniejsza $p = 0,124$ w 1h). Oznacza to, że rozstaw podpór nie ma istotnego wpływu na podatność na pełzanie po odrzuceniu próbek z III stadium pełzania. Wartości p dla typu materiału (PE vs. RPE) są przez cały czas powyżej progu istotności (najmniejsza $p = 0,064$ w 100h), co oznacza, że typ materiału nie ma statystycznie istotnego wpływu na podatność na pełzanie w żadnym z analizowanych przedziałów czasowych, nawet po wykluczeniu najbardziej podatnych próbek.

Wraz z wydłużaniem czasu badania, istotność wpływu grubości próbki na podatność na pełzanie utrzymuje się na bardzo wysokim poziomie (najmniejsze p w 500h), podczas gdy wpływ rozstawu podpór i typu materiału pozostaje nieistotny przez cały czas badania.

W celu jednoznacznego wykluczenia wpływu znaczących obciążeń na populację testów została przeprowadzona analiza wariancji ograniczona do próbek, które były poddane naprężeniu początkowemu o wartości mniejszej niż 8,0 MPa. Analiza potwierdziła istotny statystycznie wpływ grubości próbki i nieistotny statystycznie wpływ typu materiału i rozstawu podpór na podatność na pełzanie. Wyniki analizy przedstawiono w Załączniku 1.

Podsumowując, przeprowadzona trójczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) w trzech wariantach jednoznacznie wskazuje, że nie ma przesłanek do wnioskowania, że czynniki, takie jak typ materiału (PE vs. RPE) oraz rozstaw podpór, wykazują istotny wpływ na podatność na pełzanie w analizowanych wariantach. Spośród wszystkich rozważanych czynników to grubość próbki (h) wykazuje najsilniejszy i najtrwalszy wpływ na podatność na pełzanie, niezależnie od zakresu analizowanych danych – zarówno w pełnym zbiorze, jak i po wykluczeniu próbek z III stadium pełzania oraz w grupie próbek o mniejszej wartości naprężenia początkowego, poniżej 8 MPa. Warto jednak podkreślić, że grubość próbki została już uwzględniona we wzorze na odkształcenie przy zginaniu trójpunktowym, a tym samym pośrednio także w wyznaczaniu podatności. Oznacza to, że jej wpływ na wynik końcowy jest częściowo „wbudowany” w sposób przeliczenia surowych danych pomiarowych na wartości odkształcenia i podatności. Analizę porównania krzywych pełzania jako ugięć w funkcji czasu z podziałem na grubości próbek zostały zestawione i opisane w Załączniku 3.

Na Rys. 5-22 zostały przedstawione zależności między naprężeniem początkowym a maksymalnym odkształceniem próbek poddanych długookresowemu zginaniu pod stałym obciążeniem wyznaczonym za pomocą wzoru (3.23). Dla każdej grupy próbek badanych przy tym samym naprężeniu początkowym, jeżeli występowały więcej niż raz, wyznaczono średnią i odchylenie standardowe maksymalnego odkształcenia.



Rys. 5-22 Wykres maksymalnego odkształcenia w funkcji naprężenia początkowego próbek poddanych pełzaniu przy zginaniu

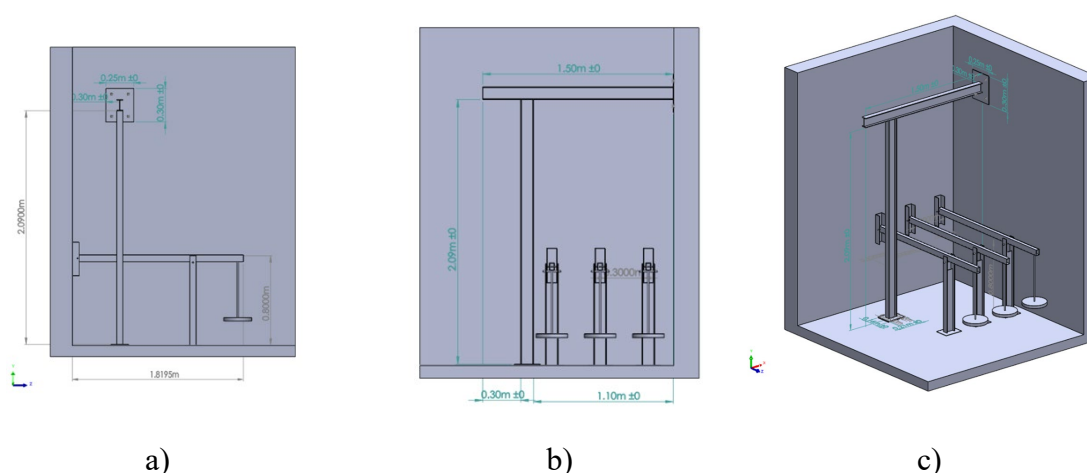
Fig. 5-22 Maximum strain versus initial stress for specimens subjected to bending creep

Wykres potwierdza rosnącą zależność $\epsilon(t_{max})$ do naprężeń początkowych σ_0 . W zakresie od 1 do 7 MPa wzrost jest prawie liniowy (co przedstawiono przerywaną linią), a po przy naprężeniach początkowych większych od ok. 9 MPa pojawia się wyraźna nieliniowość i duże rozproszenie wyników: średnia wartość $\epsilon(t_{max})$ rośnie od ok. 0,05 przy 9 MPa do ok. 0,08 przy 11 MPa, a słupki błędów wskazują znaczny rozrzut wartości, spowodowany głównie przez wartość odkształcenia próbki RPE_15, która osiągnęła III stadium pełzania.

5.4.3. Badania pełzania HDPE przy rozciąganiu

5.4.3.1. Opis stanowiska pomiarowego

Testy rozciągania przeprowadzono na samodzielnie zaprojektowanym i wykonanym stanowisku pomiarowym (Rys. 5-23), opracowanym w oparciu o normy branżowe (ASTM D2990, 2017; ISO 527-1, 2019; ISO 899-1, 2017) oraz na podstawie rozwiązań opisanych w literaturze (Boshoff, 2014). Do budowy wybrano rozwiązanie oparte na stalowej konstrukcji ramowej o trzech identycznych stalowych ramionach o przełożeniu 1:4 z obciążnikami umieszczonymi na końcach ramion (Rys. 5-24). Obciążenie na próbkę podwieszoną do belki górnej na stalowych linkach i umieszczoną w aluminiowym uchwycie, generowane było przez siłę wytworzoną przez dolną linkę zamocowaną do ramienia i obciążaną przez obciążniki stalowe. Rozwiązanie takie ograniczyło konieczność podwieszania w sposób bezpośredni bardzo dużych obciążeń (w setkach kilogramów), jakie były konieczne do wygenerowania odpowiedniego naprężenia początkowego w próbkach.



Rys. 5-23 Koncepcja stanowisk pomiarowych do pełzania przy rozciąganiu:
a) widok z boku, b) widok od frontu, c) widok 3D

Fig. 5-23 Concept of measurement benches for creep testing under tension:
a) side view, b) front view, c) 3D view

Elektroniczna waga hakowa o zakresie 0-3 kN i dokładności 1 N (III klasa dokładności) była instalowana w miejsce próbki przed wykonaniem badania w celu weryfikacji wartości rzeczywistego obciążenia działającego na próbkę. Do pomiaru wydłużenia próbki zastosowano potencjometryczne czujniki liniowe o zakresie od 0 do 50 mm i dokładności $\pm 0,5$ % określonej w odniesieniu do wartości zakresu (Rys. 5-25). Warunki prowadzonych badań były analogiczne jak w przypadku badań zginania, ze względu na wykonywanie ich równolegle w czasie i w tym samym pomieszczeniu.



Rys. 5-24 Stanowiska do pełzania przy rozciąganiu.

Fig. 5-24 Benches for creep testing at tensile loading



a)



b)

Rys. 5-25 Stanowiska do pełzania przy rozciąganiu:

a) obciążniki na końcach stalowych ramion, b) uchwyt próbki wraz z czujnikiem pomiarowym

Fig. 5-25 Creep at tensile testing benches:

a) weights on the ends of steel arms, b) specimen grip with measurement sensor

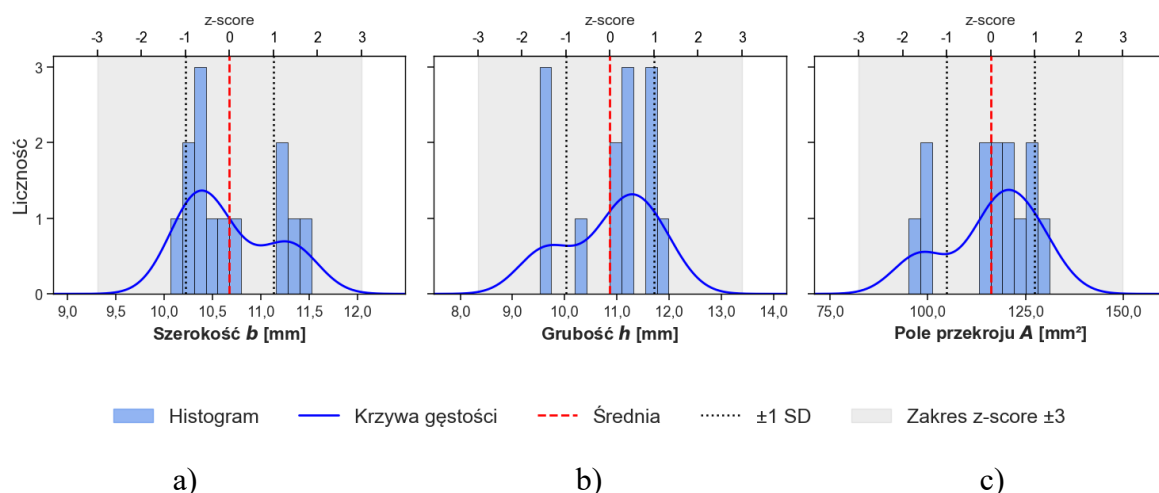
5.4.3.2. Charakterystyka próbek przyjętych do badań

Do testów przygotowano próbki w formie tzw. „wioselek” o przekroju prostokątnym, wyposażone w główki montażowe zgodnie z normą (ISO 527-2, 2012). Wszystkie próbki wycinano z jednego profilu produkcyjnego PE, stosując technikę cięcia strumieniem wody (*water jet*). Łącznie przygotowano 13 próbek. Każda próbka miała długość całkowitą 170 mm, przy czym długość zwężenia wynosiła 80 mm.

Przekrój poprzeczny próbek miał kształt prostokątny, o grubości mieszczącej się w zakresie od 9,5 do 11,7 mm oraz szerokości od 10,0 do 11,0 mm. Wymiary te dobrano tak, aby zapewnić odpowiednią sztywność próbki, a jednocześnie umożliwić dokładny pomiar wydłużenia w trakcie rozciągania.

W Załączniku 1 w Tabeli Z1-3 przedstawiono szczegółowe parametry geometryczne badanych próbek HDPE, w tym szerokość, grubość, ich niepewności i odchylenia standardowe oraz pole przekroju poprzecznego wraz z niepewnością. Zestawienie danych (Rys. 5-15) pokazuje, że szerokość próbek mieściła się w zakresie od ok. 10,14 mm do 11,42 mm, a grubość od 9,56 mm do 11,93 mm. Pole przekroju poprzecznego wahało się od ok. 96,94 mm² do 130,65 mm². Małe wartości niepewności i odchyłeń standardowych nie przekraczające 0,2 mm świadczą o wysokiej jednorodności wymiarowej próbek, co jest istotne dla rzetelności pomiarów wydłużenia.

Analiza standaryzowanych wartości odchyłeń (z-score) zestawiono w Tabeli Z1-4 umieszczonej w Załączniku 1 oraz zobrazowano na Rys. 5-26. Maksymalne wartości bezwzględne z-score maksymalnego wydłużenia i pola przekroju poprzecznego nie przekraczają 2,13. Można zatem stwierdzić, że zgodnie z przyjętym kryterium oceny ($z\text{-score} > 3$) (Koronacki i Mielniczuk, 2006) w badanej próbce nie występują wartości o cechach w stopniu istotnym odbiegających od cech populacji.



Rys. 5-26 Rozkład geometryczny i wskaźnik z-score parametrów przekrojów poprzecznych próbek rozciąganych: a) szerokość, b) grubość, c) moment bezwładności

Fig. 5-26 Distribution of geometric and Z-score for parameters of cross-sections of tensile specimens: a) width, b) thickness, c) moment of inertia

5.4.3.3. Metodyka badań

Próbki poddawano testom rozciągania w warunkach laboratoryjnych, zgodnie z procedurą przewidzianą w normie (ISO 527-2, 2012). Każda próbka była mocowana w uchwytach w taki sposób, aby wyeliminować możliwość poślizgu lub przekoszenia. W trakcie badań rejestrowano wydłużenie próbki za pomocą czujników potencjometrycznych analogicznie jak w badaniu pełzania przy zginaniu. Przyjęta metodyka pozwoliła na uzyskanie wiarygodnych i powtarzalnych wyników, umożliwiających szczegółową analizę wpływu długookresowego obciążenia na właściwości mechaniczne HDPE. Jednocześnie, dzięki zastosowaniu próbek wycinanych z jednego profilu, możliwe było ograniczenie zmienności materiałowej, wynikającej z różnic technologicznych w procesach produkcyjnych, co dodatkowo zwiększało wartość poznawczą uzyskanych wyników.

Tabela 5-8 zawiera zestawienie wartości obciążeń przyłożonych do próbek w postaci siły F , odpowiadających naprężeniom początkowym σ_0 oraz wartości bazy pomiarowej czujnika L_0 .

Tabela 5-8 Zestawienie parametrów obciążenia i czasu badania próbek w teście pełzania HDPE przy rozciąganiu

Table 5-8 Summary of loading parameters and testing time of specimens in the HDPE tensile creep test

<i>Lp.</i>	<i>Nazwa próbki</i>	<i>Siła</i>	<i>Baza pomiarowa</i>	<i>Napężenie początkowe</i>
		<i>F</i>	<i>L₀</i>	<i>σ₀</i>
		<i>[N]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[MPa]</i>
1	2_e5_05	125.00	140.60	1.00
2	2_e6_05	117.00	140.65	1.00
3	2_e5_06	250.00	136.27	2.00
4	2_e6_06	261.00	140.25	2.00
5	2_e4_06	296.40	121.55	3.00
6	2_e6_04	462.00	120.60	4.00
7	D_e4_08	605.00	121.83	5.00
8	2_e4_05	593.00	148.30	6.00
9	D_e4_07	891.10	127.20	7.00
10	2_e4_07	775.00	148.15	8.00
11	2_e5_07	1075.00	140.15	9.00
12	2_e6_07	1066.00	140.95	9.00
13	3_e6_08	1150.00	131.52	10.00

Siły rozciągające wahały się od 117 N do 1150 N, co przekładało się na naprężenia początkowe w zakresie od 1 MPa do 10 MPa. Czas trwania testów był zróżnicowany i zależał głównie od czasu ustabilizowania wydłużenia próbki, tj. wygaśnięcia zmian wydłużenia pomiędzy kolejnymi krokami czasowymi (zmiana poniżej poziomu dokładności pomiaru czujnika). Czas badania wynosił od 641 godzin do 1725 godzin. Zastosowany zakres naprężeń i czas badania pozwoliły na ocenę zachowania materiału w różnych warunkach obciążenia i czasie. Odczyty wydłużeń i rejestrację danych wykonywano analogicznie jak w badaniu pełzania przy zginaniu (Rozdział 5.4.2.3).

5.4.3.4. Wyniki i analiza pomiarów

Tabela 5-9 prezentuje zestawienie wyników pomiarów, łącząc parametry geometryczne (pole przekroju), naprężenia początkowe i rzeczywiste, maksymalne wydłużenia i odkształcenia oraz czas trwania badania. Karty badawcze dla pomiarów każdej z próbek umieszczono w Załączniku 4.

Ze względu na ograniczenia wynikające ze sposobu pomiaru wydłużeń za pomocą posiadanej aparatury, eksperymentalnie obliczono średni współczynnik korekcyjny k wydłużenia długości zwężenia do wydłużenia pomiędzy mocowaniami ΔL , który dla badanych próbek wyniósł $k = 0,64-0,73$. W dalszych analizach wszystkie wartości

odkształceń odnoszone są do długości bazy pomiarowej próbki $l_0 = 80$ mm. Odkształcenie $\varepsilon(t)$ dla bazy pomiarowej o długości 80mm zostało ustalone ze wzoru (5.1):

$$\varepsilon(t) = \frac{k \cdot \Delta L}{l_0} [-] \quad (5.1)$$

Szczegółowe wyniki wyznaczania średniego współczynnika wydłużenia przedstawione zostały w Tabeli Z5-1 w Załączniku 5. W Tabeli 5-9 przedstawiono zestawienie liczbowe wyników badań wraz z naprężeniem początkowym, maksymalnym wydłużeniem odkształceniem (wyznaczonym ze wzoru (5.1)) i podatnością oraz czasem badania poszczególnych próbek.

Tabela 5-9 Zestawienie pomiarów maksymalnego wydłużenia i maksymalnego odkształcenia i podatności próbek w teście pełzania HDPE przy rozciąganiu

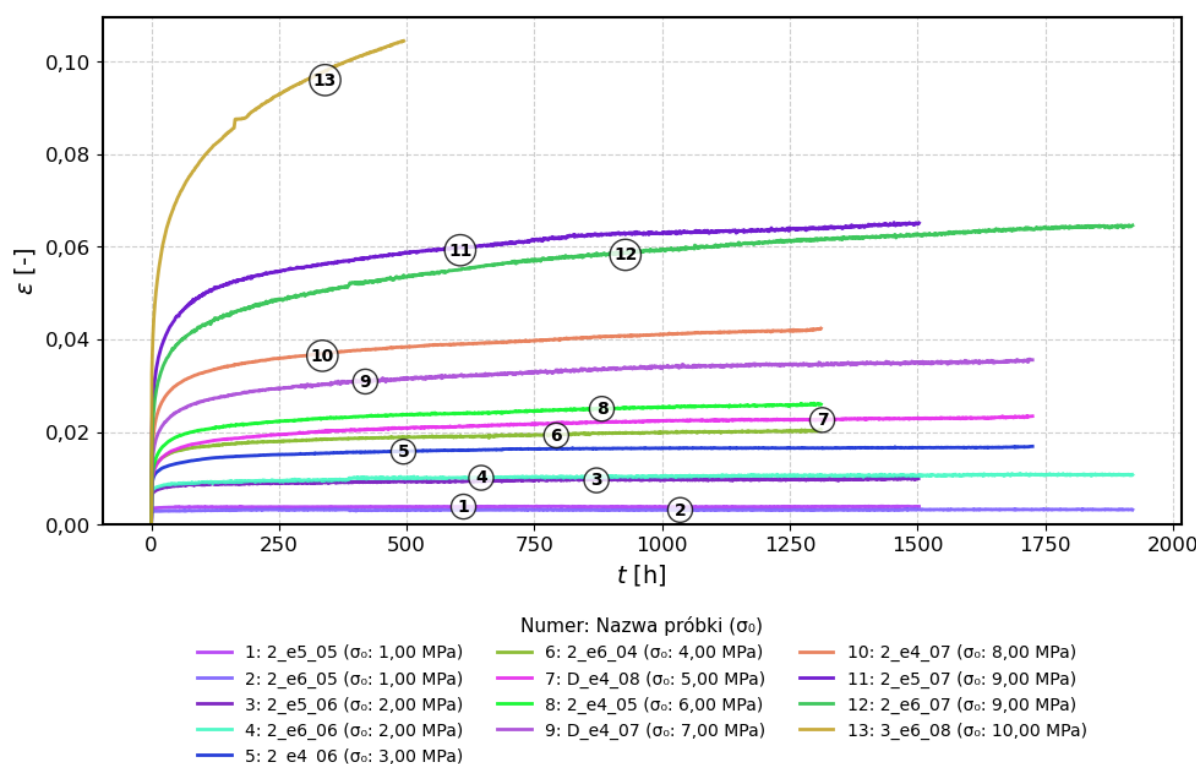
Table 5-9 Summary of measurements of maximum elongation and calculated maximum strain and compliance of tested specimens in the HDPE tensile creep test

Lp.	Nazwa próbki	Pole przekroju	Naprężenie początkowe	Maksymalne wydłużenie	Współczynnik korekcyjny	Maksymalne odkształcenie	Maksymalna podatność	Czas badania
		A	σ_0	$\Delta L(t_{max})$	k	$\varepsilon(t_{max})$	$J(t_{max})$	t_{max}
		[mm ²]	[MPa]	[mm]	[mm]	[-]	[MPa ⁻¹ ·10 ³]	[h]
1	2_e5_05	125,58	1,0	0,49	0,66	0,004	4,00	1503
2	2_e6_05	116,77	1,0	0,41	0,66	0,003	3,40	1921
3	2_e5_06	125,00	2,0	1,21	0,67	0,010	5,05	1502
4	2_e6_06	130,65	2,0	1,35	0,66	0,011	5,50	1921
5	2_e4_06	98,79	3,0	1,86	0,73	0,017	5,63	1725
6	2_e6_04	115,40	4,0	2,24	0,73	0,021	5,13	1311
7	D_e4_08	121,02	5,0	2,59	0,73	0,024	4,71	1725
8	2_e4_05	98,75	6,0	3,27	0,64	0,026	4,37	1311
9	D_e4_07	127,34	7,0	4,06	0,70	0,036	5,11	1725
10	2_e4_07	96,94	8,0	5,26	0,65	0,042	5,30	1311
11	2_e5_07	119,34	9,0	7,83	0,67	0,065	7,26	1503
12	2_e6_07	118,48	9,0	7,67	0,68	0,065	7,19	1921
13	3_e6_08	114,90	10,0	12,05	0,69	0,104	10,45	494

Maksymalne wydłużenia próbek wahały się od 0,40 mm do 12,05 mm, a odpowiadające im maksymalne odkształcenia od 0,003 do 0,104. Największe wartości odkształceń i wydłużeń odnotowano dla próbki 3_e6_08. Maksymalne podatności wahały się od $3,4 \cdot 10^{-3}$ MPa⁻¹ (próbka 2_e6_05) do $10,45 \cdot 10^{-3}$ MPa⁻¹ (próbka 3_e6_08). Średnia wartość podatności wynosiła $5,62 \cdot 10^{-3}$ MPa⁻¹, a mediana $5,13 \cdot 10^{-3}$ MPa⁻¹.

W Załączniku 5 przedstawiono zależności wartości końcowego wydłużenia próbek HDPE w funkcji naprężenia początkowego (Rys. Z5-1). Z przedstawionej zależności wynika, że końcowe wydłużenie wzrasta wraz ze wzrostem naprężenia początkowego.

Na Rys. 5-27 przedstawiono szczegółowe krzywe pełzania $\varepsilon(t)$ próbek PE poddanych jednoosiowemu rozciąganiu. Krzywe te obrazują przebieg odkształcenia próbek w funkcji czasu, umożliwiając analizę dynamiki deformacji materiału pod długotrwałym stałym obciążeniem rozciągającym.



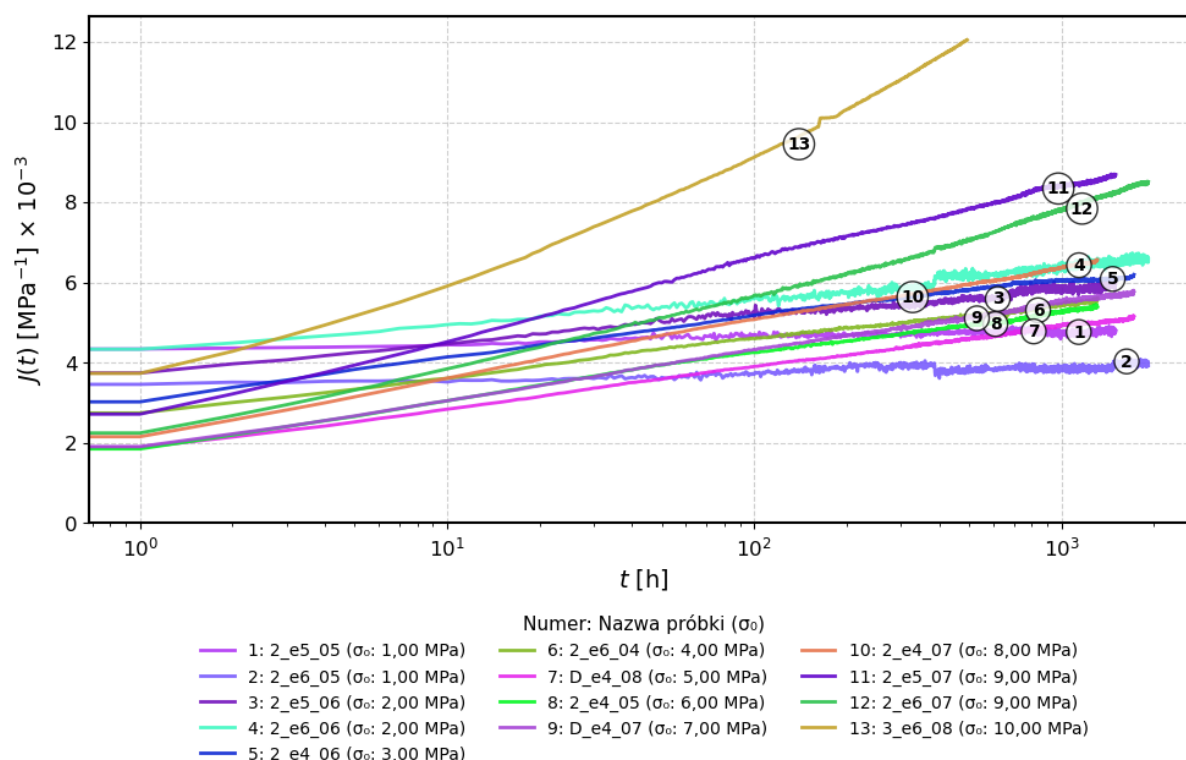
Rys. 5-27 Krzywe pełzania – odkształcenie ε próbek PE przy rozciąganiu w funkcji czasu

Fig. 5-27 Creep curves – strain ε of PE specimens under tension as a function of time

Porównanie poszczególnych charakterystyk wskazuje, że intensywność pełzania próbek HDPE wyraźnie zależy od wartości naprężenia początkowego. Przy mniejszych wartościach naprężeń (do ok. 6 MPa) rozwój deformacji ma charakter zbliżony do liniowego, z tendencją do stabilizacji po stosunkowo krótkim czasie (ok. 1000h). Przy naprężeniach przekraczających 7 MPa obserwuje się wyraźne przyspieszenie rozwoju odkształceń wraz z czasem trwania obciążenia, mogące prowadzić do gwałtownego zwiększenia intensywności pełzania (przejścia w stadium pełzania III rzędu). Uzyskane wyniki wskazują na istnienie progowego naprężenia (~ 7 MPa), powyżej którego materiał wykazuje wyraźną skłonność

do utraty stabilności mechanicznej w warunkach długookresowego rozciągania. Interesujący wydaje się również przebieg pełzania próbek przy naprężeniu 9 MPa, gdzie można zauważyć, że pomimo różnej intensywności zmian odkształcenia w pierwszych chwilach czasowych, w długim okresie wartości te zbiegają do podobnej wartości odkształcenia.

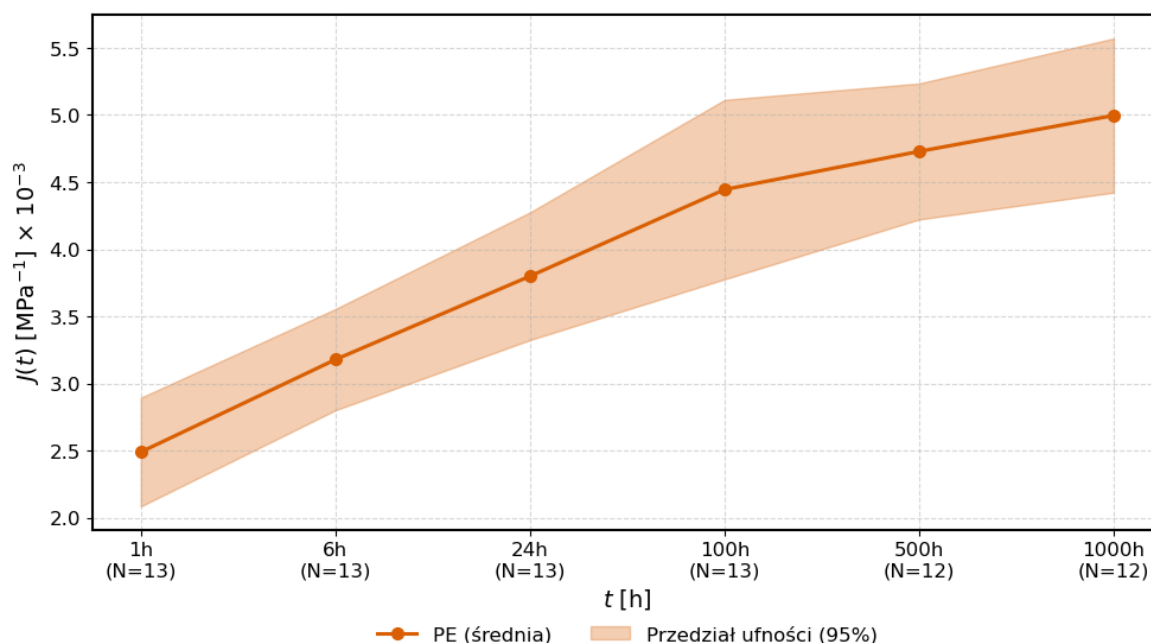
Na Rys. 5-28 przedstawiono wykres krzywych podatności $J(t)$ w funkcji czasu.



Rys. 5-28 Krzywe podatności pełzania $J(t)$ próbek PE przy jednoosiowym rozciąganiu w funkcji czasu

Fig. 5-28 Creep compliance $J(t)$ of PE specimens under uniaxial tension testing as a function of time

Na wykresie Rys. 5-29 przedstawiono średnią krzywą podatności $J(t)$ pełzania wszystkich badanych próbek poddanych jednoosiowemu rozciąganiu w wybranych chwilach czasowych.



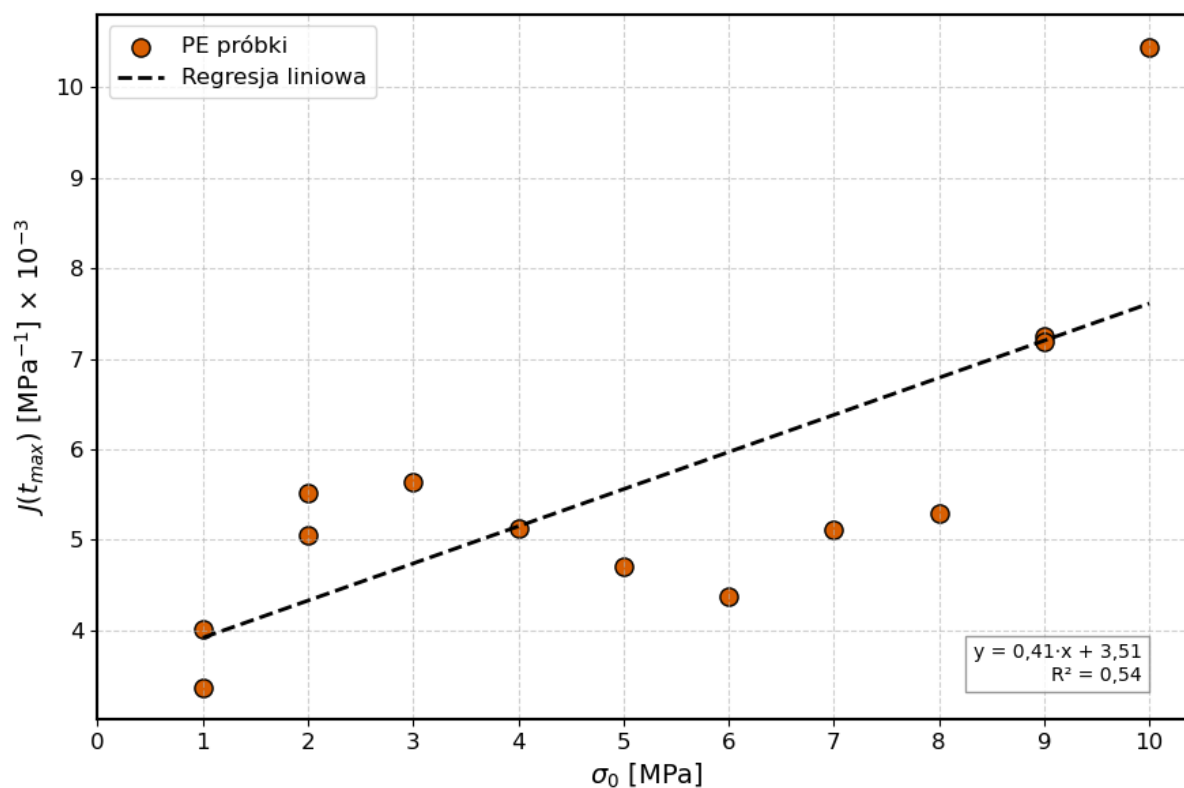
Rys. 5-29 Średnia krzywa podatności $J(t)$ w funkcji czasu.
Półprzezroczyste pole zakreśla rozrzut wyników w danej chwili czasowej dla $p\text{-value}=0,05$

Fig. 5-29 Mean creep compliance $J(t)$ as a function of time.
The semi-transparent shaded area indicate the spread of results at each time point for $p\text{-value}=0,05$

Wykres Rys. 5-28 wskazuje, że krzywe podatności próbek w zakresie naprężeń początkowych do ok. 8 MPa rosną niemal liniowo w czasie, i są o zbliżonych nachyleniach. Krzywe podatności dla próbek o naprężeniu początkowym 9 MPa wyraźnie intensywniej przyrastają w czasie, a dla $\sigma_0 = 10\text{MPa}$ krzywa wykazuje najszybszy wzrost już w pierwszych godzinach, a zmiana podatności jest nieliniowa w czasie o trendzie narastającym.

Średnia podatność $J(t)$ rośnie w chwilach czasowych, co świadczy o naturalnym uplastycznianiu się materiału pod wpływem długotrwałego obciążenia. Przedział ufności (przy $p=0,05$) wskazuje na stosunkowo niewielki rozrzut wyników między próbkami, co podkreśla jednorodność zachowania materiału. Rozrzut ten maleje po usunięciu próbki 3_e6_08, która uległa zniszczeniu po 494 godzinach badania i nie była wliczana do chwil czasowych 500 i 1000h.

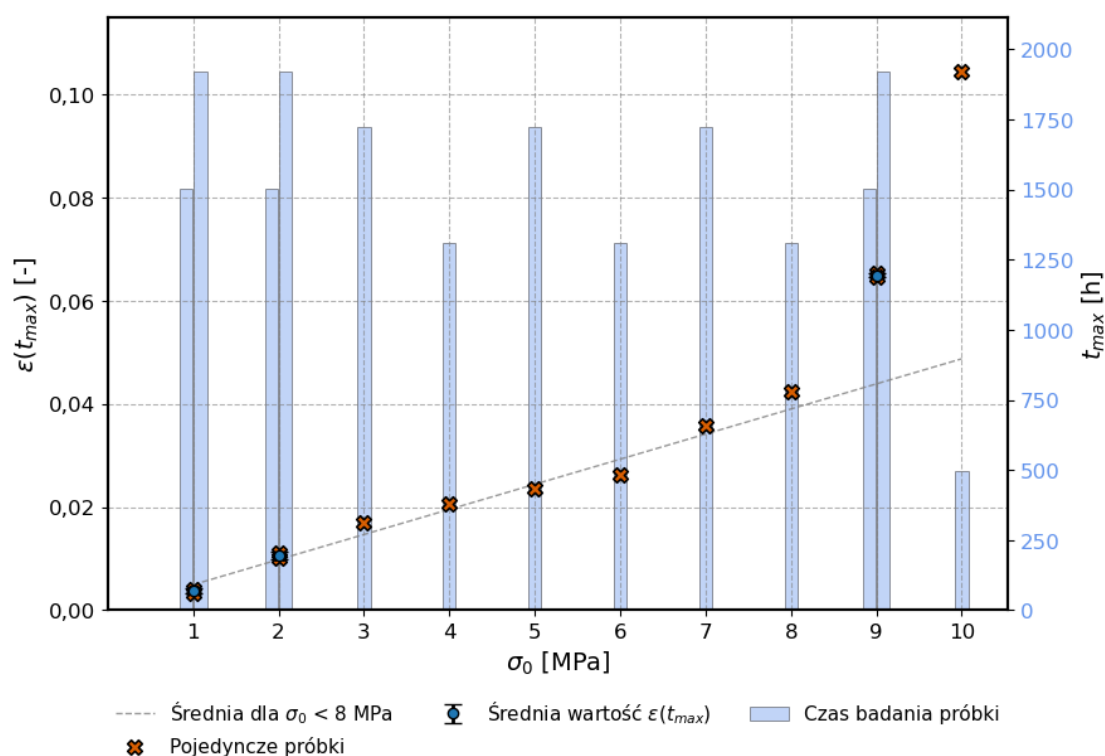
Na Rys. 5-30 przedstawiono wykres wartości maksymalnej podatności $J(t_{max})$ w funkcji naprężenia początkowego σ_0 jaka została określona na podstawie obliczonego odkształcenia.



Rys. 5-30 Maksymalne wartości podatności $J(t_{max})$ w funkcji naprężenia początkowego σ_0

Fig. 5-30 Maximum values of creep compliance $J(t_{max})$ as a function of initial stress σ_0

Na wykresie Rys. 5-30, w zakresie naprężeń do ok. 8 MPa korelacja pomiędzy naprężeniem początkowym a podatnością końcową $J(t_{max})$ jest nieznaczna i widoczny jest rozrzut wartości pomiędzy $4 \cdot 10^{-3}$ a $6 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$. Rosnąca zależność wynika przede wszystkim z wartości podatności przy naprężeniu początkowym σ_0 większym od 8 MPa i sugeruje, że zjawiska pełzania w tym zakresie tracą charakter liniowy i stają się trudniejsze do przewidzenia na bazie prostych modeli.



Rys. 5-31 Wykres maksymalnego odkształcenia $\epsilon(t_{max})$ w funkcji naprężenia początkowego σ_0 próbek poddanych pełzaniu przy rozciąganiu

Fig. 5-31 Plot of maximum strain $\epsilon(t_{max})$ as a function of initial stress σ_0 for specimens subjected to creep under tension

Na wykresie Rys. 5-31 widać wyraźną zależność między wartością naprężenia początkowego a maksymalnym (końcowym) odkształceniem próbek. Obserwowany jest wyraźny trend wzrostu maksymalnego wydłużenia i odkształcenia wraz ze wzrostem naprężenia początkowego, co jest zgodne z oczekiwaniami dotyczącymi zachowania materiału pod wpływem rosnącego obciążenia. Przy naprężeniach mniejszych niż 8 MPa, odkształcenia końcowe pozostają niemal liniowo zależne od wartości średniego naprężenia. Powyżej tej granicy obserwuje się nagły, nieliniowy wzrost deformacji, ujawniający się nie później niż po 700-1000 godzinach działania obciążenia.

Przeprowadzone badania pełzania HDPE przy jednoosiowym rozciąganiu wykazały, że zachowanie materiału jest silnie zależne od wartości naprężenia początkowego. Do poziomu ok. 7 MPa deformacje przebiegają wolno i stabilnie, z tendencją do stabilizacji w czasie. Natomiast powyżej 7 MPa proces pełzania wyraźnie się intensyfikuje, co prowadzi do gwałtownego wzrostu odkształceń i podatności $J(t)$ oraz skrócenia trwałości próbek. Wnioski te wskazują na istnienie wartości granicznej naprężenia, której przekroczenie skutkuje utratą stabilności mechanicznej HDPE w warunkach długookresowego obciążenia rozciągającego.

5.4.4. Podsumowanie

Wartości podatności uzyskane z badań pełzania przy zginaniu i przy rozciąganiu dla badanych HDPE są porównywalne: przy trójpunktowym zginaniu $J(t_{max}) = 2,69-9,66 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ przy średniej wartości $4,62 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$, oraz medianie równej $4,10 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$, a przy jednoosiowym rozciąganiu $J(t_{max}) = 3,40-10,45 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ przy średniej wartości $5,62 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$, oraz medianie równej $5,13 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$. W ujęciu względnym podatność przy rozciąganiu jest większa: średnia o 21,6 % a mediana o 25,1 %. Różnica pomiędzy minimalnymi wartościami stanowi 26,4 %, a pomiędzy wartościami maksymalnymi jest mniejsza i wynosi 8,2 %. Wartości podatności uzyskane z badań laboratoryjnych mieszczą się w zakresie podatności jakie opisane zostały w literaturze, gdzie np. Janson (Janson, 1993) otrzymał po 1000h badania próbki HDPE obciążonej naprężeniem początkowym wynoszącym ok. 5 MPa podatność o wartości ok. $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$.

Wyniki badań głównych i przeprowadzonych analiz jednoznacznie wskazują na silną zależność przebiegu pełzania od wartości naprężenia początkowego. Przy mniejszych naprężeniach przyrost deformacji jest prawie liniowy, natomiast wraz ze wzrostem naprężenia krzywe wyraźnie się rozwarstwiają i z czasem przybierają kształt nieliniowy, mimo braku bezpośrednich objawów zniszczenia próbek. Taki sposób narastania odkształceń implikuje, że przy projektowaniu elementów z HDPE do pracy długookresowej trzeba uwzględniać zależność odpowiedzi materiału od obciążenia, a w obliczeniach trwałości posługiwać się charakterystykami wyprowadzonymi dla odpowiadających im zakresów naprężeń.

Równolegle obserwacje wskazują, że wraz ze wzrostem smukłości przekroju rośnie zróżnicowanie podatności na pełzanie pomiędzy pozornie podobnymi próbkami. Rozbieżności te należy wiązać z niejednorodnościami w przekroju i wzdłuż długości (pochodnymi procesu obróbki i przygotowania), ale także z wrażliwością układu pomiarowego na detale geometrii

i podparcia. Nierównomierność rozkładu naprężeń normalnych w przekroju przekłada się na większy rozrzut przemieszczeń w czasie, co powinno być odzwierciedlone w planie badań (dobór wymiarów i tolerancji) oraz w estymacji niepewności.

Istotne jest też to, że próbki z recyklatu (RPE) nie wykazały istotnych różnic względem materiału pierwotnego (PE) w badanym zakresie obciążeń i czasów. W praktyce oznacza to porównywalną użyteczność obu materiałów w zastosowaniach inżynierskich, przynajmniej w odniesieniu do odporności na pełzanie w rozpatrywanych warunkach. Ogólna analiza wyników podkreśla konieczność ujęcia wpływu czasu wprost w opisie degradacji mechanicznej HDPE: modelowanie eksploatacyjne powinno korzystać z funkcji podatności zależnych od czasu oraz z parametrów kalibrowanych na podstawie danych długookresowych.

5.5. Badania uzupełniające

5.5.1. *Badania mikrostruktury materiału*

5.5.1.1. *Wprowadzenie*

Badania mikrostruktury materiału HDPE przeprowadzono w celu identyfikacji zmian powstałych w procesie formowania profili, eksploatacji materiału, w tym w wyniku działania obciążeń mechanicznych. Celem badań było określenie wpływu krótkotrwałych i długotrwałych obciążeń na zmiany mikrostrukturalne oraz wyznaczenie granicznych wartości odkształcenia prowadzących do degradacji materiału. Analizowano zarówno próbki w stanie pierwotnym, jak i po zmianach wywołanych odkształceniami mechanicznymi, zwracając szczególną uwagę na degradację struktury prowadzącą do obniżenia wytrzymałości.

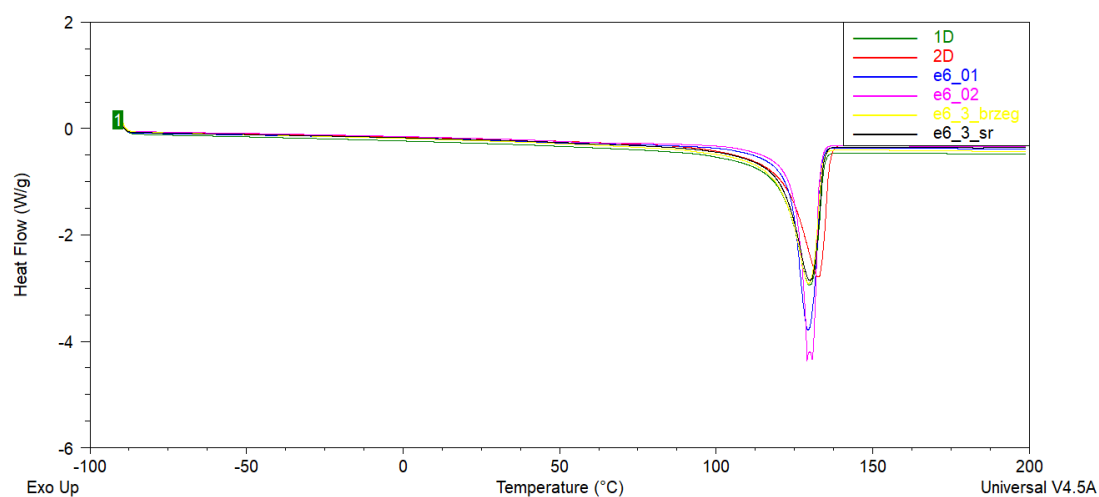
Do badań mikrostrukturalnych materiału pierwotnego wykorzystano sześć próbek pobranych z rzeczywistych elementów konstrukcyjnych zbiorników z HDPE: dwa elementy belkowe (PE – 1D oraz RPE – 2D) o wymiarach ok. 35×15×350 mm, wycięte z fragmentów konstrukcji podczas mechanicznej obróbki dennicy, oraz trzy próbki w postaci wiosełek o długości ok. 170 mm, uzyskane metodą cięcia wodą z profilu produkcyjnego, po jego uformowaniu. Dodatkowo wykonano badania trzech próbek poddanych badaniom laboratoryjnym. Jedną próbkę pochodzącą z jednego wiosełka w postaci pierwotnej, nie poddaną badaniu niszcącemu (e6_3) oraz 2 próbki jako dwa fragmenty pochodzące z jednego wiosełka po przeprowadzonej próbie niszczącej rozciągania (e6_01 i e6_02).

Do badań wykorzystano trzy uzupełniające się techniki: skaningową kalorymetrię różnicową (DSC), spektroskopię FTIR-ATR oraz skaningową mikroskopię elektronową (SEM). Do metody DSC wykorzystano 6 wycinków z każdej z próbek, z czego dwa pochodziły z próbki e6_3 (oznaczone jako e6_3_środek oraz e6_3_brzeg). Do metody FTIR-ATR wykorzystano łącznie 6 wycinków; po jednym z próbek e6_01, e6_02 oraz e6_3, jeden wycinek z próbki 1D oraz dwa wycinki z próbki 2D. Do skanowania mikroskopowego SEM wykorzystano fragmenty trzech próbek z wiosełek (e6_01, e6_02 oraz e6_3).

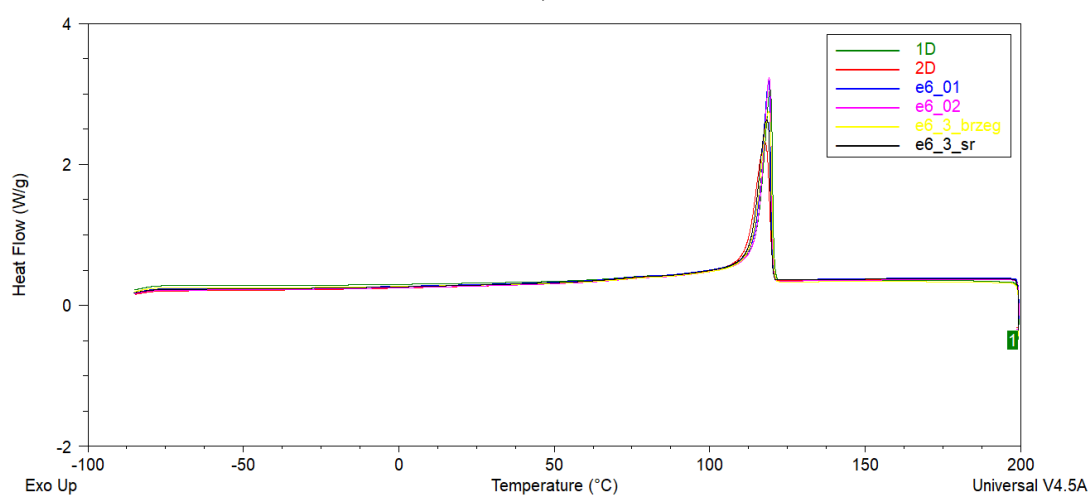
5.5.1.2. Skaningowa kalorymetria różnicowa (DSC)

Metoda DSC służy do analizy właściwości fizycznych polimerów poprzez pomiar różnicy przepływu ciepła między próbką badaną a referencyjną podczas kontrolowanej zmiany temperatury. Pozwala ona określić temperatury topnienia i krystalizacji, entalpie przemian oraz zawartość fazy krystalicznej w HDPE (Höhne i in., 1996).

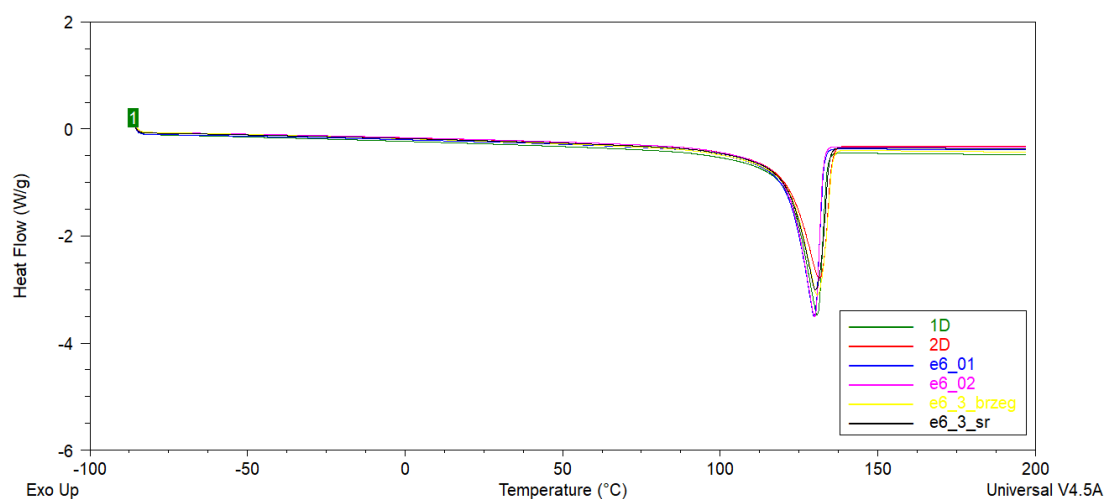
Badania DSC przeprowadzono na urządzeniu Q1000 (TA Instruments, USA). Próbkę o masie $7,5 \pm 0,2$ mg umieszczano w aluminiowych tygielkach i poddawano programowi temperaturowemu: I grzanie od -80 do 200°C , chłodzenie od 200 do -80°C , II grzanie od -100 do 200°C , z prędkością $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, w atmosferze helu (przepływ $25\text{ ml}/\text{min}$). Na podstawie termogramów DSC wyznaczono temperatury topnienia fazy krystalicznej (T_m), temperatury krystalizacji (T_c), wartości entalpii topnienia (ΔH_m) i krystalizacji (ΔH_c), oraz zawartość fazy krystalicznej (X_c), przyjmując wartość entalpii topnienia polietylenu całkowicie krystalicznego $\Delta H_{t,100\%} = 290\text{ J/g}$. Szczegółowe wyniki tych badań zostały przedstawione na wykresach (Rys. 5-32) oraz w Tabeli 5-10.



a)



b)



c)

Rys. 5-32 Krzywe DSC próbek HDPE:
a) ogrzewanie – etap 1, b) chłodzenie, c) ogrzewanie – etap 2

Fig. 5-32 DSC curves of HDPE specimens:
a) heating – stage 1, b) cooling, c) heating – stage 2

Tabela 5-10 Parametry materiałowe wyznaczone na podstawie krzywych DSC

Table 5-10 Material parameters determined from DSC curves

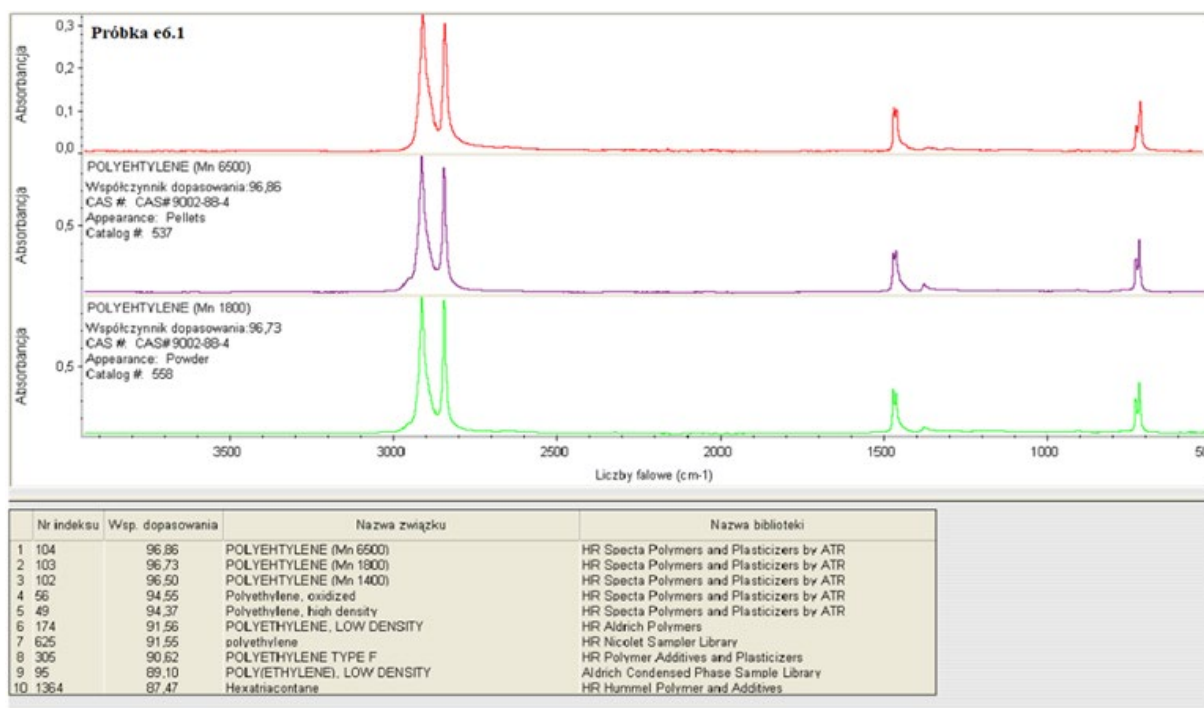
próbka	Ogrzewanie – etap 1			Chłodzenie		Ogrzewanie – etap 2		
	T_m	ΔH_m	X_c	T_c	ΔH_c	T_m	ΔH_m	X_c
	[°C]	[J/g]	[%]	[°C]	[J/g]	[°C]	[J/g]	[%]
1D	129,9	172,5	59	119,4	187,7	130,7	178,8	62
2D	132,5	185,2	64	117,7	172	131,4	181,9	63
e6_01	129,4	171,1	59	118,9	174,9	129,8	171,3	59
e6_02	129	168,9	58	119,1	163,5	129,9	172,1	59
e6_3_brzeg	129,5	169,5	58	119,1	187,6	130,8	185,4	64
e6_3_środek	129,95	171,1	59	118,4	169,2	130,2	176,1	61

Temperatura topnienia fazy krystalicznej materiałów PE (1D) i RPE (2D) jest zbliżona (RPE wyższa o 3°C w pierwszym i o 1°C w drugim grzaniu) i wynosi ok. 131°C. Różnice w entalpii topnienia odpowiadają różnicom w zawartości fazy krystalicznej na poziomie ok. 5 %. Zawartość fazy krystalicznej po drugim grzaniu była podobna w obu materiałach. W zakresie temperatur ok. 100°C inicjowane są procesy topnienia fazy krystalicznej, co może prowadzić do zmian nadcząsteczkowych w materiale. Nie stwierdzono charakterystycznej przemiany endotermicznej odpowiadającej temperaturze zeszklenia.

5.5.1.3. Spektroskopia FTIR-ATR

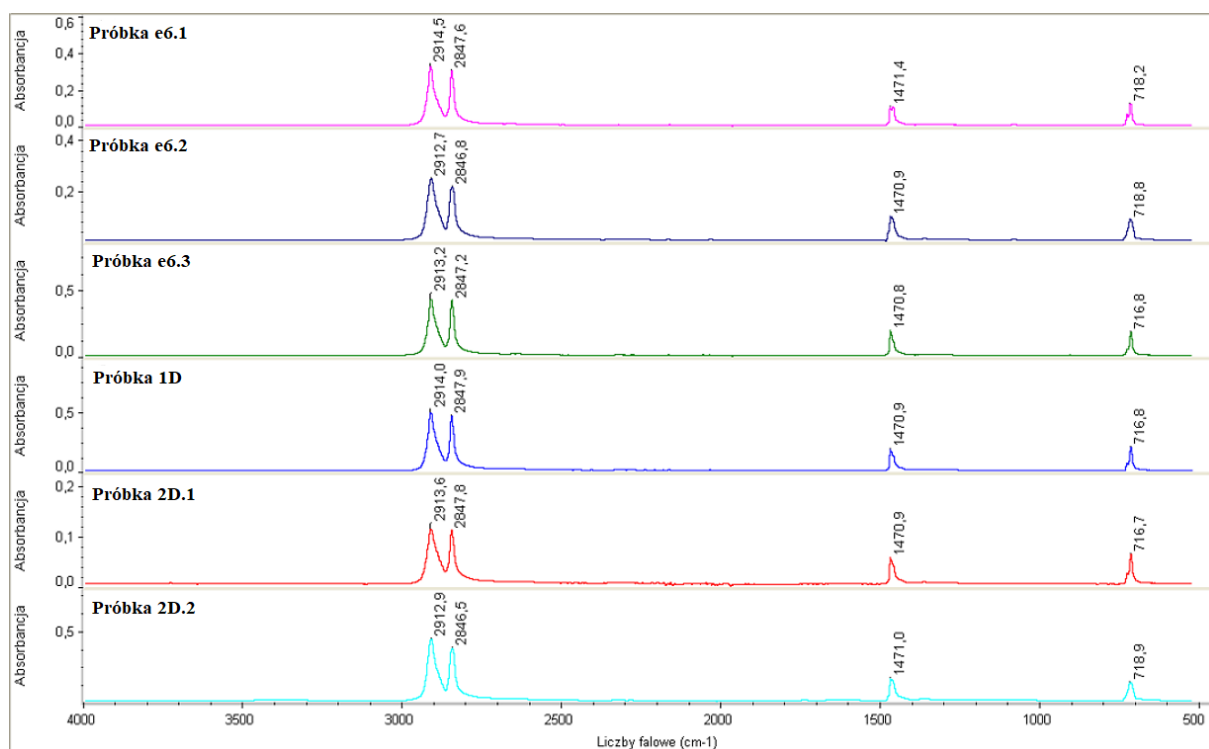
Technika spektroskopowa polega na analizie widma promieniowania podczerwonego pochłanianego przez próbkę. Umożliwia identyfikację grup funkcyjnych i potwierdzenie budowy chemicznej materiału, w tym przypadku polietylenu HDPE, na podstawie charakterystycznych pasm w widmie (B. H. Stuart, 2004).

Analizy FTIR-ATR wykonano na spektrofotometrze Nicolet 6700 (Thermo Scientific). Próbkę skanowano 32 razy z rozdzielczością 4 cm⁻¹ w zakresie 400 - 4000 cm⁻¹, używając kryształu diamentowego o głębokości penetracji 1,7 µm. Widma FTIR-ATR wykazały obecność pasm charakterystycznych dla polietylenu, a bardzo wysoki współczynnik dopasowania do bibliotek aparatu jednoznacznie potwierdził typową budowę chemiczną wszystkich badanych próbek (Rys. 5-33). Analiza FTIR-ATR miała charakter jakościowy i nie wykazała istotnych różnic pomiędzy próbkami PE i RPE. Widma dla każdej z próbek wraz z zaznaczonymi liczbami falowymi przy zarejestrowanych pasmach charakterystycznych dla badanych próbek przedstawiono na Rys. 5-34.



Rys. 5-33 Dopasowanie widma HDPE do wzorca bibliotecznego

Fig. 5-33 Matching the HDPE spectrum to the reference library standard



Rys. 5-34 Widma FTIR-ART badanych próbek z HDPE

Fig. 5-34 FTIR-ATR spectra of the tested HDPE samples

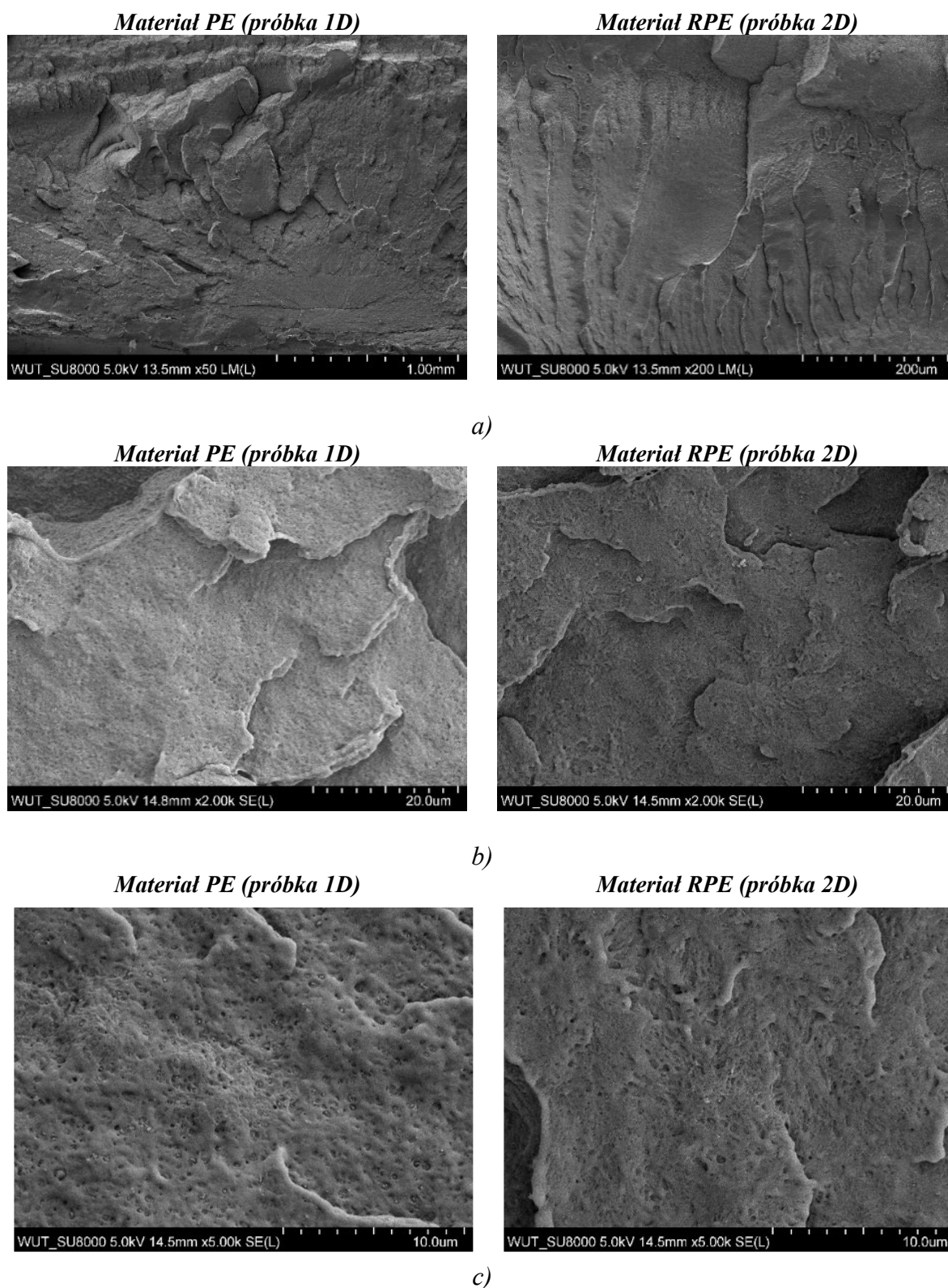
5.5.1.4. Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM)

Metoda SEM służy do obrazowania mikrostruktury próbki przez skanowanie jej powierzchni zogniskowaną wiązką elektronów. Pozwala uzyskać szczegółowe informacje o topografii i morfologii powierzchni oraz obserwować zmiany mikrostrukturalne, takie jak przełomy czy ukierunkowanie faz w HDPE (Reimer, 2000).

Obserwacje SEM prowadzono na mikroskopie SU800 Hitachi (Japonia) w zakresie powiększeń 50 - 5000x. Próbkę do badań napyłano warstwą złota o grubości 6 nm w napyłarce Leica. Kruche przełomy uzyskiwano przez łamanie próbek wymrożonych przez ok. 30 min w ciekłym azocie. Analizowano zarówno obszary nieodkształcone, jak i fragmenty pobrane z szyjki utworzonej podczas rozciągania.

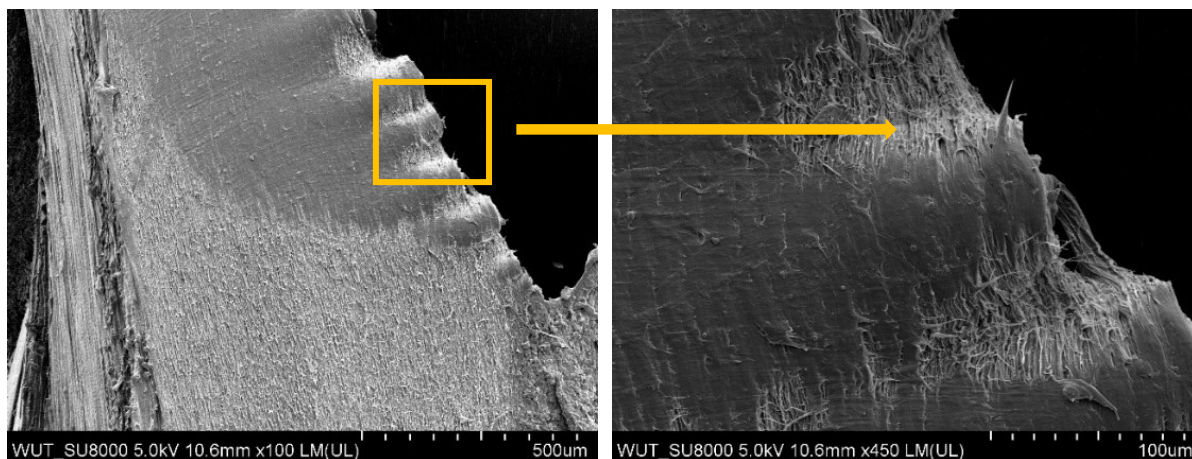
Na Rys. 5-35 zestawiono zobrazowanie struktury materiału PE i RPE. W przełomie nieodkształconej próbki (e6_01) widoczne były cechy kruchego pęknięcia – na powiększeniach 50x obserwowano krawędzie przełomu typowe dla pęknięcia kruchego, natomiast już na powiększeniach 500x i 1000x i większych widoczne były obszary wyciągania polimeru i odkształcania plastycznego mikroobszarów materiału. W szyjce powstałej podczas rozciągania zaobserwowano ukierunkowaną, pasmową strukturę polimeru, z pasmami ułożonymi w kierunku działania siły rozciągającej. W miejscu zerwania próbki widoczna była mikrostruktura wskazująca na ukierunkowane ułożenie makrocząsteczek HDPE.

Na Rys. 5-36 przedstawiono mikrostrukturę polimeru w miejscu zerwania próbki a na Rys. 5-37 w obszarze szyjki powstałej w trakcie badania niszczącego przy osiowym rozciąganiu. Wyniki badań SEM wskazują, że w strefach rozciąganych mogą pojawiać się pustki, zwłaszcza tam, gdzie wypełnienie fazą amorficzną jest niewielkie. W obszarach pomiędzy pasmami polimeru stwierdzono obecność sferycznych/eliptycznych elementów mikrostruktury. Nie stwierdzono obecności tego typu elementów na powierzchni kruchych przełomów.



Rys. 5-35 Porównawcze zobrazowanie struktury materiału PE i RPE w różnych powiększeniach:
a) 50-200x, b) 2000x c) 5000x

Fig. 5-35 Comparative imaging of PE and RPE material structures at different magnifications:
a) 50-200x, b) 2000x, c) 5000x

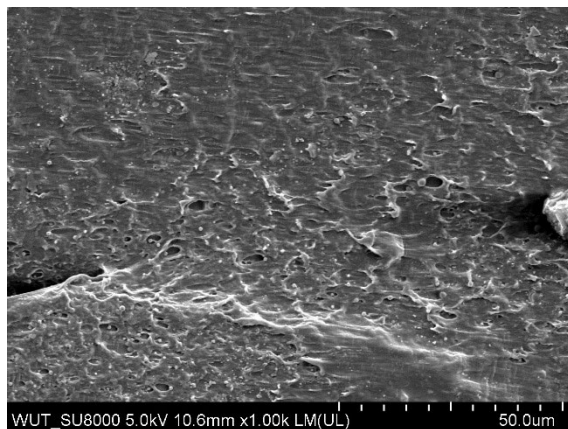


a)

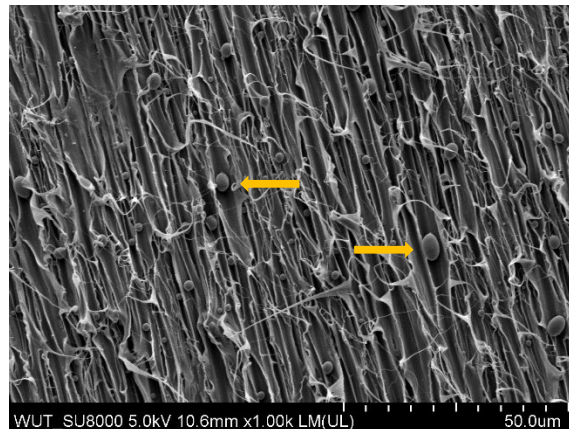
b)

Rys. 5-36 Mikrostruktura polimeru w miejscu zerwania (próbka e6_02):
a) powiększenie 100x, b) powiększenie 450x

Fig. 5-36 Polymer microstructure at the fracture site of the sample e6_02:
a) 100x magnification, b) 450x magnification



a)



b)

Rys. 5-37 Mikrostruktura polimeru w obszarze szyjki (próbka e6_3):
a) kruchy przełom, b) próbka rozciągana – widoczne sferyczne elementy

Fig. 5-37 Polymer microstructure in the necking region of sample e6_3:
a) brittle fracture, b) tensile specimen – visible spherical elements

5.5.1.5. Podsumowanie

Badania wykazały, że wszystkie analizowane materiały to tworzywa polietylenowe o typowej strukturze chemicznej i zbliżonej zawartości fazy krystalicznej. Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy próbkami PE i RPE w zakresie parametrów DSC i FTIR-ATR. Ewentualne różnice właściwości mechanicznych mogą wynikać z lokalnych zmian mikrostrukturalnych, rozkładu fazy krystalicznej i amorficznej oraz historii obciążenia i formowania.

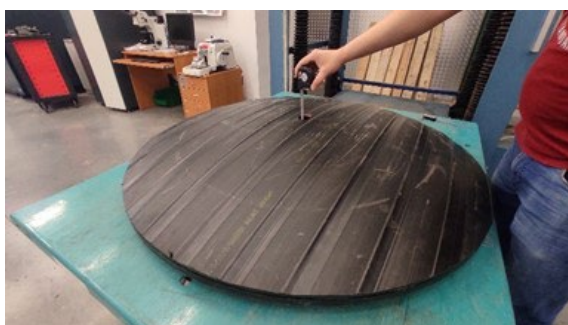
Ściskanie i ścinanie przenoszone są przez obie fazy, przy czym faza amorficzna, dzięki zróżnicowanemu ukierunkowaniu łańcuchów cząsteczkowych, działa jako spoiwo i zbrojenie dla ziaren fazy krystalicznej, zwłaszcza w strefach rozciąganych. W złożonym stanie naprężenia obserwuje się zmiany struktury przypominające powolny przepływ fazy amorficznej z obszarów intensywniej ściskanych do obszarów rozciąganych lub ściskanych słabiej, co może tłumaczyć opóźnienie w stabilizacji odpowiedzi materiału na obciążenie.

Zaleca się w przyszłości rozszerzenie badań o dodatkowe techniki, pozwalające na określenie wpływu budowy nadcząsteczkowej na przenoszenie obciążeń mechanicznych i termicznych w warunkach eksploatacyjnych.

5.5.2. Badanie krótkookresowe ściskania dennic HDPE

5.5.2.1. Wprowadzenie

Dennice sferyczne stanowią kluczowy element konstrukcyjny zbiorników z tworzyw sztucznych, decydujący o ich sztywności przestrzennej i odporności na obciążenia eksploatacyjne. W celu określenia rzeczywistej sztywności oraz charakterystyki odkształceniowej dennic przeprowadzono we współpracy z firmą Uponor Infra Sp. z o.o. serię krótkookresowych testów osiowego ściskania dennic o średnicy nominalnej DN1000 i sztywności SN4. Badaniami objęto łącznie cztery dennice: dwie wykonane z materiału HDPE PE oraz dwie z materiału HDPE RPE (Rys. 5-38). Próbkę przygotowano tak, że każda dennica została wyposażona w pierścień usztywniający z pełnej płyty HDPE, odwzorowujący współpracę z korpusem zbiornika (Rys. 5-38b).



a)



b)

Rys. 5-38 Dennica RPE DN1000 SN4 przygotowana do badań:

a) pomiar zewnętrznej strzałki wygięcia, b) pomiar wewnętrznej strzałki wygięcia. Widoczny pierścień usztywniający, założony na obwodzie dennicy

Fig. 5-38 RPE DN1000 SN4 end cap prepared for testing: a) measurement of external deflection, b) measurement of internal deflection. Visible stiffening ring fitted around the circumference of the end cap

5.5.2.2. Metodyka badania

Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, modelując rzeczywiste obciążenia eksploatacyjne. Dennice umieszczano pomiędzy dwiema równoległymi, sztywnymi płytami maszyny wytrzymałościowej i poddawano osiowemu ściskaniu. Obciążenie przykładano etapami, wymuszając przemieszczenie w osi dennicy. W trzech pierwszych krokach przyrost przemieszczenia wynosił po ok. 10 % produkcyjnej strzałki wygięcia, w ostatnim kroku 20 %, co łącznie odpowiadało 50 % spłaszczenia wycinka sfery. Prędkość przyrostu obciążenia nie przekraczała 0,2 daN/s w fazie początkowej i 0,5 daN/s w końcowej, co odpowiada warunkom napełniania lub opróżniania zbiornika w czasie jednej godziny.

W każdym kroku rejestrowano siłę nacisku i przemieszczenie: bezpośrednio po osiągnięciu zadanej deformacji oraz po 15 minutach stabilizacji, co pozwalało na eliminację efektów dynamicznych i ocenę zachowania materiału w warunkach quasi-statycznych. Przemieszczenia mierzono w najwyższym punkcie zewnętrznej powierzchni powłoki. Przed rozpoczęciem badania wykonano odczyty zerowe, a po zakończeniu przeprowadzono oględziny dennic w celu identyfikacji powstania ewentualnych uszkodzeń lub trwałych, lokalnych deformacji. Metodyka badań umożliwiała rejestrację ugięć powłoki z minimalizacją wpływu niedokładności wykonania, lokalnych deformacji związanych z punktowym lub liniowym przyłożeniem obciążeń oraz innych czynników mogących istotnie wpływać na wielkość błędu pomiarowego. Badanie modelowało obciążenie w warunkach statycznych, eliminując ewentualne efekty dynamiczne.

5.5.2.3. Wyniki badań

Parametry, przebieg i wyniki badań ściskania czterech dennic DN1000 SN4 z materiału PE i RPE zestawiono w Tabeli 5-11.

Tabela 5-11 Zestawienie parametrów i wyników badań ściskania dennic DN1000

Table 5-11 Summary of parameters and results of compression tests of DN1000 end caps

<i>Dennica</i>	<i>Wartości początkowe</i>		<i>Przebieg badania</i>				<i>Wartości końcowe</i>	
	<i>Wysokość profilu</i>	<i>Wysokość dennicy</i>	<i>Ugięcie</i>		<i>Początkowa siła nacisku</i>	<i>Siła nacisku po 15 min.</i>	<i>Wysokość profilu</i>	<i>Wysokość dennicy</i>
<i>[-]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[%]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[mm]</i>
<i>PE 1</i>	81	172	10	8,22	494	452	80	170
			20	16,44	998	922		
			30	24,66	1532	1410		
			50	41,1	2766	2528		
<i>PE 2</i>	83	173	10	8,2	364	328	83	168
			20	16,4	918	804		
			30	24,6	1617	1428		
			50	41	2684	2446		
<i>RPE 1</i>	79	172	10	8,8	604	546	79	167
			20	17,6	1094	1004		
			30	26,4	1800	1640		
			50	44	2832	2596		
<i>RPE 2</i>	80	170	10	8,5	516	468	79	162
			20	17	1236	1128		
			30	25,5	1700	1568		
			50	42,5	2660	2440		

Uzyskane wyniki dla czterech dennic DN1000 wskazują na quasi-liniowy wzrost siły wraz ze wzrostem ugięcia aż do 50 % spłaszczenia wycinka sfery, bez wyraźnych różnic między seriami materiałowymi (PE / RPE). Dla każdego poziomu deformacji odnotowano 15-minutową relaksację siły rzędu ok. 8-12 % (np. dla kroku 50 % wartości początkowe 2660-2832 daN spadały do 2440-2596 daN), co potwierdza dominującą odpowiedź lepkosprężystą HDPE na obciążenie w krótkim horyzoncie czasowym. Zestawienie aproksymacji zawiera Tabela 5-12. Zmienność pomiarów siły i ugięcia jest umiarkowana (odchylenia standardowe odpowiednio ~68-92 daN i ~1.1-1.5 mm), a różnice między PE i RPE w poszczególnych krokach nie przekraczają ~2 SD, co nie daje podstaw do stwierdzenia istotnych różnic sztywności ani tempa relaksacji między seriami.

Tabela 5-12 Zestawienie wyników aproksymacji i ocena zmienności pomiarów

Table 5-12 Summary of approximation results and assessment of measurement variability

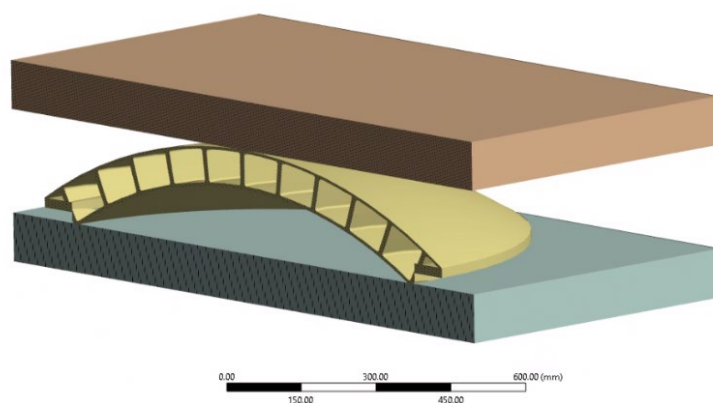
<i>Dennica PE</i>	<i>Ugięcie</i>	<i>Początkowa siła nacisku</i>		<i>Aproksymacja</i>		<i>Odchylenie</i>		<i>Dennica RPE</i>	<i>Ugięcie</i>	<i>Początkowa siła nacisku</i>		<i>Aproksymacja</i>		<i>Odchylenie</i>	
		<i>Sila nacisku po 15 min.</i>	<i>Sila nacisku po 15 min.</i>	<i>Początkowa siła nacisku</i>	<i>Sila nacisku po 15 min.</i>	<i>Początkowa siła nacisku</i>	<i>Sila nacisku po 15 min.</i>			<i>Sila nacisku po 15 min.</i>	<i>Sila nacisku po 15 min.</i>	<i>Początkowa siła nacisku</i>	<i>Sila nacisku po 15 min.</i>	<i>Początkowa siła nacisku</i>	<i>Sila nacisku po 15 min.</i>
<i>[-]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[-]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>	<i>[daN]</i>
1	8,2	494	452	531	483	-37	-31	1	8,8	604	546	571	523	33	23
	16,4	998	922	1063	966	-65	-44		17,6	1094	1004	1141	1046	-47	-42
	24,7	1532	1410	1594	1449	-62	-39		26,4	1800	1640	1712	1568	88	72
	41,1	2766	2528	2656	2414	110	114		44,0	2832	2596	2853	2614	-21	-18
2	8,2	364	328	530	482	-166	-154	2	8,5	516	468	551	505	-35	-37
	16,4	918	804	1060	963	-142	-159		17,0	1236	1128	1102	1010	134	118
	24,6	1617	1428	1590	1445	27	-17		25,5	1700	1568	1653	1515	47	53
	41,0	2684	2446	2650	2408	34	38		42,5	2660	2440	2755	2525	-95	-85
<i>odchylenie standardowe - siła [daN]:</i>						92	91	<i>odchylenie standardowe - siła [daN]:</i>						76	68
<i>odchylenie standardowe - ugięcie [mm]:</i>						1,4	1,5	<i>odchylenie standardowe - ugięcie [mm]:</i>						1,2	1,1

W analizowanych warunkach quasi-statycznych oba materiały wykazują porównywalną sztywność globalną i podobną zdolność do relaksacji krótkookresowej, a siły referencyjne przy 50 % spłaszczenia pozostają zbliżone (rzęd 26,6-28,3 kN przed relaksacją).

5.5.2.4. Analiza numeryczna MES ściskanych dennic

Analizę numeryczną odpowiedzi dennicy poddanej osiowemu ściskaniu, przeprowadzono za pomocą środowiska Ansys Mechanical wykorzystującego metodę elementów skończonych (MES). Celem analizy było ustalenie numerycznie wartości krótkookresowego modułu odkształcenia na podstawie porównania ugięć dennic uzyskanych z badań laboratoryjnych z ugięciami uzyskanymi w modelu numerycznym przy zadanym obciążeniu. Przyjęto metodę iteracyjną do uzyskania zgodności ugięć. Model geometryczny odwzorowywał rzeczywiste wymiary i kształt badanych dennic, wraz z pierścieniem usztywniającym, zgodnie z układem zastosowanym podczas badań laboratoryjnych oraz płyty prasy, które odwzorowywały podparcie i zmienną powierzchnię kontaktu dennicy z obciążeniem (Rys. 5-39).

W analizie przyjęto model materiałowy doskonale sprężysty, przyjmując liniową zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem w całym zakresie obciążeń. Własności mechaniczne materiału, takie jak współczynnik Poissona, przyjęto na podstawie wartości katalogowych dla HDPE równy 0,41. Nie uwzględniano efektów nieliniowości materiałowej ani zjawisk plastycznych, zgodnie z założeniem, że w analizowanym zakresie obciążeń materiał zachowuje się w pełni sprężysto.



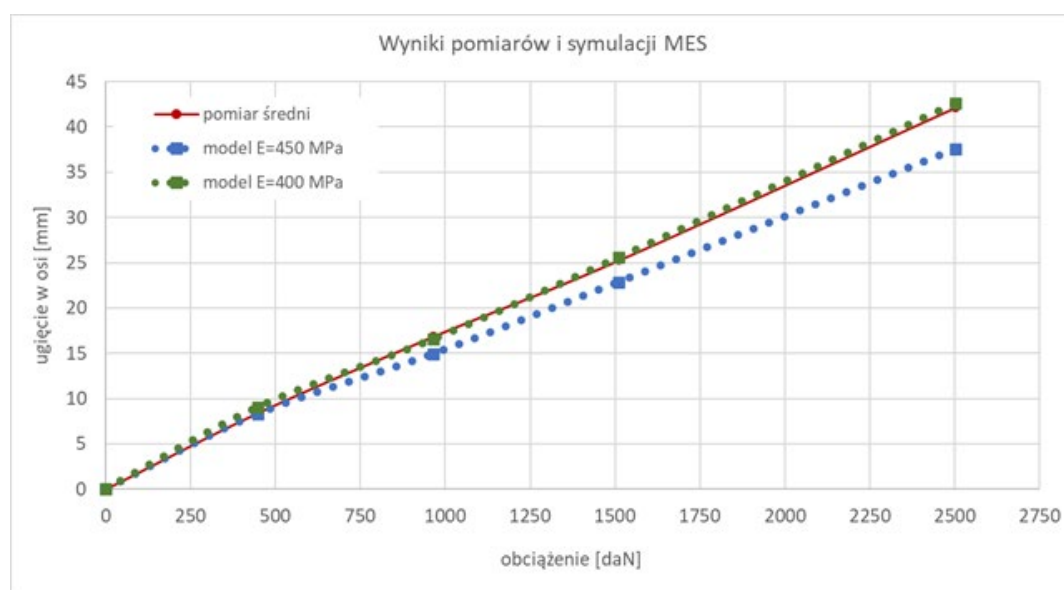
Rys. 5-39 Model geometryczny dennicy DN1000 SN4 oraz płyt prasy, przyjęty do obliczeń w środowisku Ansys Mechanical

Fig. 5-39 Geometric model of DN1000 SN4 end cap and press plates adopted for calculations in the Ansys Mechanical environment

Warunki brzegowe oraz sposób przyłożenia obciążenia odwzorowano zgodnie z rzeczywistym układem stanowiska badawczego – dennica była podparta na obwodzie przez pierścień usztywniający, a obciążenie osiowe przykładano w sposób odpowiadający rzeczywistym warunkom eksperymentu – za pośrednictwem płaskiej, sztywnej, poziomej

plyty. Siatkę elementów skończonych zagęszczono w obszarach spodziewanych największych gradientów naprężeń i odkształceń, co pozwoliło na redukcję błędów aproksymacji i zwiększenie wiarygodności wyników symulacji numerycznych. W celu wiernego odwzorowania rzeczywistego zachowania konstrukcji poddanej znacznym deformacjom, wykorzystano dostępną w *solver* opcję Large Displacement. Pozwala ona na uwzględnienie nieliniowości geometrycznej, wynikającej z dużych przemieszczeń liniowych i kątowych elementów siatki modelu w trakcie obciążania. Dzięki temu możliwe było poprawne odtworzenie rozkładu przemieszczeń i naprężeń w powłoce dennicy, zwłaszcza w końcowych etapach testu, gdzie obserwowano największe zmiany kształtu.

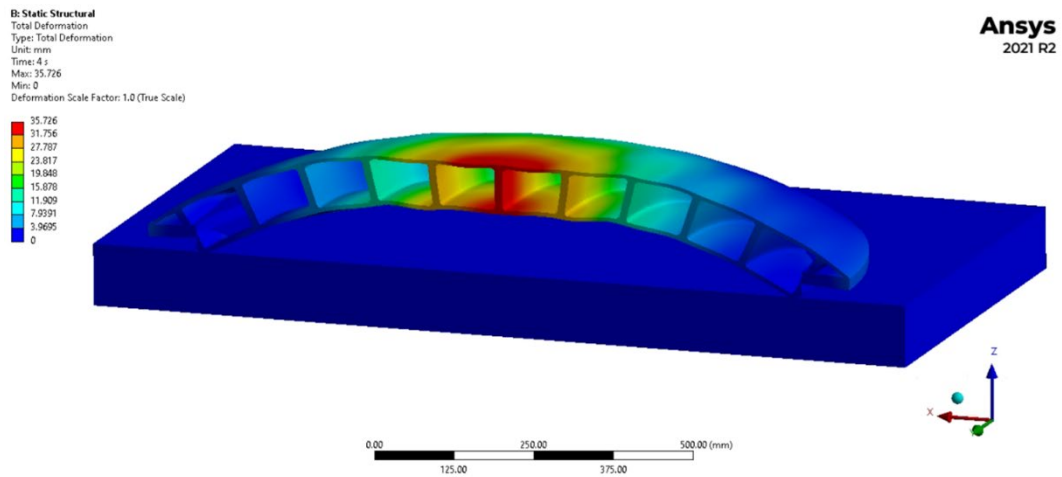
Estymację modułu odkształcenia przeprowadzono przez porównanie wartości średniej ugięć z czterech prób ściskania z wartościami uzyskanymi w modelach MES dla różnych wartości modułu odkształcenia. Procedurę iteracyjną zakończono na $E = 400$ MPa. Wyniki estymacji modułu odkształcenia przedstawiono na Rys. 5-40.



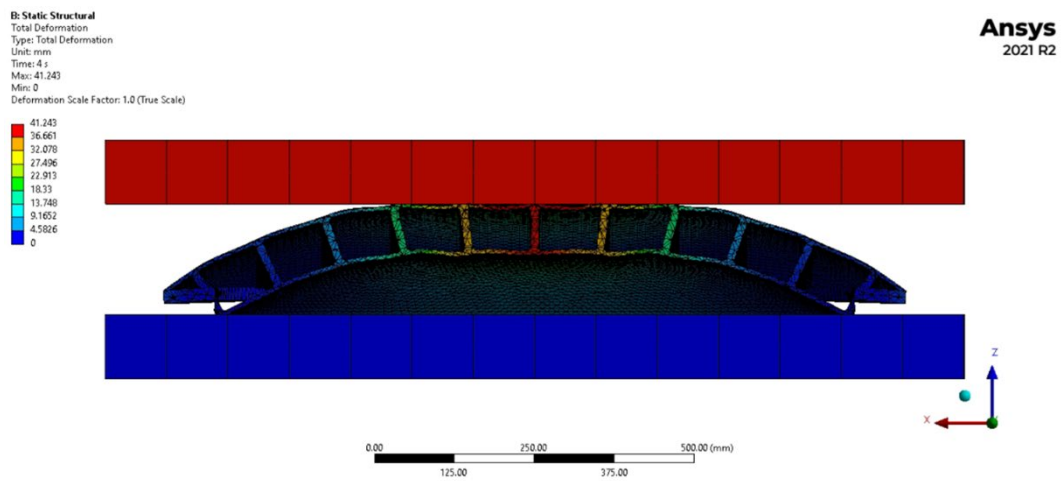
Rys. 5-40 Wykres porównania średniego pomiaru ugięcia z testu ściskania dennicy DN1000 SN4 oraz wyników modelowania MES (Ansys Mechanical) dla przyjętego modułu odkształcenia $E = 400$ i 450 MPa

Fig. 5-40 Comparison graph of average deflection measurements from compression tests of DN1000 SN4 end caps and FEM simulation results (Ansys Mechanical) for assumed deformation modulus values of $E = 400$ and 450 MPa

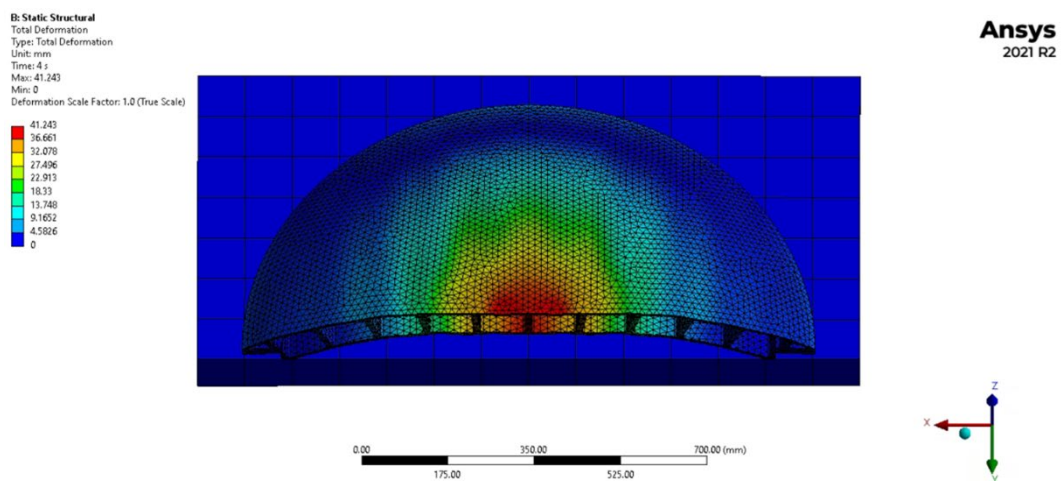
Wybrane wyniki symulacji MES przedstawiono na Rys. 5-41 i Rys. 5-42. Zobrazowano rozkład ugięć dennicy w ostatnim kroku obciążenia (Rys. 5-41), a także rozkład wartości minimalnych i maksymalnych naprężeń głównych (Rys. 5-42).



a)



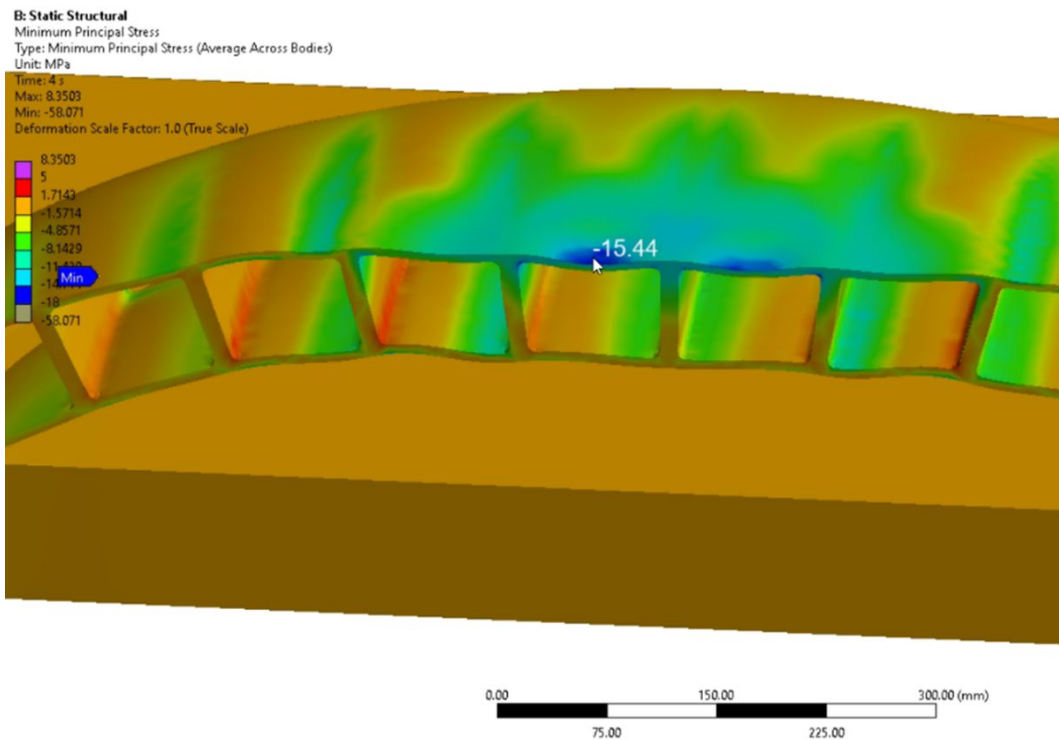
b)



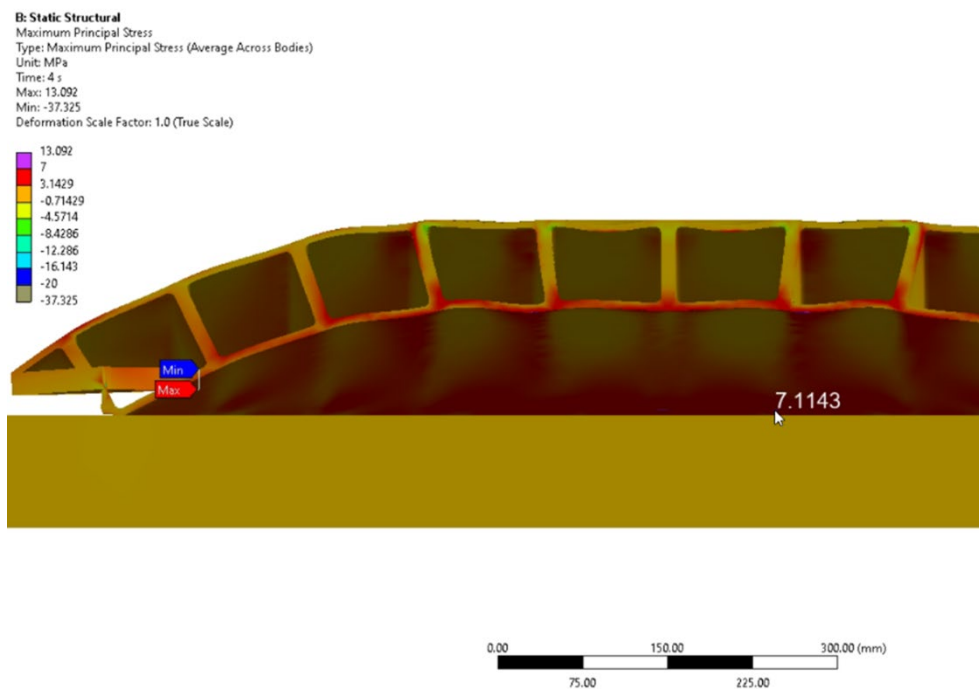
c)

Rys. 5-41 Rozkład ugięć dennicy w ostatnim kroku obciążenia:
a) widok przestrzenny, b) przekrój poprzeczny, c) widok z góry

Fig. 5-41 Deflection distribution of the end cap at the final loading step: a) 3D view, b) cross-section, c) top view



a)



b)

Rys. 5-42 Rozkład naprężeń głównych: a) minimalnych (strefy najintensywniejszego ściskania), b) maksymalnych (strefy najintensywniejszego rozciągania)

Fig. 5-42 Principal stress distribution: a) minimum (zones of highest compression), b) maximum (zones of highest tension)

5.5.2.5. Podsumowanie

Wyniki pomiarów i symulacji numerycznych wykazały, że rzeczywiste ugięcia dennicy są nieznacznie mniejsze niż uzyskane w modelach MES, zwłaszcza w początkowej fazie badania. Może wynikać to z nieregularności geometrycznych krawędzi profili, wzdłuż których dennica opiera się na podstawie maszyny wytrzymałościowej (widoczne na Rys. 5-38a), oraz luzów pomiędzy dennicą i pierścieniem usztywniającym. Porównanie wyników przy modułach odkształcenia równych 400 MPa oraz 450 MPa pozwala stwierdzić, że wartość siecznego, krótkookresowego modułu odkształcenia wynosi $E = 400$ MPa i stanowi oszacowanie od dołu, z błędem rzędu 1-2 % względem wartości rzeczywistej.

Warto podkreślić, że zarówno w przypadku pomiarów, jak i wyników symulacji MES, na początkowych odcinkach wykresów obrazujących zależność obciążenie-ugięcie obserwuje się szybsze przyrosty zmian geometrycznych w funkcji obciążenia. Prawdopodobnie główną przyczyną tego zjawiska jest intensywne wyrównywanie rozkładu siły podparcia na obwodzie dennicy, w obszarze kontaktu z warunkiem brzegowym (dolną płytą maszyny wytrzymałościowej), co w początkowej fazie badania skutkuje dużymi wartościami naprężenia i odkształcenia.

Na przekrojach poprzecznych modelu 3D zwracają uwagę deformacje poziomych ścianek profili (sfałdowania), charakterystyczne m.in. dla zjawiska skręcania. Równoczesne działanie sił wywołujących ściskanie dennicy w połączeniu z korpusem może stymulować to zjawisko i prowadzić do lokalnego wyboczenia powłoki. Ponieważ dominującym kierunkiem ściskania zbiornika jest kierunek pionowy (obciążenie zasypką), zaleca się ustawianie podłużnych osi profili w płaszczyznach pionowych podczas montażu dennicy do korpusu, co pozwala zminimalizować niekorzystne działanie poprzecznego ściskania skrzynek profili.

6. Długookresowe odkształcenia HDPE w świetle modeli literaturowych i badań własnych

6.1. Wprowadzenie

Opis długoterminowych właściwości polimerów, w tym polietylenu o dużej gęstości (HDPE), wymaga zastosowania odpowiednich modeli materiałowych, zdolnych do wiernego odwzorowania rzeczywistych zjawisk mechanicznych zachodzących w czasie oddziaływania obciążenia. Modele konstytutywne stosowane w analizach pełzania powinny nie tylko pozostawać w zgodzie z wynikami eksperymentów, ale także umożliwiać interpretację zjawisk fizycznych odpowiedzialnych za proces deformacji i degradacji mechanicznej. Użyteczny praktycznie model materiałowy powinien umożliwiać:

- 1) Określenie wartości odkształcenia długookresowego (w warunkach ustalonych), jeżeli takie istnieje w określonym stanie naprężenia,
- 2) Określenie warunku aktywacji procesu zmierzającego do załamania próbki w konsekwencji rozwoju odkształcenia,
- 3) Zapewnienie stabilności numerycznej w trakcie procedury identyfikacji parametrów oraz możliwość ekstrapolacji wyników w długim horyzoncie czasowym, charakterystycznym dla okresu eksploatacji konstrukcji z tworzyw polimerowych.

Takie podejście jest zgodne z kierunkiem badań literaturowych, w których wskazuje się na konieczność łączenia metod empirycznych i fenomenologicznych z optymalizacją numeryczną w celu uzyskania modeli jednocześnie dokładnych i użytecznych w praktyce inżynierskiej (Naumenko i Altenbach, 2007; S. J. Stuart, 2011). W kolejnych podrozdziałach przedstawiono analizę przydatności wybranych modeli literaturowych oraz propozycję nowego podejścia do opisu zjawiska pełzania HDPE w oparciu o wyniki badań własnych.

6.2. Zestawienie wyników analizy porównawczej wybranych modeli literaturowych

Ocena przydatności modeli konstytutywnych powinna uwzględniać dokładność dopasowania do danych eksperymentalnych, stabilność numeryczną procedur identyfikacji parametrów, możliwość ekstrapolacji w horyzoncie czasowym, niezbędnym do prawidłowego wyznaczenia modułów, fizyczną interpretację parametrów materiałowych oraz rozsądnie ograniczoną złożoność implementacji w praktyce inżynierskiej. Szczególnie w przypadku HDPE, dla którego charakterystyczne jest powolne pełzanie, zależne od stanu naprężenia

i temperatury, te aspekty mają fundamentalne znaczenie dla późniejszego wykorzystania modeli w ocenie trwałości konstrukcji.

Do wyznaczenia parametrów modeli, w tym oceny dopasowania do wyników badań zastosowano następującą procedurę:

- 1) Zestawienie i weryfikacja wyników serii pomiarowych (czas, ugięcie) dla danej próbki,
- 2) Obliczenie wartości rzeczywistego odkształcenia w kolejnych krokach czasowych na podstawie zmian geometrii próbek,
- 3) Zastosowanie optymalizacji globalnej (ewolucja różnicowa) w celu wyznaczenia zestawu parametrów dla każdego z modeli,
- 4) Zestawienie wartości odkształceń wyznaczonych za pomocą modelu z wynikami pomiarów wraz z oceną dopasowania (współczynnika R^2) i interpretację graficzną.

W celu dopasowania funkcji modelu do wyników pomiarów wykorzystany został algorytm optymalizacyjny oparty na metodzie ewolucji różnicowej z kryterium najmniejszych kwadratów, zaimplementowany w bibliotece SciPy (Virtanen i in., 2020). Metoda ta charakteryzuje się globalnym podejściem do optymalizacji, co oznacza, że poszukuje ona globalnego minimum funkcji celu, unikając lokalnych minimów, które mogłyby prowadzić do błędnych wyników. Kryterium optymalizacji stanowi minimalizacja sumy kwadratów różnic pomiędzy wartościami odkształceń przewidywanych modelem a wartościami zmierzonymi, co jest klasycznym podejściem w dopasowywaniu modeli do danych eksperymentalnych. Zakresy warunków brzegowych poszczególnych parametrów ustalano iteracyjnie, poszerzając je lub przesuwając w sytuacjach, gdy algorytm sygnalizował osiągnięcie przyjętej granicy. Takie podejście pozwoliło wstępnie ocenić, które z modeli w wystarczającym stopniu odwzorowują rozwój odkształcenia w czasie w przeprowadzonych testach zginania i rozciągania. Pozwoliło to na odrzucenie modeli, które w klasycznej postaci nie są możliwe do bezpośredniego zastosowania.

W analizie porównawczej modeli materiałowych, pozyskanych z literatury zostały pominięte modele całkowite i fizyczne ze względu na znaczną złożoność matematyczną i trudności w jednoznacznej identyfikacji parametrów. Do analizy wybranych zostało siedem modeli, opisanych w rozdziale 3.5: jednoelementowe – Kelvina-Voigta (3.8) Maxwella (3.9), wieloelementowe – Samarina (3.12), Burgersa (3.10), Burgersa zmodyfikowany (Sarabiego)

(3.11), oraz empiryczne – Findeya (3.13) oraz Hadida (3.14). Wyniki analizy dopasowania parametrów do wyników eksperymentalnych przedstawiono w Tabeli 6-1, gdzie zestawiono najważniejsze parametry statystyczne dopasowania, które stanowią punkt wyjścia do szerszej interpretacji praktycznej. Wyznaczono średni oraz maksymalny i minimalny współczynnik determinacji (R^2) spośród wszystkich próbek. Przedstawiono również średnie wartości R^2 próbek w zakresach naprężeń początkowych poniżej 5 MPa, pomiędzy 5 a 8 MPa oraz powyżej 8 MPa.

Tabela 6-1 Statystyki R^2 dopasowania modeli literaturowych do danych eksperymentalnych pełzania przy zginaniu

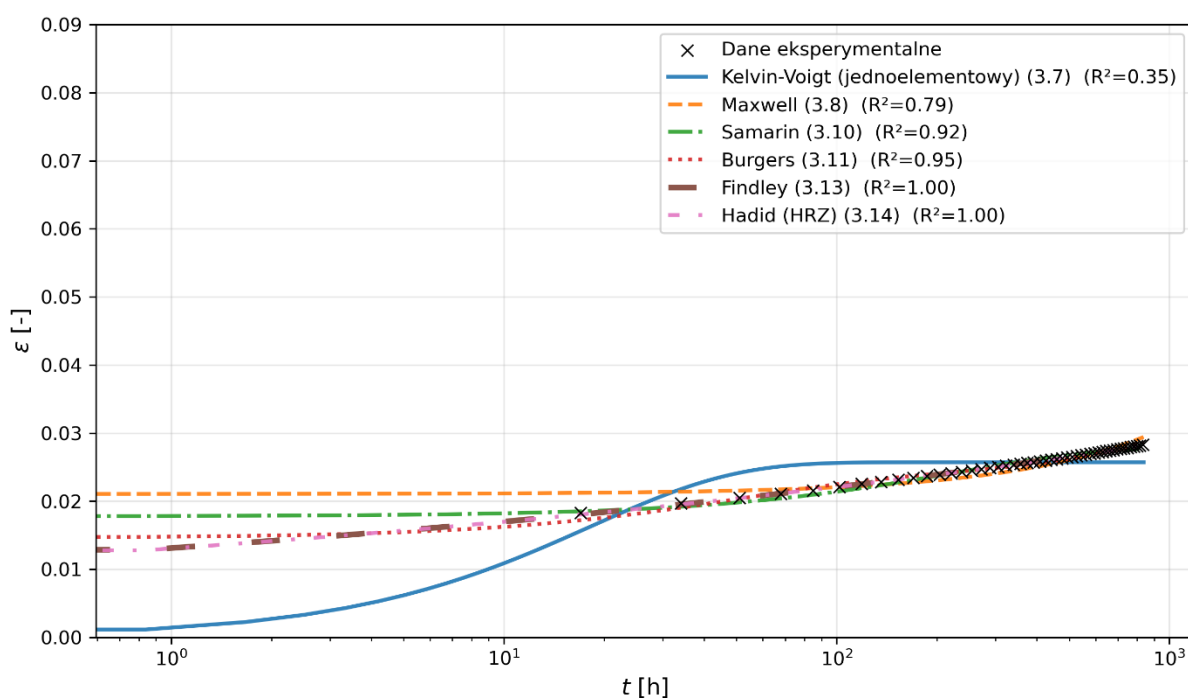
Table 6-1 R^2 statistics for fitting literature models to experimental data of flexural creep

Lp.	Model	Wzór	Średnie globalne R^2 (SD)	Maks. R^2	Min. R^2	Średnie R^2 (SD)		
						σ_0 $\leq 5 \text{ MPa}$	$5 - 8 \text{ MPa}$	$\geq 8 \text{ MPa}$
1	Kelvin Voigt jednoelementowy	(3.8)	0,492 (0,139)	0,26	0,78	0,501 (0,08)	0,445 (0,08)	0,517 (0,19)
2	Maxwell	(3.9)	0,743 (0,084)	0,60	0,92	0,747 (0,03)	0,707 (0,07)	0,765 (0,11)
3	Samarin	(3.12)	0,920 (0,032)	0,85	0,98	0,917 (0,02)	0,925 (0,04)	0,919 (0,03)
4	Burgers	(3.10)	0,952 (0,06)	0,66	0,99	0,964 (0,01)	0,959 (0,02)	0,94 (0,09)
5	Burgers (Sarabi)	(3.11)	0,782 (0,409)	-1,17	0,97	0,896 (0,11)	0,559 (0,71)	0,864 (0,12)
6	Findley	(3.13)	0,987 (0,012)	0,94	0,99	0,994 (0,01)	0,987 (0,01)	0,982 (0,02)
7	Hadid HRZ	(3.14)	0,985 (0,015)	0,92	0,99	0,994 (0,01)	0,987 (0,01)	0,98 (0,02)

Na podstawie średnich wartości R^2 można wskazać, że model Findleya oraz model Hadida (HRZ) charakteryzują się najwyższą jakością dopasowania, osiągając średnie R^2 odpowiednio 0,987 i 0,985, przy bardzo małym odchyleniu standardowym ($SD < 0,015$). Oznacza to, że modele te wiernie odwzorowują przebieg pełzania w całym zakresie naprężeń. Model Burgersa uzyskał średnie $R^2 = 0,952$, co również wskazuje na bardzo dobre dopasowanie, jednak w grupie próbek obciążonych powyżej 8 MPa obserwowano wyraźne pogorszenie jakości dopasowania ($R^2 \approx 0,940$). Model Samarina uzyskał $R^2 \approx 0,920$, zachowując dobrą stabilność wyników. Model Burgersa zmodyfikowany (Sarabi) cechuje się dużym rozrzutem wyników (od -1,17 do 0,98), co sugeruje problemy numeryczne lub niewłaściwe dopasowanie w części próbek. Modele Kelvina-Voigta ($R^2 \approx 0,492$) i Maxwella ($R^2 \approx 0,743$) w postaci jednoelementowej wykazały najgorszą jakość dopasowania, co potwierdza ich ograniczoną przydatność do opisu długotrwałego pełzania tworzyw polimerowych. Ogólnie analiza potwierdza, że za pomocą najprostszych modeli reologicznych

(Kelvina-Voigta i Maxwella) nie jest możliwe wierne odwzorowanie pełnego przebiegu odkształcenia w czasie, zwłaszcza w fazie ustalonej i przy większych obciążeniach. Modele wieloelementowe (Burgersa, Sarabiego) zapewniają poprawną interpretację składników sprężystych i lepkich, lecz ich dokładność numeryczna jest mniejsza i wrażliwa na poziom naprężenia. Modele empiryczne (Findleya, Hadida) osiągają najlepsze dopasowania, ale nie dostarczają bezpośredniej interpretacji parametrów w kategoriach właściwości materiałowych, czyli nie mają jednoznacznego znaczenia fizycznego.

W celu lepszego zobrazowania różnic jakości dopasowania, dla wybranych próbek zostały zestawione wykresy (Rys. 6-1, Rys. 6-2, Rys. 6-3) porównujące wartości eksperymentalne i teoretyczne wybranych siedmiu modeli przy wartościach naprężenia początkowego reprezentującego wszystkie przedziały przyjęte w Tabeli 6-1, czyli $\sigma_0 = 3, 6$ oraz 11 MPa.

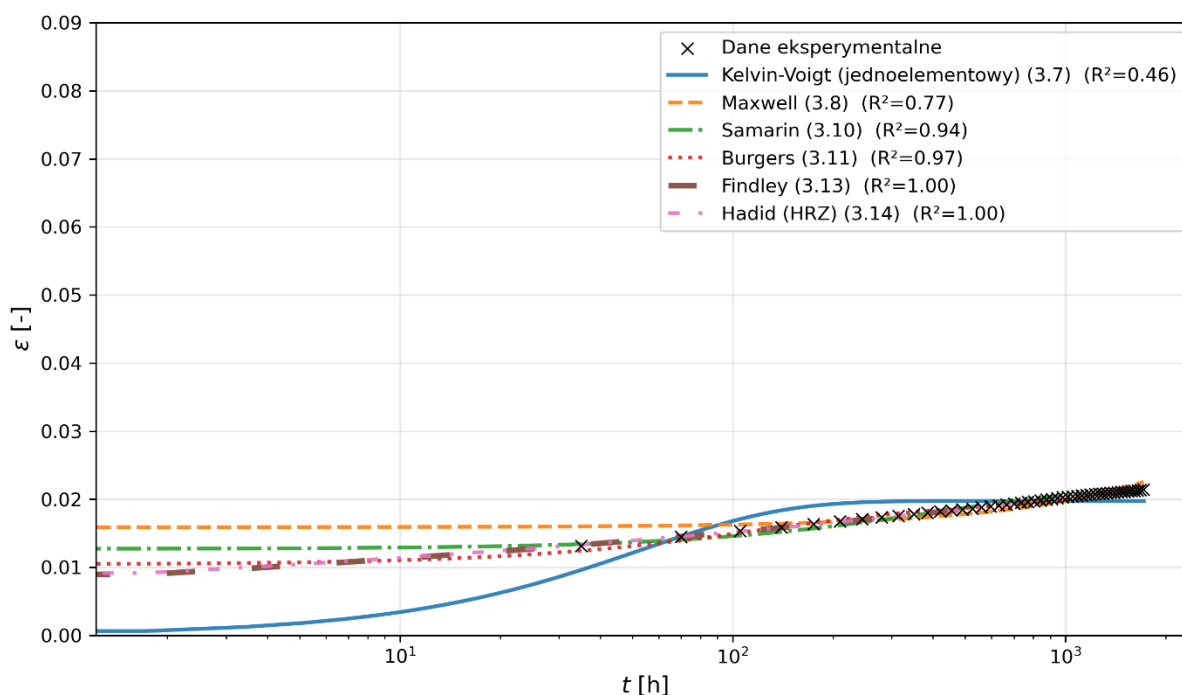


Rys. 6-1 Porównanie dopasowania modeli literaturowych do danych eksperymentalnych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka PE_01 (3,0 MPa)

Fig. 6-1 Comparison of literature models fitting to experimental data – strain vs. time, specimen PE_01 (3,0 MPa)

Przy naprężeniach początkowych $\sigma_0 = 3,0$ MPa na przykładzie próbki PE_01 (Rys. 6-1) modele empiryczne Findleya ($R^2 = 1,0$) i Hadida ($R^2 = 1,0$) wykazują bardzo wysoką zgodność z przebiegiem odkształcenia w funkcji czasu $\varepsilon(t)$ w całym rozpatrywanym przedziale czasowym. Modele Burgersa ($R^2 = 0,95$) oraz Samarina ($R^2 = 0,92$) poprawnie odwzorowują

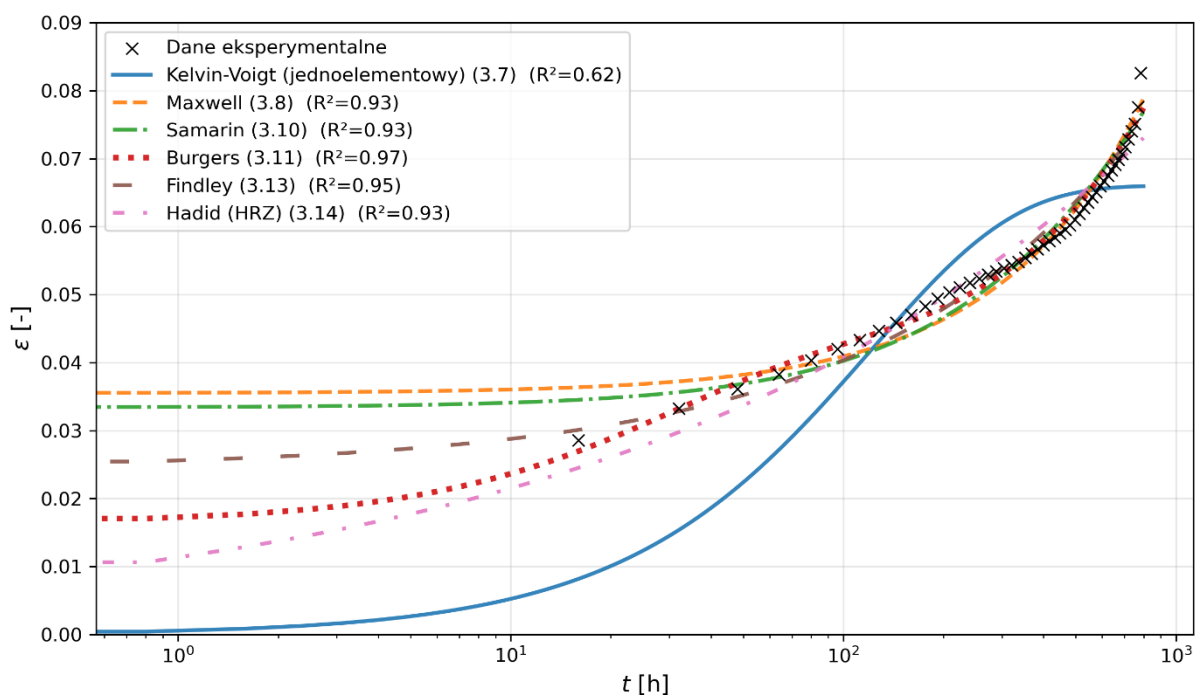
krzywiznę odcinka pierwotnego (retardacja), przy niewielkich, systematycznych odchyleniach w czasie dłuższym od 100h. Model Kelvin-Voigta ($R^2 = 0,35$) zaniża składową długoczasową (zbyt szybkie wygaszanie odpowiedzi materiału na obciążenie), natomiast model Maxwella ($R^2 = 0,79$) przeszacowuje przyrost odkształcenia w czasie z uwagi na brak równoległej gałęzi sprężysto-lepkiej, co ogranicza możliwość odwzorowania szybkiego zmniejszenia lepkości pozornej we wczesnej fazie testu. Konsekwentnie obserwuje się relatywnie małe wartości R^2 dla modeli jednoelementowych oraz duże R^2 dla modeli empirycznych.



Rys. 6-2 Porównanie dopasowania modeli literaturowych do danych eksperymentalnych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka PE_08 (6,0 MPa)

Fig. 6-2 Comparison of literature models fitting to experimental data – strain vs. time, specimen PE_08 (6,0 MPa)

Przy wartości $\sigma_0 = 6,0$ MPa na przykładzie próbki PE_08 (Rys. 6-2) różnice jakości dopasowania między modelami ulegają zwiększeniu. Model Burgersa utrzymuje duże $R^2 = 0,98$ dzięki równoczesnej reprezentacji gałęzi Maxwella i Kelvina, a modele empiryczne zachowują ścisłą zgodność z danymi pomiarowymi. Modyfikacja modelu Burgersa wg Sarabiego ($R^2 = 0,98$) wykazuje zwiększoną wrażliwość parametryczną; w zależności od inicjalizacji i zakresu dopasowania może prowadzić do niestabilnych estymacji parametrów, co skutkuje szerokim zakresem obserwowanych wartości R^2 .



Rys. 6-3 Porównanie dopasowania modeli literaturowych do danych eksperymentalnych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka RPE_15 (11,0 MPa)

Fig. 6-3 Comparison of literature models fitting to experimental data – strain vs. time, specimen RPE_15 (11,0 MPa)

Przy wartości $\sigma_0 = 11,0$ MPa na przykładzie próbki PE_15 (Rys. 6-3) występują największe rozbieżności pomiędzy modelami prostymi oraz częścią modeli wieloelementowych. Modele empiryczne (Findleya, Hadida) utrzymują zgodność kształtu krzywej $\varepsilon(t)$ dzięki dopuszczeniu nieliniowej zależności czasowej. Modele jednoelementowe nie są zdolne do jednoczesnego odwzorowania szybkiej retardacji oraz składowej długoczasowej odpowiedzi lepkosprężystej.

Na przykładach próbek przy różnych poziomach obciążeń można zauważyć systematyczne zmniejszenie jakości dopasowania prostych modeli oraz utrzymanie dużej zgodności modeli empirycznych. Potwierdza to, że złożoność modelu musi być skalowana wraz ze wzrostem poziomu obciążenia. Wartość R^2 poniżej 0,7 wyklucza ich możliwość do bezpośredniego zastosowania inżynierskiego w analizie długookresowych odkształceń (Guilford, 1942).

6.3. Proponowany model materiałowy

Na podstawie przeglądu literatury oraz własnych doświadczeń, stwierdzono, że istniejące modele charakteryzują się znacznymi ograniczeniami w prognozowaniu długookresowego odkształcenia przy stałym obciążeniu. W celu uzupełnienia tej luki zaproponowano nowy model materiałowy (6.1), stanowiący hybrydę podejścia fenomenologicznego i reologicznego, który uwzględnia mechanizmy odpowiadające za poszczególne stadia pełzania. Omawiany model nie jest modelem konstytutywnym, nie łączy bowiem wprost odkształcenia, naprężenia i czasu, stanowi jedynie punkt wyjścia dla sformułowania odpowiedniego związku konstytutywnego, a jego głównym praktycznym przeznaczeniem – kontrola prawidłowości przebiegu testu laboratoryjnego oraz bieżąca kontrola zgodności stanu obiektu rzeczywistego z założeniami projektowymi.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{kwsp}(t) + \varepsilon_{ksp}(t) + \varepsilon_{kswp}(t) \quad (6.1)$$

Prezentowany model materiałowy pełzania HDPE (6.1) jest oparty na hybrydowym podejściu, łączącym (poprzez superpozycję) trzy mechanizmy odpowiadające za:

- 1) Szybka, dynamiczną odpowiedź materiału na obciążenie (komponent wysoko sprężysto-plastyczny (6.2)), opisujący początkowe pełzanie związane z lokalną reorganizacją mikrostruktury (modelowane funkcją zanikającą wykładniczo):

$$\varepsilon_{kwsp}(t) = B_1 \cdot \sqrt{t} \cdot \exp(-T_1 \cdot \sqrt{t}) \quad (6.2)$$

- 2) Powolną, stabilizującą się odpowiedź długookresową (związana z lepkosprężystym odkształceniem sieciowym), nazwany jako komponent sprężysto-plastyczny (6.3):

$$\varepsilon_{ksp}(t) = B_2 \cdot [1 - \exp(-T_2 \cdot \sqrt[4]{t})] \quad (6.3)$$

- 3) Późną przyspieszającą, niejednokrotnie degradacyjną ewolucję odkształcenia (komponent sprężysto-wysoko plastyczny (6.4)), często prowadzącą do przejścia do III stadium pełzania i ostatecznej degradacji próbki:

$$\varepsilon_{kswp}(t) = B_3 \cdot \{[\exp(T_3 \cdot \sqrt{t}) - 1]/1000\}^n \quad (6.4)$$

gdzie:

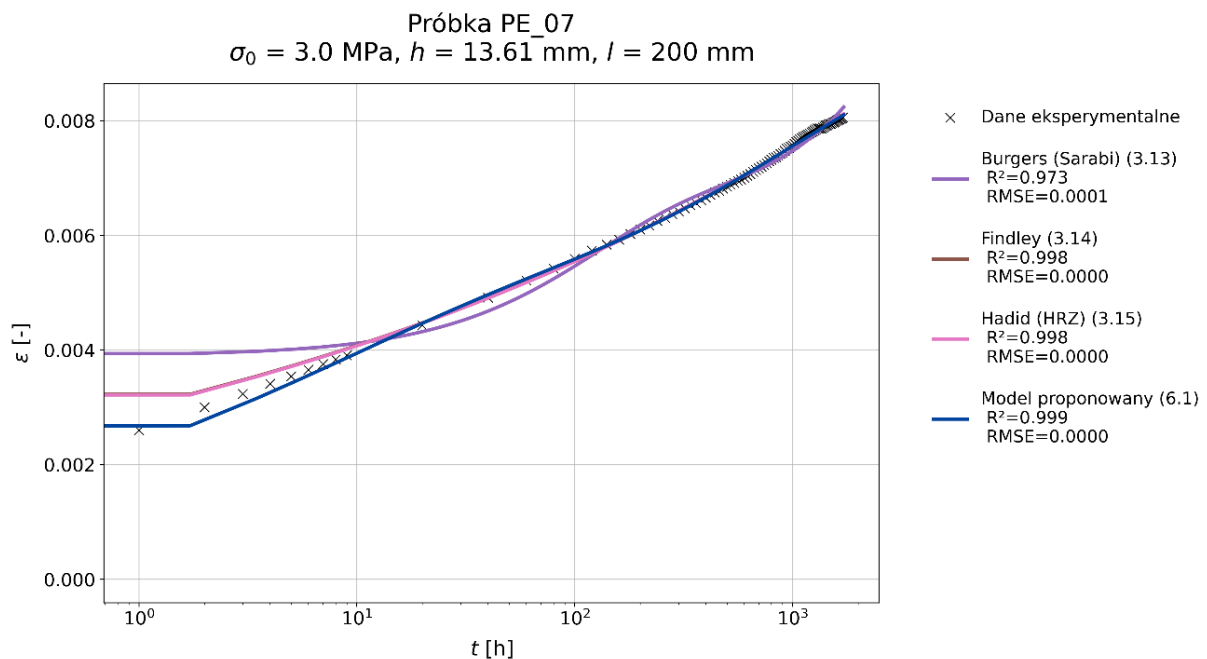
$B_1, B_2, B_3 \geq 0$ – stałe modelu (skalujące odpowiedź materiału na obciążenie),

$T_1, T_2, T_3 \geq 0$ – stałe modelu (skalujące prędkość procesu rozwoju deformacji),

n – wykładnik potęgi odpowiedzi wysoko plastycznej (przyjęto wstępnie $n = 3$),

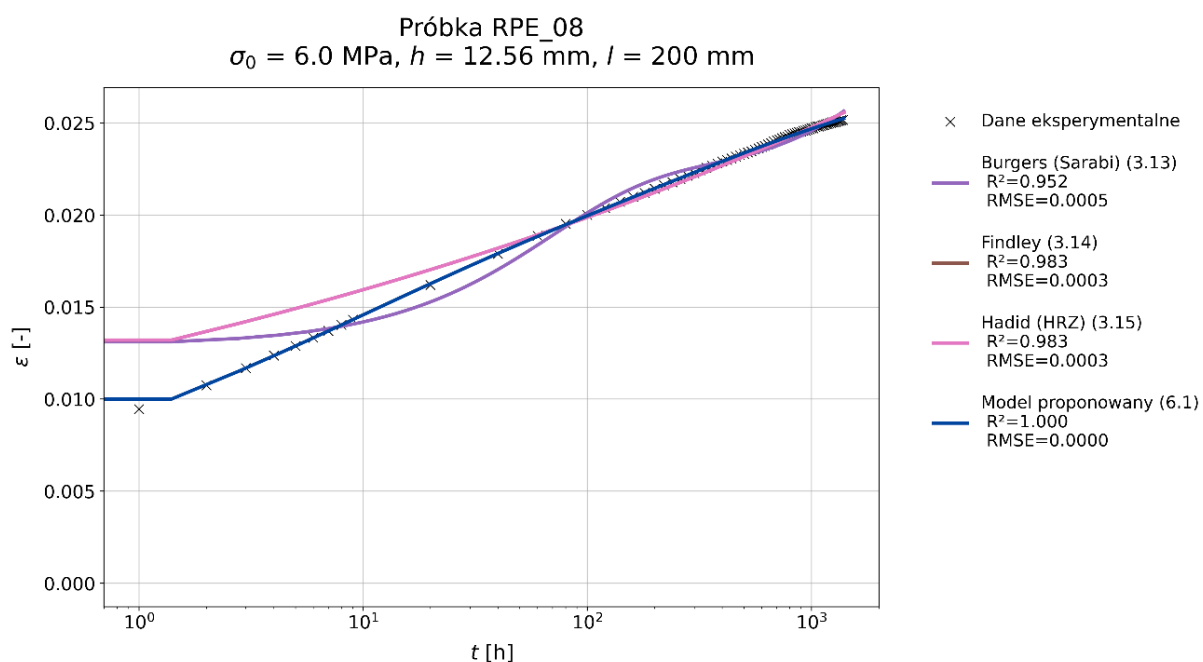
t – czas pełzania.

Do dalszej analizy porównawczej wybrano modele literaturowe, które wykazują najlepszy opis relacji odkształcenie – czas. Do analizy wybrano modele potęgowe Findleya i Hadida oraz eksponenty Burgersa zmodyfikowany (Sarabiego). Na wykresach Rys. 6-4, Rys. 6-5, Rys. 6-6, Rys. 6-7 przedstawiono dopasowanie proponowanego modelu do danych eksperymentalnych na tle modeli literaturowych dla wybranych próbek z przyjętych w Tabeli 6-1 zakresów obciążenia. Dodatkowym kryterium było wybranie próbek, które osiągnęły III stadium pełzania.



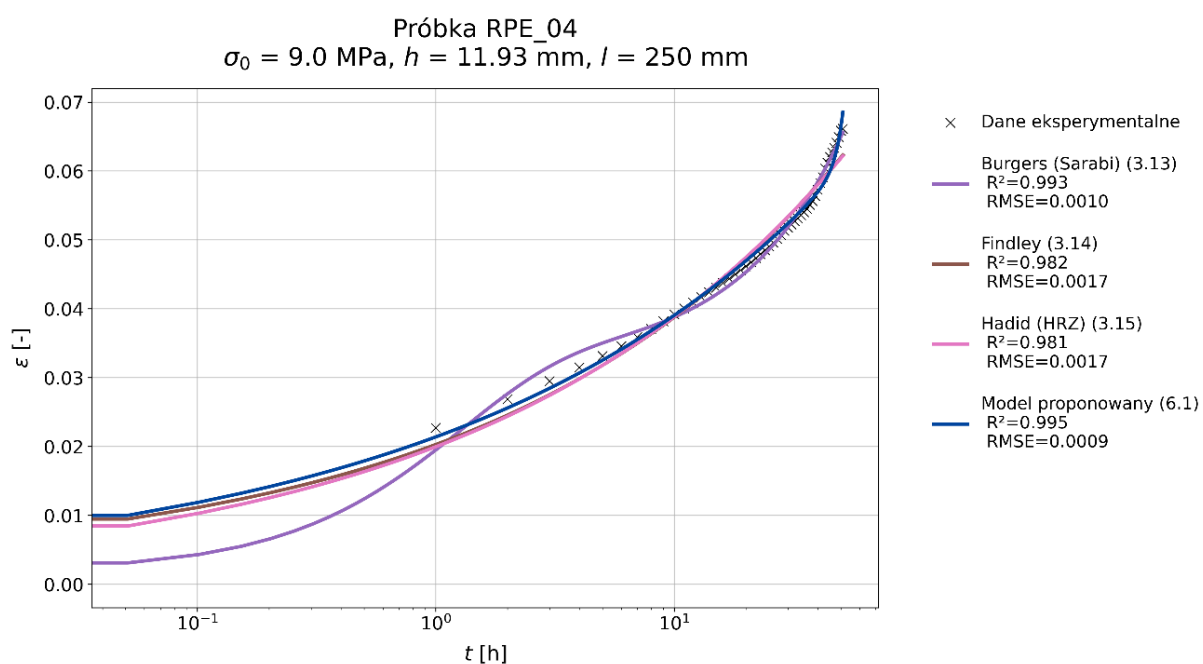
Rys. 6-4 Porównanie modelu proponowanego do danych eksperymentalnych na tle modeli literaturowych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka PE_07 ($\sigma_0 = 3,0 \text{ MPa}$)

Fig. 6-4 Comparison of the proposed model with experimental data against literature models – strain as a function of time, specimen PE_07 ($\sigma_0 = 3,0 \text{ MPa}$)



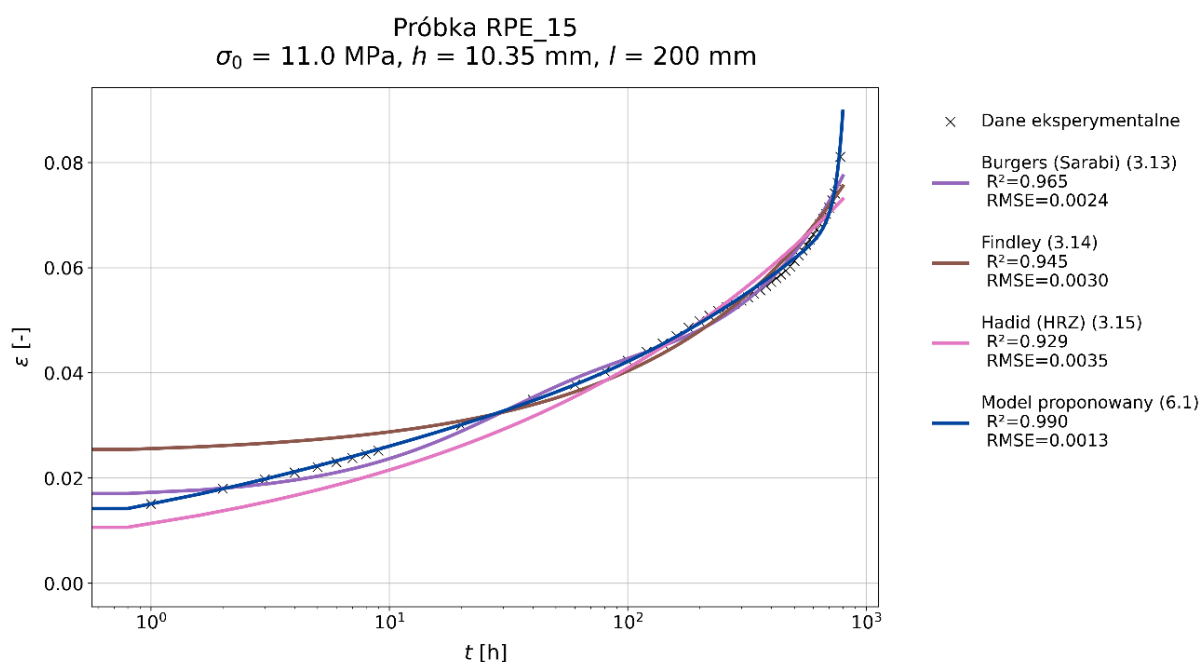
Rys. 6-5 Porównanie modelu proponowanego do danych eksperymentalnych na tle modeli literaturowych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka RPE_08 ($\sigma_0 = 6,0 \text{ MPa}$)

Fig. 6-5 Comparison of the proposed model with experimental data against literature models – strain as a function of time, specimen RPE_08 ($\sigma_0 = 6,0 \text{ MPa}$)



Rys. 6-6 Porównanie modelu proponowanego do danych eksperymentalnych na tle modeli literaturowych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka RPE_04 ($\sigma_0 = 9,0 \text{ MPa}$)

Fig. 6-6 Comparison of the proposed model with experimental data against literature models – strain as a function of time, specimen RPE_04 ($\sigma_0 = 9,0 \text{ MPa}$)



Rys. 6-7 Porównanie modelu proponowanego do danych eksperymentalnych na tle modeli literaturowych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka RPE_15 ($\sigma_0 = 11,0$ MPa)

Fig. 6-7 Comparison of the proposed model with experimental data against literature models – strain as a function of time, specimen RPE_15 ($\sigma_0 = 11,0$ MPa)

Analiza wykresów wskazuje na systematyczny wzrost błędu dopasowania wraz ze wzrostem poziomu naprężenia oraz przewagę modelu proponowanego w całym analizowanym zakresie. Dla $\sigma_0 = 3$ MPa (PE_07) modele empiryczne Findleya i Hadida (HRZ) osiągają $R^2 = 0,998$ przy $RMSE \approx 0,0000$, podczas gdy model Burgersa (Sarabiego) uzyskuje $R^2 = 0,973$ i $RMSE = 0,0001$; model proponowany zapewnia największą zgodność ($R^2 = 0,999$; $RMSE \approx 0,0000$). Przy $\sigma_0 = 6$ MPa (RPE_08) różnice w dopasowaniu modeli się pogłębiają: modele Findleya i Hadida utrzymują $R^2 = 0,983$ ($RMSE = 0,0003$), Burgersa (Sarabiego) zmniejsza się do $R^2 = 0,952$ ($RMSE = 0,0005$), natomiast model proponowany zachowuje pełną zgodność numeryczną ($R^2 = 1,000$; $RMSE \approx 0,0000$). Dla $\sigma_0 = 9$ MPa (RPE_04) pojawia się istotne niedoszacowanie części długoczasowej w modelach empirycznych (Findleya: $R^2 = 0,982$; $RMSE = 0,0017$; Hadida: $R^2 = 0,981$; $RMSE = 0,0017$) oraz przesunięcie fazy w modelu Burgersa (Sarabiego) ($R^2 = 0,993$; $RMSE = 0,0010$); model proponowany utrzymuje najmniejszy błąd ($R^2 = 0,995$; $RMSE = 0,0009$). Największe rozbieżności ujawniają się przy $\sigma_0 = 11$ MPa (RPE_15): modele Findleya ($R^2 = 0,945$; $RMSE = 0,0030$) i Hadida ($R^2 = 0,929$; $RMSE = 0,0035$) niedoszacowują przyrostu odkształcenia w długich czasach, a model Burgersa (Sarabiego) kumuluje błąd zarówno w części początkowej, jak i końcowej ($R^2 = 0,965$; $RMSE = 0,0024$). Model proponowany charakteryzuje się najmniejszym $RMSE = 0,0013$ ($R^2 = 0,990$), redukując błąd bezwzględny względem modelu Burgersa

(Sarabiego) o ok. 46 %, a względem modeli Findleya i Hadida odpowiednio o ok. 57 % i 63 %. Zestawienie to wskazuje, że wraz ze wzrostem σ_0 modele potęgowe i eksponentialne tracą zdolność wiernego odtworzenia przyspieszonej składowej pełzania, podczas gdy proponowany model hybrydowy najdokładniej odwzorowuje zmianę krzywizny i tempo narastania odkształcenia w obszarze poprzedzającym przejście do stadium III pełzania.

W Tabeli 6-2 zestawiono wyniki dopasowania modelu proponowanego (6.1) do wyników testów laboratoryjnych pełzania przy zginaniu: wartości parametrów dopasowania, miary jakości dopasowania oraz statystyki zmienności między próbkami. Parametry prezentowane są wraz z wierszami statystycznymi, co umożliwia ocenę rozrzutu na podstawie populacji badań testowych. Rys. 6-8 przedstawia rozrzut wartości identyfikowanych parametrów w funkcji naprężenia początkowego σ_0 , co pozwala ocenić zależność poszczególnych składowych modelu od poziomu obciążenia.

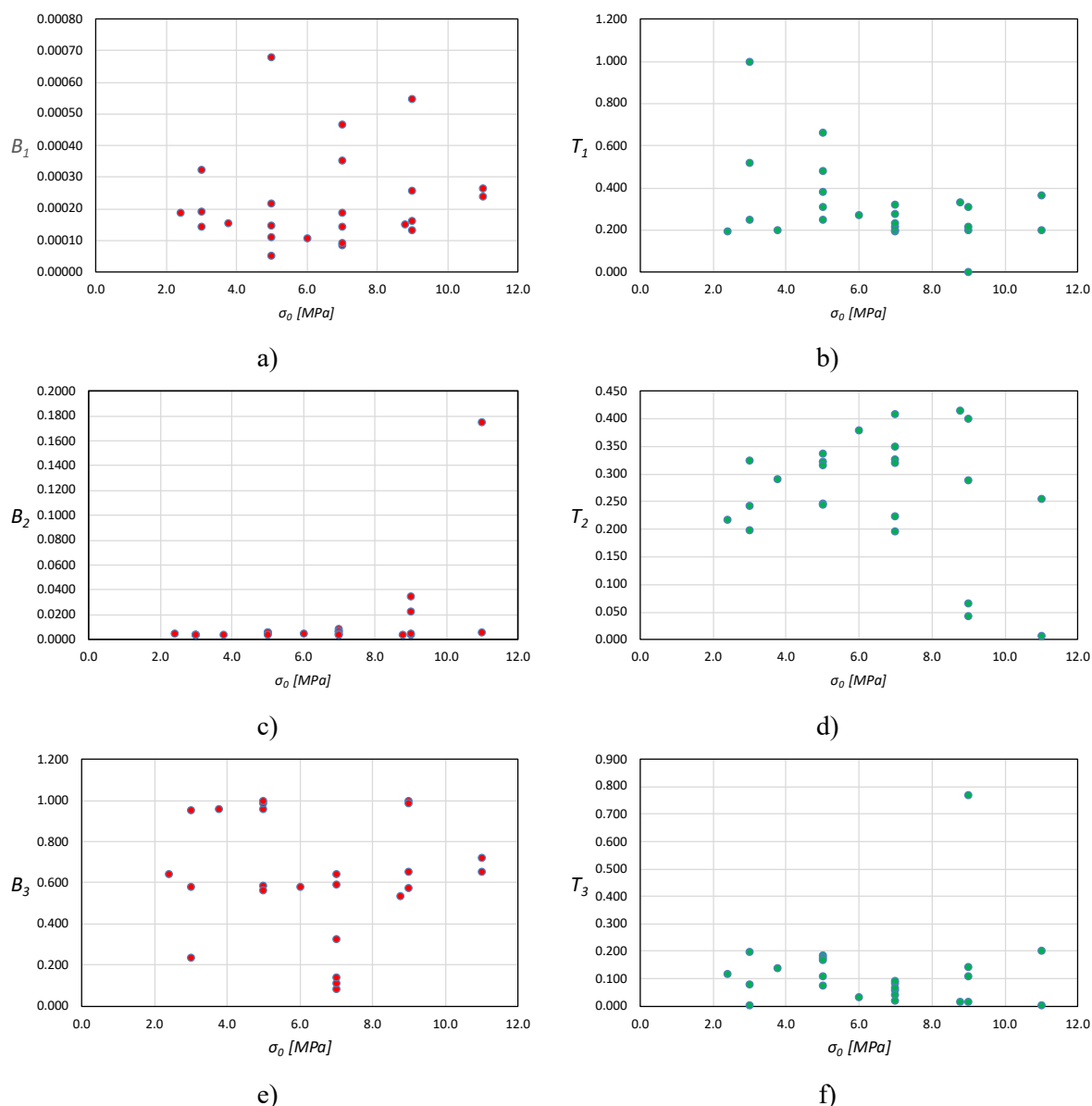
Jakość dopasowania utrzymuje się na wysokim poziomie (średnio $R^2=0,997$ przy $SD = 0,006$). Mimo to rozrzut RMSE jest istotny (od $2,28 \cdot 10^{-5}$ do $1,54 \cdot 10^{-3}$ mm), przy czym wartości największego błędu przypadają na próbki o dużej wartości σ_0 . Próbki RPE_04 (9 MPa), RPE_14 (9 MPa) i RPE_15 (11 MPa) stanowią obserwacje skrajne jednocześnie w parametrach B_2 , T_2 i T_3 . Ich wysoka niestabilność dla tych próbek potwierdza, że przejście do III stadium pełzania występuje w przedziale $\sigma_0 \approx 9-11$ MPa, a wczesna obserwacja tych parametrów może wskazywać na możliwość pojawienia się utraty stabilności próbki w długim okresie badania. Aby to potwierdzić należałoby jednak wykonać szczegółową analizę post-hoc.

Po odrzuceniu skrajnych próbek (RPE_04, RPE_14 i RPE_15) parametrem o wysokiej czułości wykazuje się współczynnik T_3 (Tabela 6-2). Parametrami o podwyższonej czułości są B_3 oraz T_1 , gdzie wartość T_1 maleje wraz ze wzrostem σ_0 . Najmniejszą zmienność wykazują natomiast parametry B_2 i T_2 , co wskazuje na ich stabilność i przydatność do kalibracji podstawowej części odpowiedzi lepkosprężystej. Parametry te są kluczowe dla prognozowania odkształceń długookresowych, ponieważ gdy zbliżają się do wartości skrajnych zakresu, może to sygnalizować początek III stadium pełzania próbki.

Tabela 6-2 Zestawienie parametrów proponowanego modelu materiałowego wyznaczonych poprzez aproksymację dla każdej z badanych próbek pełzania przy zginaniu

Table 6-2 Summary of the proposed material model parameters determined by approximation for each of the bending creep specimens

Nazwa próbki	σ_0 [MPa]	l [mm]	R^2	RMSE	B_1	B_2	B_3	T_1	T_2	T_3
RPE_13	2,4	200	0,997	3,79E-05	0,00019	0,0045	0,642	0,193	0,217	0,117
RPE_01	3,0	250	0,999	2,79E-05	0,00019	0,0039	0,579	0,997	0,325	0,198
PE_03	3,0	250	0,998	5,63E-05	0,00032	0,0043	0,237	0,519	0,243	0,078
PE_07	3,0	200	0,999	2,83E-05	0,00014	0,0037	0,953	0,251	0,198	0,001
PE_06	3,8	250	0,999	3,79E-05	0,00015	0,0040	0,959	0,199	0,290	0,140
RPE_02	5,0	250	1,000	3,81E-05	0,00005	0,0057	0,587	0,663	0,337	0,109
RPE_06	5,0	200	1,000	2,28E-05	0,00015	0,0049	0,957	0,311	0,323	0,186
PE_01	5,0	250	0,999	8,31E-05	0,00068	0,0057	0,988	0,480	0,316	0,175
PE_02	5,0	200	1,000	2,80E-05	0,00022	0,0060	0,999	0,384	0,246	0,170
PE_08	5,0	250	0,999	3,94E-05	0,00011	0,0037	0,564	0,251	0,244	0,076
RPE_08	6,0	200	1,000	3,60E-05	0,00011	0,0047	0,582	0,274	0,378	0,032
RPE_03	7,0	250	1,000	7,58E-05	0,00014	0,0084	0,328	0,197	0,223	0,060
RPE_10	7,0	200	0,999	9,59E-05	0,00009	0,0064	0,080	0,202	0,327	0,083
RPE_11	7,0	250	0,999	6,14E-05	0,00009	0,0037	0,589	0,322	0,409	0,093
RPE_16	7,0	250	0,984	4,97E-04	0,00047	0,0071	0,110	0,217	0,197	0,039
PE_04	7,0	250	0,997	1,26E-04	0,00035	0,0049	0,141	0,275	0,350	0,020
PE_05	7,0	200	0,999	6,74E-05	0,00019	0,0042	0,641	0,234	0,321	0,066
RPE_09	8,8	250	1,000	4,92E-05	0,00015	0,0042	0,535	0,334	0,415	0,017
RPE_04	9,0	250	0,995	9,13E-04	0,00016	0,0348	0,996	0,000	0,065	0,770
RPE_05	9,0	250	1,000	3,00E-05	0,00013	0,0036	0,984	0,309	0,401	0,143
RPE_12	9,0	250	0,999	9,25E-05	0,00026	0,0045	0,572	0,202	0,289	0,107
RPE_14	9,0	200	0,977	1,54E-03	0,00055	0,0231	0,654	0,215	0,043	0,016
RPE_07	11,0	250	0,990	4,23E-04	0,00027	0,0057	0,652	0,201	0,255	0,001
RPE_15	11,0	200	0,990	1,30E-03	0,00024	0,1753	0,723	0,363	0,007	0,202
WSZYSTKIE		MIN	0,977	2,28E-05	0,00005	0,00360	0,080	0,000	0,007	0,001
		MAX	1,000	1,54E-03	0,00068	0,17530	0,999	0,997	0,415	0,770
		ŚREDNIA	0,997	2,38E-04	0,00023	0,01404	0,627	0,316	0,267	0,121
		SD	0,006	4,19E-04	0,00015	0,03507	0,290	0,196	0,109	0,152
PO ODRZUCENIU: RPE_04 RPE_14 RPE_15		MIN	0,984	2,30E-05	0,00005	0,00360	0,080	0,193	0,197	0,001
		MAX	1,000	4,97E-04	0,00068	0,00840	0,999	0,997	0,415	0,198
		ŚREDNIA	0,998	9,30E-05	0,00021	0,00494	0,604	0,334	0,300	0,091
		SD	0,004	1,26E-05	0,00014	0,00126	0,298	0,195	0,068	0,061



Rys. 6-8 Wartości wyznaczonych parametrów modelu proponowanego (6.1) w zależności od wartości naprężenia początkowego badanych próbek pełzania przy zginaniu.

Parametry modelu: a) B_1 , b) B_2 , c) B_3 , d) T_1 , e) T_2 , f) T_3

Fig. 6-8 Values of the identified parameters of the proposed model (6.1) versus the initial stress level for specimens subjected to flexural creep. Parameters of model: a) B_1 , b) B_2 , c) B_3 , d) T_1 , e) T_2 , f) T_3

Proponowany model materiałowy poprawnie odwzorowuje wyniki eksperymentów, zwłaszcza przy większych naprężeniach, gdzie modele z literatury wykazują obniżoną dokładność. Parametry modelu silnie zależą jednak od próbki i poziomu obciążenia. Konieczne są dalsze badania, w tym analiza stabilności modelu, aby w pełni stosować go do opisu pełzania oraz wczesnego wykrywania procesów prowadzących do III stadium pełzania.

6.4. Długookresowy moduł odkształcenia

6.4.1. Długookresowy moduł odkształcenia z badań pełzania przy zginaniu

W celu oszacowania wpływu czasu działania obciążenia na sztywność materiału, na próbkach zginanych wyznaczono długookresową ewolucję modułu odkształcenia $E(t)$ na podstawie zaleceń norm (ASTM D790, 2017; ASTM D2990, 2017). Dla każdej próbki, w określonych przedziałach czasowych (1, 6, 12, 24, 100, 500, 1000, 5000, 10000 godzin), wyznaczano wartość modułu siecznego E przy zginaniu jako iloraz naprężenia do odkształcenia, zgodnie z równaniem:

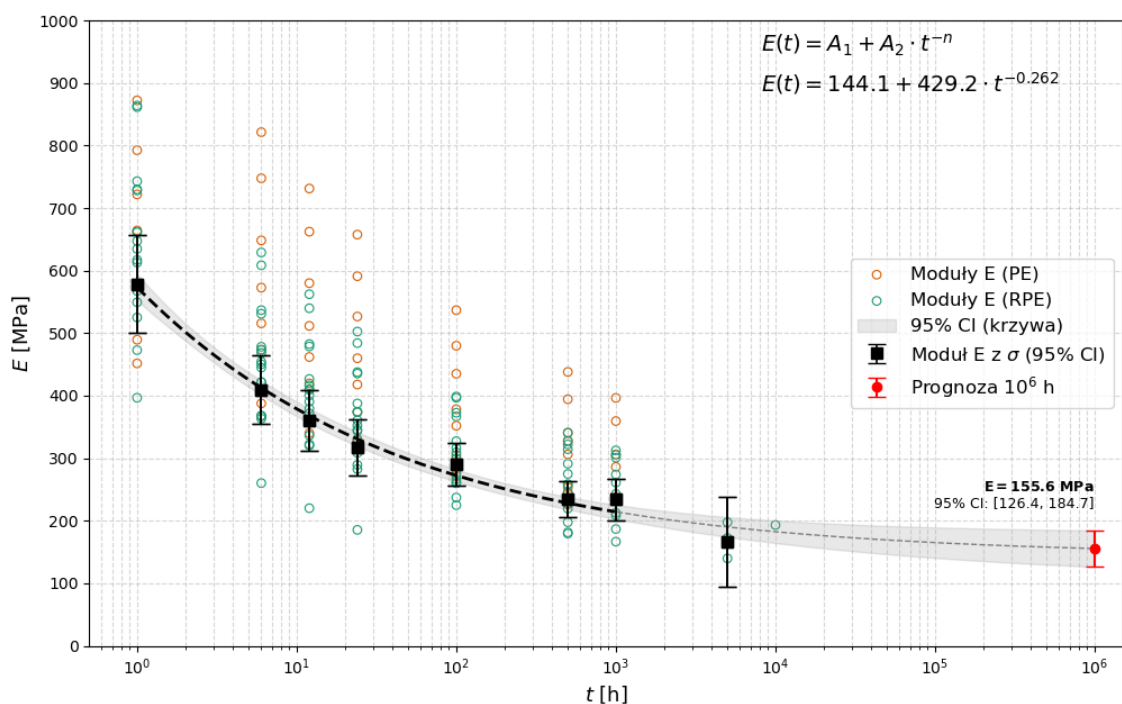
$$E(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} \quad (6.5)$$

gdzie: σ_0 – naprężenie, ε – odkształcenie, które zostało wyliczone z wzoru (3.23).

Następnie, dla każdego punktu czasowego, obliczono średnią wartość modułu E oraz jej 95 % przedział ufności, wykorzystując odchylenie standardowe i statystykę t-Studenta, co pozwoliło na ocenę niepewności oszacowania średniej. Wykres przedstawiający zmiany modułu odkształcenia przy zginaniu (E) w funkcji czasu przedstawiono na Rys. 6-9. Na wykresie zaprezentowano zarówno wszystkie wyliczone wartości E dla poszczególnych próbek w danym kroku czasowym (punkty w kolorze brązowym PE, a w kolorze zielonym RPE), jak i średnie wartości E z przedziałami ufności (czarne kwadraty z pionowymi „świecami” błędów). Dodatkowo, do wartości średnich dopasowano model potęgowy w postaci:

$$E(t) = A_1 + A_2 \cdot t^{-n} \quad (6.6)$$

gdzie parametry modelu wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów, a niepewność dopasowania zilustrowano obszarem ufności wokół krzywej. Na podstawie tego modelu wyznaczono również prognozowaną wartość modułu E dla czasu 10^6 godzin (ok. 114 lat) wraz z jego przedziałem ufności.



Rys. 6-9 Zależność wyznaczonego modułu odkształcenia przy naprężeniach początkowych od czasu badania próbki wraz z ekstrapolacją w czasie

Fig. 6-9 Strain modulus vs. testing time at initial stresses (with extrapolation)

Analiza wyników wykazała, że moduł odkształcenia E systematycznie maleje wraz z wydłużaniem czasu obciążenia, co jest typowe dla materiałów polimerowych poddanych długookresowemu obciążeniu i potwierdza wyraźny udział zjawiska pełzania w rozwoju deformacji. Początkowe wartości E (np. po 1 godzinie) wynoszą ok. 600 MPa, natomiast po 10 000 godzinach zmniejszają się do wartości rzędu 180-200 MPa. Rozrzut pojedynczych wartości E dla poszczególnych próbek w danym czasie jest zauważalny, co odzwierciedla zarówno naturalną zmienność materiału, jak i błędy pomiarowe. Mimo to, przedziały ufności dla średnich wartości E są stosunkowo wąskie, co świadczy o dobrej powtarzalności wyników i wiarygodności oszacowania średniej. Dopasowany model potęgowy dobrze opisuje obserwowaną zależność wyznaczonych modułów średnich w poszczególnych chwilach czasowych ($R^2 = 0,986$), a jego parametry pozwalają na próbę ekstrapolacji zachowania materiału w długim okresie. Należy jednak podkreślić, że prognozowanie wartości modułu E w czasie dłuższym niż 10 000 godzin (ok. 1 rok) wiąże się już z istotnie rosnącą niepewnością. W tym zakresie obserwowany rozrzut wartości modułu E dla poszczególnych próbek może przekraczać nawet 50 % wartości modułu średniego, co znacząco ogranicza wiarygodność prognoz uzyskanych na podstawie modelu potęgowego i wyznaczania modułów zgodnie z prawem Hooke'a. Tak duża zmienność i szerokie przedziały ufności sprawiają, że skuteczne

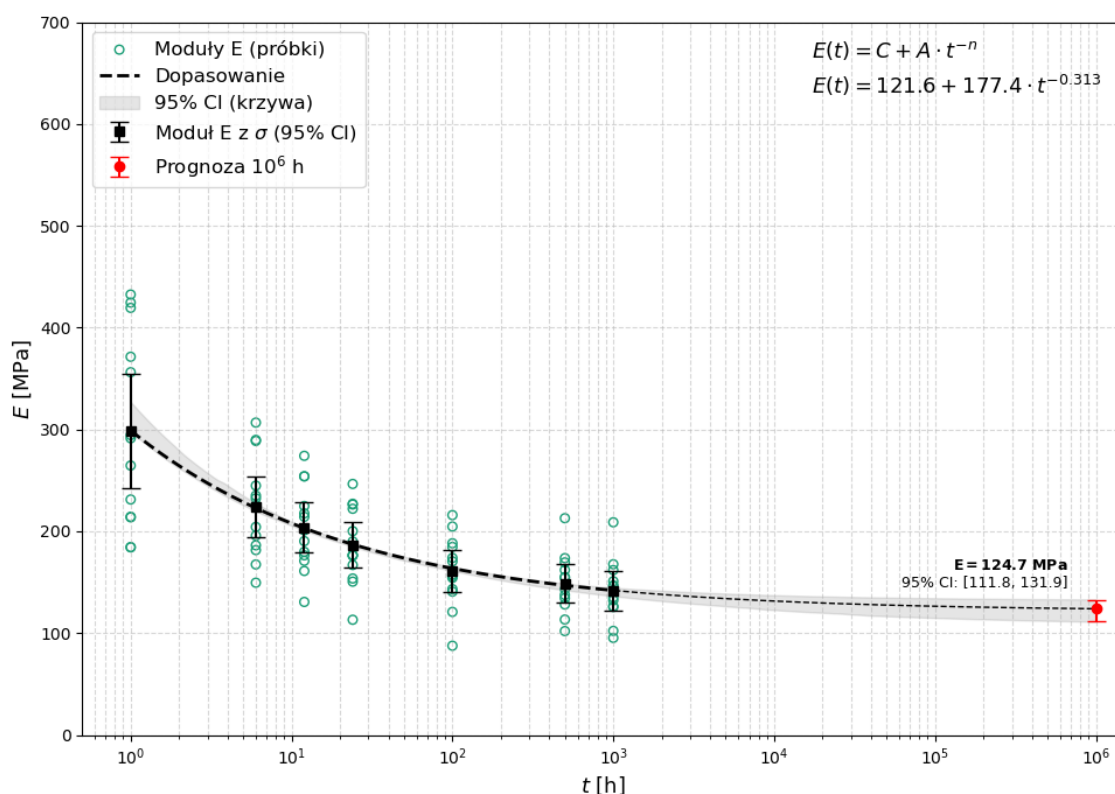
przewidywanie długoterminowych właściwości materiału na podstawie dostępnych danych staje się praktycznie niemożliwe.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że struktura materiału wraz z upływem czasu ulega stopniowemu osłabieniu, a zastosowana metodyka pozwala na ocenę tego procesu oraz oszacowanie niepewności prognoz, jednak w przypadku bardzo długich czasów trwania obciążenia należy zachować szczególną ostrożność przy interpretacji wyników.

6.4.2. Długookresowy moduł odkształcenia z badań pełzania przy rozciąganiu

W celu oceny trwałości materiału w jednoosiowym stanie naprężenia, dla próbek rozciąganych wyznaczono ewolucję długookresowego modułu odkształcenia $E(t)$. Dla każdej próbki, w określonych przedziałach czasowych (1, 6, 12, 24, 100, 500, 1000, 5000, 10000 godzin), wyznaczano wartość modułu siecznego E przy rozciąganiu jako iloraz naprężenia do odkształcenia, zgodnie z równaniem (6.5), analogicznie jak w rozdziale 6.4.1. Następnie, dla każdego punktu czasowego, obliczono średnią wartość modułu E oraz jej 95 % przedział ufności, wykorzystując odchylenie standardowe i statystykę t-Studenta, co pozwoliło na ocenę niepewności oszacowania średniej. Na wykresie (Rys. 6-10) zaprezentowano zarówno wszystkie wyliczone wartości E dla poszczególnych próbek w danym kroku czasowym, jak i średnie wartości E z przedziałami ufności (czarne kwadraty z pionowymi „świecami” błędów). Dodatkowo, do wartości średnich dopasowano model potęgowy (równanie (6.6)) gdzie parametry modelu wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów, a niepewność dopasowania zilustrowano obszarem ufności wokół krzywej. Na podstawie tego modelu wyznaczono również prognozowaną wartość modułu E w czasie 10^6 godzin (ok. 114 lat) wraz z jej przedziałem ufności.

W badaniach pełzania przy rozciąganiu moduł odkształcenia $E(t)$ wykazuje wyraźną tendencję malejącą w funkcji czasu. Początkowo osiąga on wartości rzędu 300 MPa, po czym wartość ta sukcesywnie ulega obniżeniu do ok. 140 MPa w 1000h. Prognozowana wartość modułu odkształcenia w okresie ok. 100 lat, wyznaczona metodą normową i wynosi 124,7 MPa przy rozrzucie od 111,8 do 131,9 MPa.



Rys. 6-10 Zależność wyznaczonego modułu odkształcenia przy naprężeniach początkowych od czasu badania próbki wraz z ekstrapolacją w czasie

Fig. 6-10 Strain modulus vs. testing time at initial stresses (with extrapolation in time)

6.4.3. Porównanie długookresowych modułów odkształcenia

Moduły oznaczone na podstawie badań pełzania przy rozciąganiu osiągają mniejsze wartości w stosunku do modułów wyznaczonych na podstawie badań pełzania przy zginaniu. W pierwszych godzinach moduł określony przy rozciąganiu (ok. 300 MPa) jest prawie dwukrotnie mniejszy niż przy zginaniu (ok. 600 MPa). Wraz z upływem czasu różnica w wartościach modułów zmniejsza się; po 1000h moduł określony przy rozciąganiu (124,7 MPa) jest mniejszy o blisko 30 % w stosunku do modułu oznaczonego na próbkach zginanych (155,6 MPa).

6.5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza porównawcza modeli konstytutywnych wykazała, że w prognozowaniu odkształceń długookresowych $\varepsilon(t)$ najbardziej efektywne są modele empiryczne (Findleya i Hadida) w granicach zakresu kalibracji. Zapewniają one wysoką zgodność kształtu krzywej i stabilność dopasowania, co ogranicza błąd ekstrapolacji w obrębie rozpoznanych poziomów naprężenia. Modele wieloelementowe (np. Burgersa, Samarina) stanowią użyteczny kompromis, ponieważ oferują mniejszą przeciętnie dokładność liczbową, ale lepszą interpretowalność parametrów oraz większą kontrolę nad składnikami odpowiedzi krótko i długookresowej, co jest istotne przy zmianach historii obciążenia lub analizach wrażliwości. Modele jednoelementowe nie oddają adekwatnie składowej długoczasowej i nie powinny być w takiej postaci stosowane do prognoz długoterminowych. W kontekście zastosowań inżynierskich zasadne jest łączenie modelu empirycznego (do predykcji w horyzoncie eksploatacyjnym) z równoległą weryfikacją modelem opartym o mechanizmy fizyczne, przy jednoczesnym raportowaniu niepewności prognoz oraz ograniczeniu ekstrapolacji do zakresu danych eksperymentalnych.

Zaproponowany model materiałowy hybrydowy, łączący trzy mechanizmy odkształcenia, wykazał się bardzo wysoką zgodnością z danymi eksperymentalnymi, szczególnie w zakresie większych naprężeń, gdzie modele literaturowe przestawały spełniać wymagania dokładności. Szczególnie dobrze ujawnia symptomy przejścia materiału do III stadium pełzania. Dzięki temu może on pełnić rolę narzędzia diagnostycznego przy analizie eksperymentalnej, pozwalając na wczesną identyfikację mechanizmów degradacyjnych w próbkach poddanych obciążeniom powyżej wartości krytycznych. Aby jednoznacznie ocenić zakres stosowalności oraz ograniczenia proponowanego modelu, konieczne jest przeprowadzenie pogłębionych badań opartych na znacznie szerszym materiale eksperymentalnym. Model ten charakteryzuje się dużym potencjałem prognostycznym, jednak pełna weryfikacja wymaga dalszej analizy stabilności wyznaczanych parametrów oraz oceny możliwości jego uogólnienia na odmienne warunki obciążenia i środowiska badań.

W badaniach pełzania moduł odkształcenia $E(t)$ wykazuje wyraźną tendencję malejącą w funkcji czasu. Tego rodzaju zachowanie jest spójne z doniesieniami literaturowymi, w których wykazuje się, że dla HDPE podczas długotrwałego obciążenia dochodzi do redukcji modułu o kilkadziesiąt procent w ciągu pierwszych kilkuset godzin, a wartości asymptotyczne oscylują w granicach 100-300 MPa w zależności od warunków badań

(Janson, 1993; *Relationship...*, 2009). Charakterystyki uzyskane w badaniach można zatem uznać za reprezentatywne dla materiału HDPE. W porównaniu z wynikami dla próbek zginanych, wartości modułów wyznaczonych metodą normową podczas rozciągania są istotnie mniejsze w całym przedziale badanego czasu. Różnica ta może wynikać głównie z odmiennego stanu naprężenia – w próbie zginania występuje złożony rozkład naprężeń, gdzie część odkształceń zostaje ograniczona przez geometrię próbki, co skutkuje pozornie większą sztywnością efektywną. Natomiast w jednoosiowej próbie rozciągania obciążenie działa w pełni na objętość próbki, przez co znacznie wyraźniej ujawniają się mechanizmy molekularne odpowiadające za pełzanie, takie jak reorientacja i poślizg łańcuchów polimerowych (Ward i Sweeney, 2013).

Długookresowy spadek sztywności materiału towarzyszący rozwojowi odkształcenia wskazuje na konieczność uwzględnienia tego efektu w projektowaniu konstrukcji eksploatowanych, szczególnie w przypadku konstrukcji o znacznym, projektowanym okresie eksploatacji (rzędu 50-100 lat).

7. Model konstytutywny do opisu HDPE w odniesieniu do odpowiedzi materiału na obciążenia długookresowe

7.1. Wprowadzenie

Prawidłowe projektowanie konstrukcji podziemnych z HDPE, w tym bezciśnieniowych zbiorników podziemnych, wymaga prawidłowego opisu odpowiedzi materiału na długotrwałe obciążenie, ze szczególnym uwzględnieniem odpowiedniej relacji naprężenie-odkształcenie $\sigma - \varepsilon$ w zakresie granicznych naprężeń początkowych, która determinuje zarówno nośność, jak i użyteczność konstrukcji w długim okresie eksploatacji.

W rozdziale 6 zaproponowano model fenomenologiczny o strukturze hybrydowej (równania (6.1) – (6.4)), którego głównym celem była analiza przebiegu pełzania w krótkotrwałych testach oraz identyfikacja symptomów przejścia do III stadium pełzania. Model pozwalał na wczesne wykrycie przyspieszonych mechanizmów degradacyjnych, lecz jego parametry cechują się znaczną zmiennością i nie mają jednoznacznego odniesienia do właściwości materiałowych. Dlatego też nie może on być traktowany jako pełny model konstytutywny, a jedynie jako narzędzie diagnostyczne przy analizie wyników eksperymentalnych. Użyteczny praktycznie model konstytutywny powinien umożliwiać określenie granicznych wartości naprężeń i odkształceń gwarantujących wymaganą trwałość i niezawodność konstrukcji oraz prognozowanie parametrów pozwalających na okresową ocenę stanu technicznego w warunkach niepewności obciążeń projektowych oraz uwzględnienie innych istotnych warunków eksploatacji. W literaturze dostępne są różne podejścia do modelowania pełzania polimerów, w tym modele oparte na prawie przepływu Nortona i potencjale pełzania, modele reologiczne (Maxwella, Kelvina-Voigta i Burgersa) oraz modele empiryczne (Findleya i Hadida). Jak wykazano w rozdziale 6, każde z tych podejść ma określone ograniczenia w kontekście dokładnego opisu długoterminowego zachowania HDPE, co uzasadnia potrzebę opracowania nowego modelu konstytutywnego. Celem opracowania nowego modelu konstytutywnego jest ilościowy opis relacji naprężenie-odkształcenie HDPE w warunkach długotrwałego obciążenia.

7.2. Proponowany model konstytutywny

Na podstawie własnych badań i rozważań nad zachowaniem się materiału HDPE podczas obciążenia, zaproponowany został autorski konstytutywny sprzężony model sprężysto-lepko-plastyczny rozwiązany iteracyjnie, który uwzględnia jednocześnie trzy stadia

zachowania się materiału w warunkach obciążeń długookresowych. Jego postać można przedstawić równaniem:

$$\varepsilon(t) = C_0 \cdot \sigma_0 + C(\sigma) \cdot \{1 - \exp [-(C_2 \cdot t)^n]\} \quad (7.1)$$

gdzie: C_0, C_2, n – stałe modelu, t – czas, $C(\sigma)$ – funkcja podatności, którą można opisać wzorem:

$$\begin{aligned} C(\sigma) &= C_1 \cdot \frac{\sigma}{1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{max}}\right)^2} = C_1 \cdot \frac{\sigma \cdot \sigma_{max}^2}{\sigma_{max}^2 - \sigma^2} = \\ &= C_1 \cdot \frac{\sigma_0 \cdot \sigma_{max}^2}{[1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon(t)] \cdot \sigma_{max}^2 - \frac{\sigma_0^2}{1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon(t)}} = \\ &= C_1 \cdot \frac{\sigma_0 \cdot \sigma_{max}^2 \cdot [1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon(t)]}{[1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon(t)]^2 \cdot \sigma_{max}^2 - \sigma_0^2} \end{aligned} \quad (7.2)$$

gdzie: C_1 – stała opisująca asymptotę poziomą, ν – współczynnik Poissona (przyjęto: 0,43), σ_{max} – naprężenie graniczne, σ_0 – naprężenie początkowe, nominalne (inżynierskie), które uwzględnia wyłącznie pole przekroju początkowego i można je opisać wzorem (7.3), σ – naprężenie rzeczywiste, które uwzględnia zwężanie próbki pod wpływem obciążenia i opisane jest wzorem (7.4):

$$\sigma_0 = \frac{F}{A} \quad (7.3)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{(1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon + \nu^2 \cdot \varepsilon^2)} \cong \frac{\sigma_0}{1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon} = \frac{F}{A} \cdot \frac{1}{1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon} \quad (7.4)$$

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 ν oraz naprężenia granicznego σ_{max} . Parametry te nie mają wyłącznie charakteru dopasowania numerycznego jako stałe dopasowane do danych eksperymentalnych, lecz mają jednoznaczne uzasadnienie fizyczne, reologiczne. C_0 odpowiada sprężystości początkowej, natychmiastowej odpowiedzi materiału na obciążenie.

Jest odwrotnością modułu sprężystości E i jej wartość można ustalić na podstawie gęstości HDPE oraz prędkości fali podłużnej v_f w ośrodku sprężystym i można go opisać wzorem:

$$C_0 = \frac{1}{E} = \frac{1}{v_f^2 \cdot \rho} \quad (7.5)$$

Początkowy moduł sprężystości E_0 HDPE wyznaczony na podstawie danych literaturowych mieści się pomiędzy ok. 4350 a 6000 MPa, przy założeniu, że prędkość fali podłużnej jest równa od 2150 do 2500 m/s (Piché, 1984; Reverdy, 2020) oraz gęstość HDPE ρ równa od 941 do 965 kg/m³ (Fried, 2014; Speight i in., 2005).

Parametr C_1 natomiast można interpretować jako miarę sprzężenia między odkształceniem sprężystym a rozwijającym się nieliniowym procesem pełzania. Opisuje on również asymptotę poziomą w funkcji różnicy pomiędzy naprężeniem rzeczywistym i naprężeniem granicznym, czyli końcowe odkształcenie w warunkach ustalonych. Z kolei C_2 i n kontrolują prędkość i charakter „wygaszania” procesów relaksacji / retardacji. Kluczową rolę odgrywa parametr σ_{max} , który definiuje próg przejścia z fazy stabilnej do reżimu przyspieszonego pełzania – fizycznie odpowiada to wartości naprężenia, przy której łańcuchy polimeru uzyskują dostateczną swobodę ruchu, rozplątując się i zrywając, co gwałtownie intensyfikuje proces reorganizacji struktury materiału i jej stopniowego degradowania.

Dzięki takiej konstrukcji składników modelu umożliwia on nie tylko odtworzenie wczesnej, quasi-sprężystej odpowiedzi materiału na obciążenie, ale także pozwala uchwycić mechanizm fizyczny związany z rozwojem deformacji w pobliżu wartości progowych, przy których obserwowany jest niekontrolowany rozwój odkształceń, co czyni go narzędziem zdolnym do prognozowania zachowania HDPE w pełnym zakresie obciążeń długotrwałych.

Metoda wyznaczania odkształcenia $\varepsilon(t)$ realizowana jest iteracyjnie. W danym czasie t i przy naprężeniu początkowym σ_0 należy obliczyć wartość $\varepsilon(t)$ jako granicę iteracji. Aby wyznaczyć równanie zależności uwikłanej $\varepsilon(t)$ należy odwrócić równanie (7.1) i sprowadzić je do wielomianu drugiego stopnia w postaci:

$$a_1 \cdot \varepsilon(t)^2 + b_1 \cdot \varepsilon(t) + c_1 = 0 \quad (7.6)$$

gdzie po przekształceniach uzyskamy następujące współczynniki, a równanie (7.6) może mieć zero, jedno lub dwa rozwiązania:

$$a_1 = 4 \cdot \nu \cdot \sigma_{max}^2 \quad (7.7)$$

$$b_1 = -(\sigma_{max}^2 - \sigma_0^2 + 2 \cdot \nu \cdot C_1 \cdot \sigma_0 \cdot \sigma_{max}^2 \cdot \{1 - \exp[-(C_2 \cdot t)^n]\}) \quad (7.8)$$

$$c_1 = C_1 \cdot \sigma_0 \cdot \sigma_{max}^2 \cdot \{1 - \exp[-(C_2 \cdot t)^n]\} \quad (7.9)$$

$$\Delta = b^2 - 4 \cdot a \cdot c = \left\{ \sigma_{max}^2 - \sigma_0^2 + 2 \cdot \nu \cdot C_1 \cdot \sigma_0 \cdot \sigma_{max}^2 \cdot \{1 - \exp[-(C_2 \cdot t)^n]\} \right\}^2 + \quad (7.10)$$

$$-16 \cdot \nu \cdot \sigma_{max}^4 \cdot C_1 \cdot \sigma_0 \cdot \{1 - \exp[-(C_2 \cdot t)^n]\}$$

Dla badanego materiału HDPE, na podstawie badań pełzania przy rozciąganiu uzyskano następujące wartości współczynników:

$C_0 = 1/E_0$	=	0	[MPa]
C_1	=	0,0049035	[MPa ⁻¹]
C_2	=	0,0020695	[h ⁻ⁿ]
n	=	0,161	[-]
σ_{max}	=	13,33	[MPa]

Aproksymację wartości parametrów wykonano przy założeniu, że wartość współczynnika C_0 wynosi zero, ponieważ w metodyce badań przyjęto eliminację luzów w pierwszych sekundach pomiaru, co również skutkowało usunięciem komponentu sprężystego odkształcenia.

Tabela 7-1 zestawia wartości odkształcenia $\varepsilon(t)$ obliczone na podstawie zaproponowanego modelu przy stałym obciążeniu i naprężeniach początkowych (1-10,2 MPa), w punktach czasowych od 50h do 876 000h (≈ 100 lat). W obliczeniach przyjęto parametry globalne modelu oraz przyjęto techniczny próg zakończenia iteracji na poziomie $\varepsilon = 0,3$ (30 %).

Tabela 7-1 Zestawienie wyników: odkształcenie próbki - model, wraz z prognozą na okres 100 lat (876000h)

Table 7-1 Summary of results: sample strain – model, prediction for 100 years (8760000 hours)

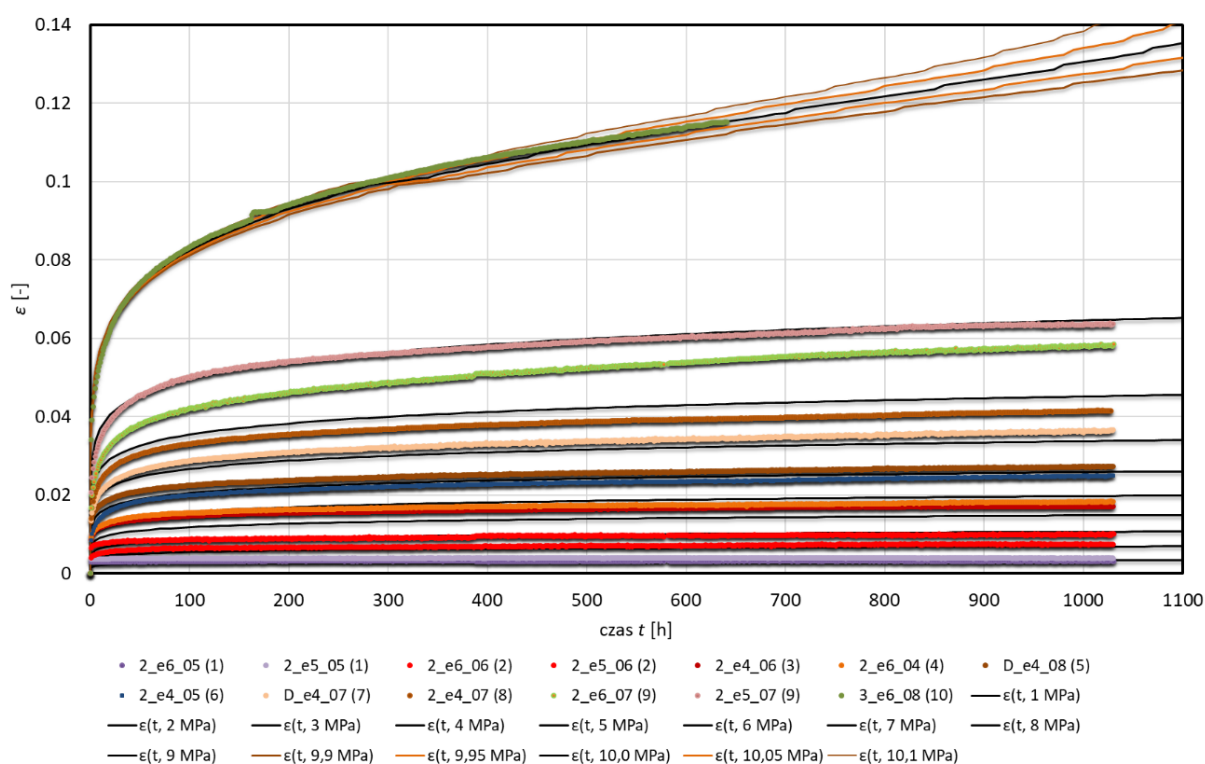
Czas t [h]	Napężenie początkowe σ_0 [MPa]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9,8	9,9	10	10,1	10,2	
	Odkształcenie ε [-]														
50	0,0025	0,0050	0,0085	0,0118	0,0156	0,0203	0,0262	0,0345	0,0477	0,0676	0,0716	0,0762	0,0819	0,0889	
100	0,0027	0,0054	0,0091	0,0127	0,0168	0,0218	0,0283	0,0373	0,0519	0,0747	0,0795	0,0852	0,0928	0,1010	
200	0,0029	0,0059	0,0097	0,0135	0,0180	0,0234	0,0304	0,0402	0,0563	0,0826	0,0884	0,0959	0,1048	0,1221	
500	0,0031	0,0064	0,0106	0,0147	0,0196	0,0255	0,0332	0,0441	0,0622	0,0946	0,1019	0,1132	0,1373	> 0,30	
1000	0,0033	0,0068	0,0112	0,0157	0,0208	0,0271	0,0354	0,0471	0,0669	0,1044	0,1154	0,1368	> 0,30	> 0,30	
1500	0,0035	0,0071	0,0116	0,0162	0,0215	0,0281	0,0366	0,0489	0,0698	0,1113	0,1255	> 0,30	> 0,30	> 0,30	
2000	0,0035	0,0072	0,0119	0,0166	0,0220	0,0287	0,0375	0,0501	0,0718	0,1170	0,1356	> 0,30	> 0,30	> 0,30	
8760	0,0039	0,0081	0,0132	0,0184	0,0245	0,0320	0,0419	0,0564	0,0824	> 0,30	> 0,30	> 0,30	> 0,30	> 0,30	
87600	0,0045	0,0091	0,0148	0,0207	0,0276	0,0362	0,0476	0,0646	0,0970	> 0,30	> 0,30	> 0,30	> 0,30	> 0,30	
175200	0,0046	0,0094	0,0152	0,0212	0,0284	0,0372	0,0489	0,0665	0,1002	> 0,30	> 0,30	> 0,30	> 0,30	> 0,30	
438000	0,0047	0,0096	0,0156	0,0218	0,0291	0,0382	0,0503	0,0686	0,1039	> 0,30	> 0,30	> 0,30	> 0,30	> 0,30	
876000	0,0048	0,0098	0,0158	0,0222	0,0296	0,0388	0,0512	0,0698	0,1065	> 0,30	> 0,30	> 0,30	> 0,30	> 0,30	

Uwaga: Wartość $\varepsilon = 0,30$ (30 %) ustawiono jako graniczną w procedurze iteracyjnej.

W strefie naprężeń do ok. 8 MPa w czasie 100 lat odkształcenie pozostaje relatywnie małe i monotonicznie rośnie wraz z naprężeniem: ε (100 lat) $\approx$ 0,0048 (1 MPa), 0,0388 (6 MPa), 0,0698 (8 MPa). Uzyskane wartości mogą być bezpośrednio wykorzystane w projektowaniu, np. przy ustalaniu kryterium ograniczenia przemieszczeń. W strefie pomiędzy 8 a 10 MPa model przewiduje istotne przyspieszenie pełzania. Przy naprężeniach początkowych 9,8 i 9,9 MPa przekroczenie progu o wartości 0,30 następuje między 2000h a 8760h (czyli w skali miesięcy do roku), a przy 10 MPa – między 1000h a 1500h. Wraz z przybliżaniem się do naprężeń ~ 10 MPa dynamika pełzania silnie przyspiesza, a czas potrzebny do przekroczenia progu zapewniającego długookresową stabilizację odkształceń gwałtownie maleje i dąży do nieliniowej granicy modelu ustalonej parametrem $\sigma_{max} = 13,33$ MPa (nieliniowa część odpowiedzi). Dla strefy 10,1-10,2 MPa ustalony próg: $\varepsilon = 0,30$ pojawia się bardzo wcześnie (w ciągu dziesiątek-setek godzin), co od strony eksploatacji praktycznie dyskwalifikuje takie poziomy obciążenia w użytkowaniu długotrwałym. Wartości te są zbliżone do wyników uzyskanych przez (Drozdov i in., 2024), gdzie w badaniach pełzania przy rozciąganiu uzyskano prognozowane wartości graniczne naprężeń początkowych dla 50 lat równe 9,6 MPa dla materiału pierwotnego (PE) oraz 9,24 MPa dla materiału z recyklatu (RPE).

Jeżeli jako kryterium granicy użytkowalności obiektów z HDPE takich jak zbiorniki podziemne retencyjne, zostanie przyjęta wartość odkształcenia dla okresu 100 lat, gdzie $\varepsilon(100 \text{ lat}) \leq 5 \%$, to dla przyjętej granicy odkształcenia ($\varepsilon \approx 0,0512$) naprężenia początkowe w elementach z HDPE nie powinny być większe od 7 MPa. Dla restrykcyjnej granicy $\varepsilon \leq 3 \%$ wymagany jest poziom $\sigma_0 \leq 5 \text{ MPa}$ (Tabela 7-1).

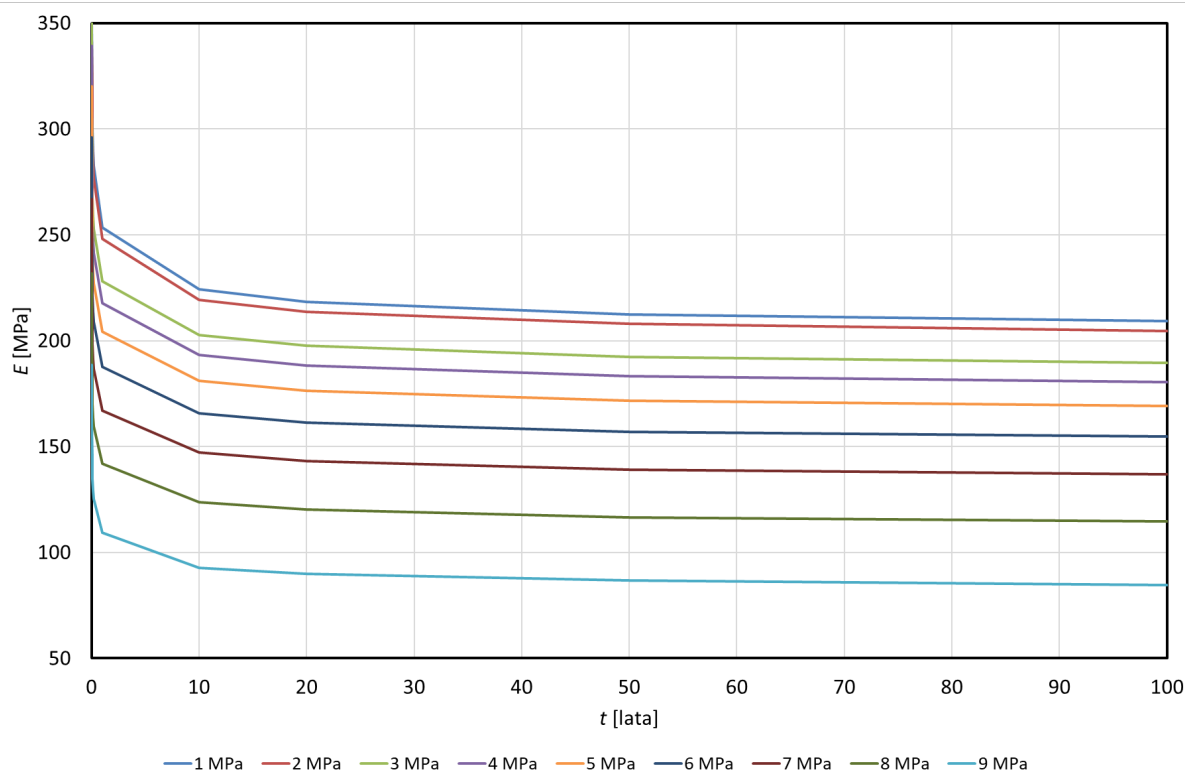
Porównanie wyników aproksymacji modelu na podstawie wyprowadzonych parametrów do danych eksperymentalnych z badania pełzania przy jednoosiowym rozciąganiu przedstawiono na Rys. 7-1. W zakresie do 8 MPa model bardzo stabilnie odwzorowuje zachowanie się materiału przy różnych wartościach obciążenia. Powyżej tej wartości następuje znaczący nieliniowy wzrost odkształceń, który długookresowo nie dąży do asymptoty poziomej. W strefie ok. 10 MPa po ok. 500h następuje pojawienie się symptomów III stadium pełzania.



Rys. 7-1 Porównanie wyników pomiarów i aproksymacji za pomocą funkcji modelu
(aproxymacja łączna wyników wszystkich próbek)

Fig. 7-1 Comparison of experimental results with model function approximation
(approximation of all specimens)

Wykres (Rys. 7-2) ilustruje moduł sieczny E wyznaczony na podstawie predykcji modelu w czasie, dla różnych poziomów σ_0 , pozwalający na obserwację tempa relaksacji materiału pod obciążeniem długotrwałym.



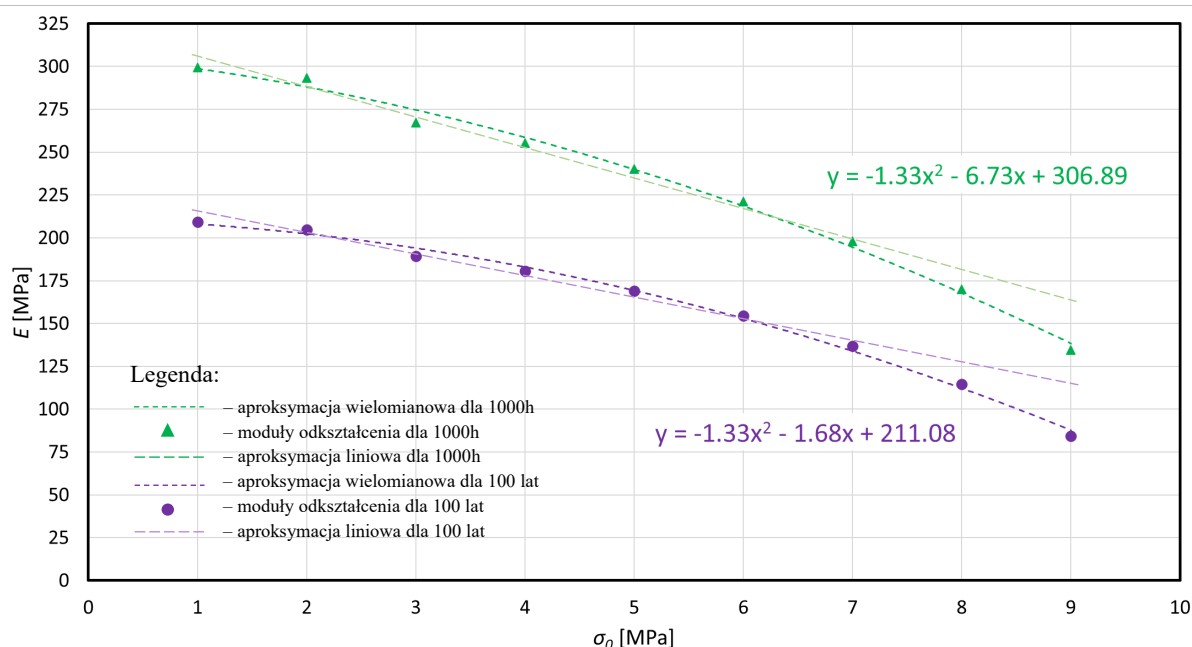
Rys. 7-2 Zmiana siecznego modułu odkształcenia w funkcji naprężenia normalnego i czasu trwania obciążenia

Fig. 7-2 Change of the secant modulus of deformation as a function of normal stress and load duration

Moduł E maleje w czasie t , a prędkość redukcji wartości rośnie wraz ze wzrostem naprężenia σ_0 . Przy małych wartościach σ_0 (1-4 MPa) tempo zmniejszania się modułu jest powolne i zbliża się do asymptoty (część lepko-sprężysta zdominowana jest przez składnik $C_2 \cdot t^n$). Przy $\sigma_0 \gtrsim 8$ MPa jest obserwowana silna nieliniowość, a główną rolę zaczyna odgrywać składnik wzoru $\sigma_0 \cdot \sigma_{max}$. Przy większych wartościach naprężeń σ_0 moduł E jest mniejszy już w krótkich czasach, co wynika z interakcji parametru C_1 z nieliniowym mianownikiem $[1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon(t)]^2$. W efekcie pojawia się wyraźna strefa przejściowa przy 8-9 MPa, gdzie redukcja modułu odbywa się z większą prędkością. Przy naprężeniach równych 8 MPa wyznaczony moduł odkształcenia może zmniejszyć się w ciągu pierwszych miesięcy do wartości poniżej 200 MPa a dla 100 lat osiągnąć wartość równą 114,6 MPa. Średni moduł odkształcenia wyznaczony w zbiorze wszystkich próbek w pełnym zakresie naprężeń początkowych od 1,0 do 10,0 MPa w czasie 10^6 , czyli (ok. 114 lat) wynosi 154,3 MPa.

Jest to wartość większa o 29,6 MPa w porównaniu z modułem odkształcenia prognozowanego, wyznaczonego wg norm za pomocą równania potęgowego na podstawie danych eksperymentalnych (Rys. 6-10).

Moduł sieciowy odkształcenia zależy od wartości naprężeń początkowych i maleje wraz ze wzrostem obciążenia (Rys. 7-2). Można zauważyć, że zależność ta w zakresie naprężeń $\sigma_0 \leq 7$ MPa wykazuje charakter liniowy, natomiast przy naprężeniach większych od 7 MPa moduł E maleje coraz szybciej w sposób nieliniowy. W chwili czasowej 1000 godzin i przy naprężeniu 1 MPa moduł E wynosi 299,5 MPa a przy naprężeniu 9 MPa – 134,5 MPa, czyli jest ok. dwukrotnie mniejszy. Jest to wartość mniejsza o 7,52 MPa w porównaniu z wartością średnią modułu, wyznaczoną wg norm ($E=142,01$ MPa dla 1000h) (Rys. 6 12). W chwili czasowej 100 lat i przy naprężeniu 1 MPa moduł E wynosi 209,3 MPa, a przy naprężeniu 9 MPa – 84,3 MPa, czyli również jest ponad dwukrotnie mniejszy względem siebie. Spadek wartości modułu pomiędzy 1000 godzin a 100 lat przy 9 MPa wynosi 50,2 MPa co stanowi spadek o blisko 40 %. Porównując wartość modułu E dla naprężenia 9MPa ze średnią wyznaczoną wg norm (Rys. 6 12 – $E=124,8$ MPa dla 100 lat) to jest on mniejszy o 40,5 MPa. Jest on również niższy od dolnej granicy przedziału ufności, wynoszącej 111,8 MPa o 27,5 MPa.



Rys. 7-3 Zależność modułu odkształcenia E od naprężenia nominalnego σ_0 dla prognozowanego czasu 1000h oraz 100 lat

Fig. 7-3 Relationship between modulus E and initial stress σ_0 at the predicted times of 1000h and 100 years.

Rys. 7-4 przedstawia odkształcenie długookresowe ε_L w funkcji naprężenia początkowego σ_0 . W ujęciu teoretycznym jest to miara końcowej deformacji próbki w warunkach obciążenia stałym naprężeniem początkowym σ_0 , kiedy wszystkie procesy relaksacji i pełzania ulegają wygaszeniu (zależność dąży do asymptoty). Odkształcenie długookresowe ε_L stanowi granicę $\varepsilon(t)$ przy $t \rightarrow \infty$ i można je opisać wzorem:

$$\begin{aligned}\varepsilon_L &= \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \left\{ C_0 \cdot \sigma_0 + C_1 \cdot \frac{\sigma_0 \cdot \sigma_{max}^2 \cdot [1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon(t)]}{[1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon(t)]^2 \cdot \sigma_{max}^2 - \sigma_0^2} \cdot [1 - \exp [-(C_2 \cdot t)^n]] \right\} = \\ &= \left[C_0 + C_1 \cdot \frac{\sigma_{max}^2 \cdot [1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon_L]}{[1 - 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon_L]^2 \cdot \sigma_{max}^2 - \sigma_0^2} \right] \cdot \sigma_0\end{aligned}\quad (7.11)$$

Aby uzyskać wartość odkształcenia końcowego w stanie ustalonym ε_L (posiadającym asymptotę poziomą) dla $t \rightarrow \infty$, należy rozwiązać równanie:

$$a_1 \cdot \varepsilon_L^2 + b_1 \cdot \varepsilon_L + c_1 = 0 \quad (7.12)$$

którego współczynniki przyjmują uproszczoną postać:

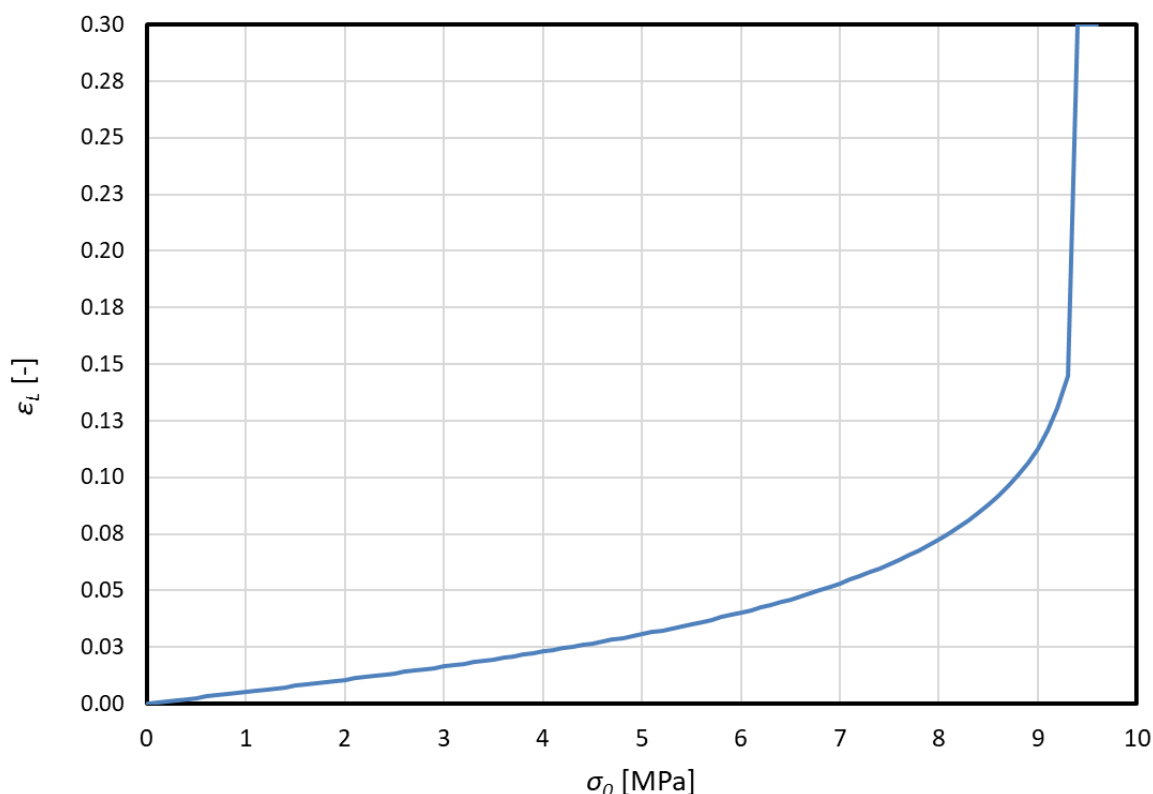
$$a_1 = 4 \cdot \nu \cdot \sigma_{max}^2 \quad (7.13)$$

$$b_1 = -(\sigma_{max}^2 - \sigma_n^2 + 2 \cdot \nu \cdot C_1 \cdot \sigma_n \cdot \sigma_{max}^2) \quad (7.14)$$

$$c_1 = C_1 \cdot \sigma_n \cdot \sigma_{max}^2 \quad (7.15)$$

$$\Delta = b^2 - 4 \cdot a \cdot c = (\sigma_{max}^2 - \sigma_n^2 + 2 \cdot \nu \cdot C_1 \cdot \sigma_n \cdot \sigma_{max}^2)^2 - 16 \cdot \nu \cdot \sigma_{max}^4 \cdot C_1 \cdot \sigma_n \quad (7.16)$$

Następnie poszukuje się rozwiązania, w którym zarówno ε_L (asymptota pozioma), σ_{max} (asymptota pionowa) oraz współczynnik C_1 są dodatnie.

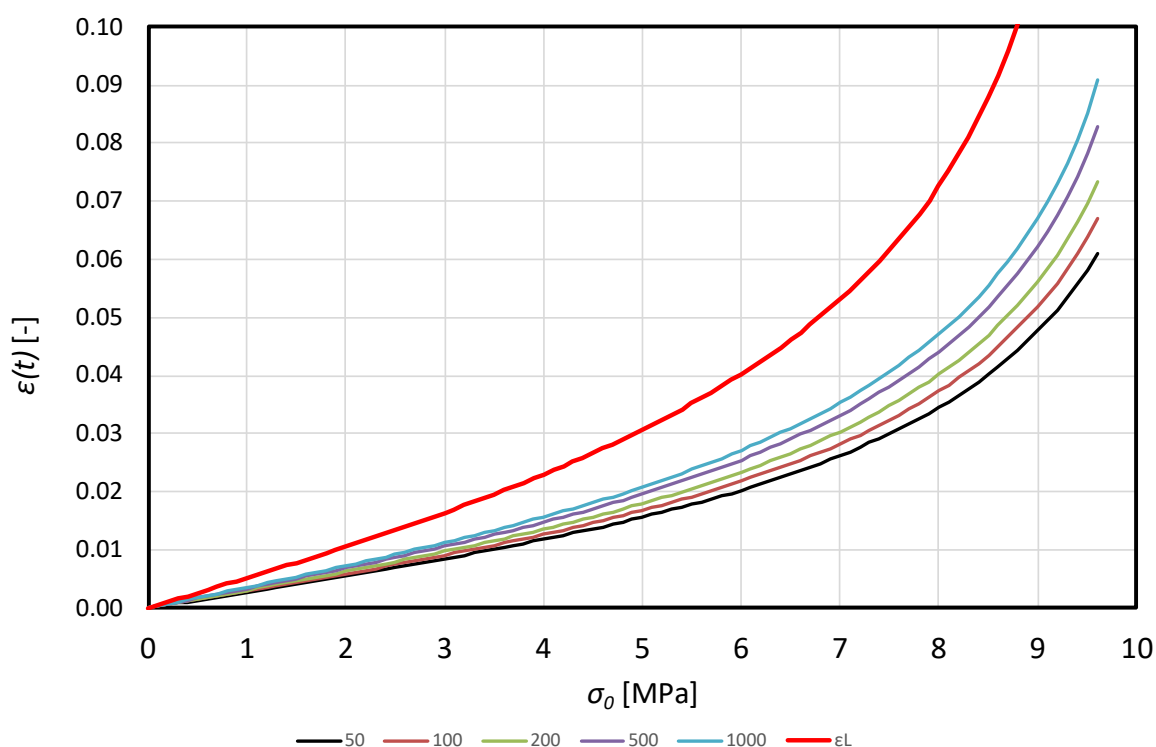


Rys. 7-4 Odształcenie długookresowe ε_L w funkcji naprężenia początkowego σ_0 wyznaczone za pomocą równania (7.2)

Fig. 7-4 Long-term strain ε_L as a function of initial stress σ_0 determined using Equation (7.2)

Charakter $\varepsilon_L(\sigma_0)$ dobrze koresponduje z wcześniejszymi obserwacjami dotyczącymi krzywych pełzania w czasie (Tabela 7-1) oraz zmianami modułu siecznego (Rys. 7-2). Dla małych naprężeń deformacje rosną powoli, a moduł sieczny E utrzymuje się na względnie wysokim poziomie. W miarę zbliżania się do naprężeń początkowych 9-10 MPa wartości graniczne odkształcenia szybko rosną, przy jednoczesnym gwałtownym zmniejszaniu wartości modułu E , co potwierdza spójność modelu z danymi eksperymentalnymi.

Izochrony odkształcenia $\varepsilon(t)$ w funkcji naprężenia początkowego σ_0 dla HDPE zostały przedstawione na Rys. 7-5. Każda krzywa odpowiada stałemu czasowi obciążenia (od 50 do 1000h), a krzywa $\varepsilon_L(\sigma_0)$ przedstawia odkształcenie długookresowe. Wzrost ε wraz z czasem i σ_0 potwierdza nieliniową, silnie zależną od obciążenia odpowiedź materiału. Intensywne zakrzywianie się krzywych przy ~8 - 10 MPa wskazuje na strefę przyspieszonego pełzania. Wykres ten może służyć do bezpośredniego odczytu przewidywanej wartości ε dla zadanego naprężenia początkowego σ_0 w danej chwili czasowej oraz do oceny granicy użyteczności elementów konstrukcji z HDPE.



Rys. 7-5 Izochrony odkształcenia $\varepsilon(t)$ oraz długookresowego ε_L w funkcji naprężenia początkowego σ_0 wyznaczone za pomocą równania (7.2)

Fig. 7-5 Isochrones of strain $\varepsilon(t)$ and long-term strain ε_L as a function of initial stress σ_0 determined using Equation (7.2)

W kontekście praktyki inżynierskiej zależność $\varepsilon_L(\sigma_0)$ stanowi kluczowe narzędzie do wyznaczania stanów granicznych nośności i użyteczności, gdyż pozwala przewidzieć maksymalne długookresowe deformacje elementów z HDPE przy zadanym obciążeniu. Porównanie wartości progowych odkształcenia z przebiegiem $\varepsilon_L(\sigma)$ (Tabela 7-1) wskazuje, że przyjęty w modelu parametr $\sigma_{max}=13,33$ MPa może odzwierciedlać obszar gwałtownej zmiany reżimu pełzania. Wartość ta jest większa od wartości 12 MPa ustalonej w badaniach wstępnych niszczących przy jednoosiowym rozciąganiu (Rozdział 5.3.1), ale mieści się w zakresie niepewności pomiarowej badania.

7.3. Analiza parametrów modelu konstytutywnego

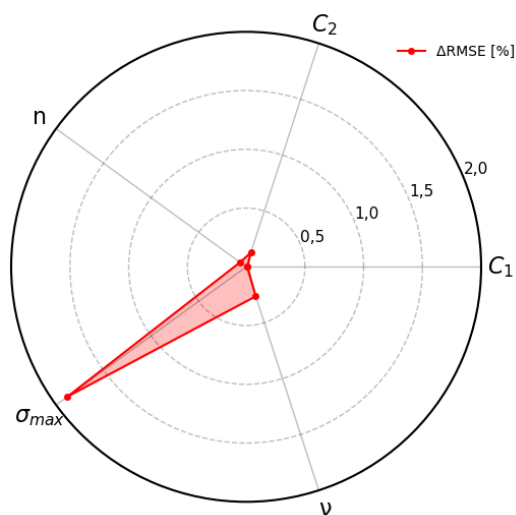
W celu oceny czułości parametrów modelu konstytutywnego wyznaczono niezależne parametry modelu dla każdej z próbek. Zestawienie poszczególnych parametrów przedstawiono w Tabeli Z5-2 (Załącznik 5). Pierwiastek średniego odchylenia kwadratowego wyznaczania parametrów modelu konstytutywnego wynosi 0,54 %. Błąd maksymalny jest równy ok. 3-krotności błędu średniego co w badanym przypadku wynosi 1,62 %. Znaczne zróżnicowanie wartości parametrów C_2 oraz n , opisujących trajektorię rozwoju odkształcenia w czasie, może wskazywać na niejednorodność badanej partii surowca, a w tym zróżnicowanie ułożenia szkieletu tworzonego przez fazę krystaliczną i warunki transportu fazy amorficznej.

Analiza czułości parametrów modelu (Tabela 7-2, Rys. 7-6) wykazała, że największy wpływ na błąd dopasowania ma wartość σ_{max} . Zmiana tego parametru w zakresie $\pm 0,05$ MPa powoduje wzrost średniego błędu z poziomu $6,77 \cdot 10^{-3}$ do $6,89 \cdot 10^{-3}$ MPa, co odpowiada względnej różnicy $\sim 1,8$ %. Oznacza to, że σ_{max} jest kluczowym parametrem w definiowaniu granicy przejścia do przyspieszonego pełzania i wymaga najbardziej precyzyjnej estymacji. Parametr C_2 wykazuje umiarkowany wpływ na czułość modelu – w badanym zakresie błąd zmienia się o ok. $\pm 0,24$ %. Współczynnik Poissona ν powoduje zmianę błędu na poziomie $\sim 0,3$ %, co należy uwzględnić przy analizach numerycznych, jednak jego zmiana ma nieznaczny wpływ na czułość modelu. Parametry C_1 i n charakteryzują się minimalnym wpływem ($< 0,1$ % różnicy błędu), co wskazuje, że pełnią one rolę regulacyjną w dopasowaniu, a nie krytyczną w określaniu asymptotycznej odpowiedzi materiału.

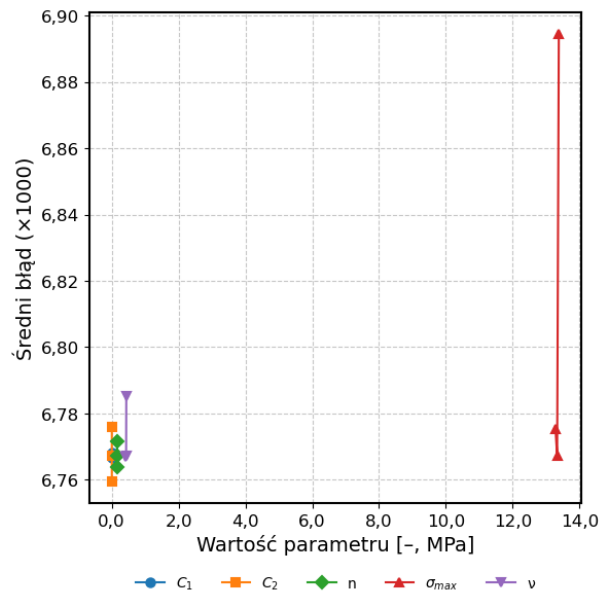
Tabela 7-2 Analiza czułości parametrów modelu konstytutywnego

Table 7-2 Sensitivity analysis of constitutive model parameters

Parametr	Wartość bazowa	Zakres testowy	Błąd min. $\cdot 10^{-3}$ [MPa]	Błąd maks. $\cdot 10^{-3}$ [MPa]	Δ Błąd [%]
C_1	0,004904	0,00490320-0,00490420	6,766	6,768	$\pm 0,02$
C_2	0,00207	0,002045-0,002095	6,759	6,776	$\pm 0,24$
n	0,1615	0,159-0,164	6,763	6,772	$\pm 0,11$
σ_{max}	13,33 MPa	13,28-13,38 MPa	6,775	6,894	1,80
ν	0,43	0,425-0,435	6,767	6,785	0,27



a)

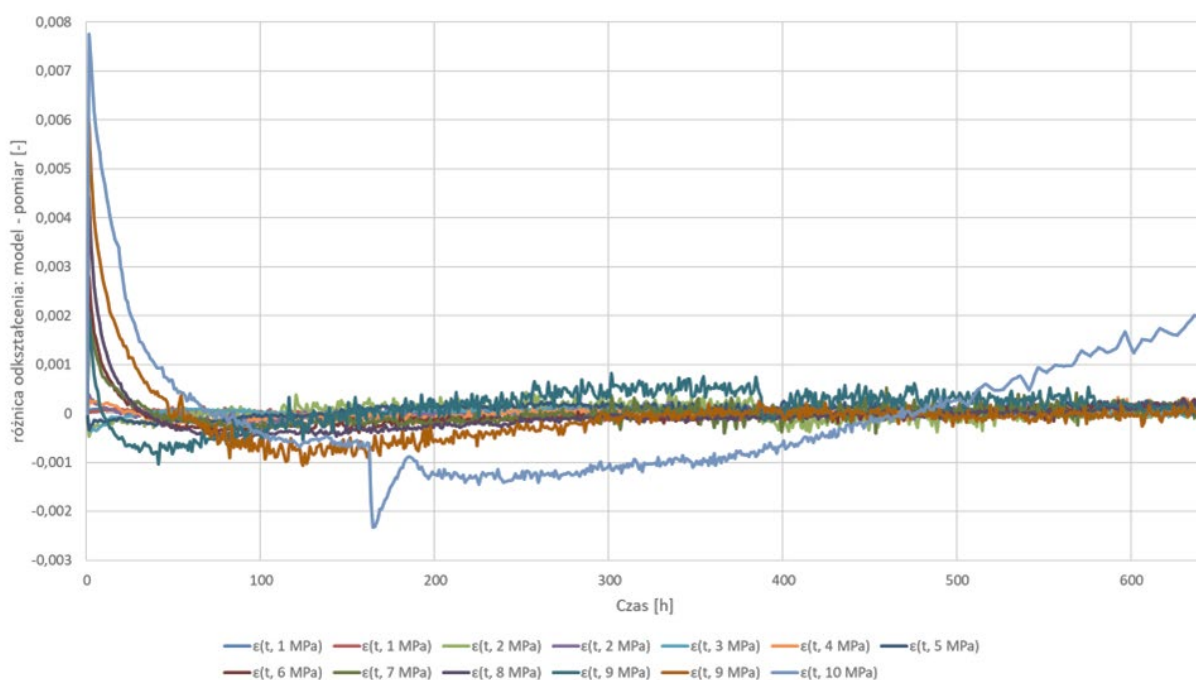


b)

Rys. 7-6 Analiza czułości parametrów modelu konstytutywnego a) wykres radarowy b) wykres krzywych czułości

Fig. 7-6 Sensitivity analysis of constitutive model parameters a) radar chart b) sensitivity curve chart

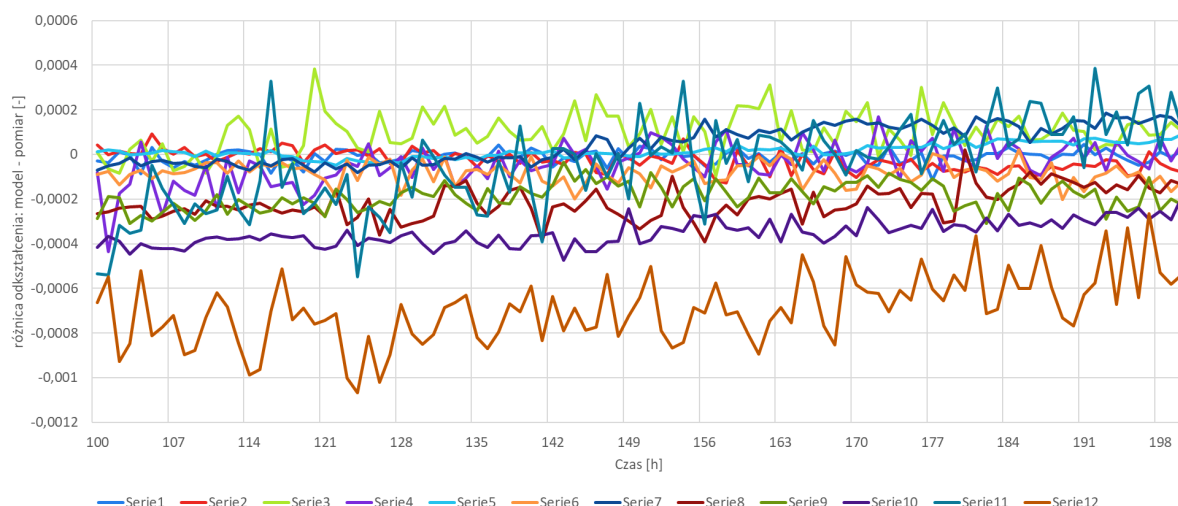
Na Rys. 7-7 przedstawione zostały odchylenia wartości odkształceń wyznaczonych za pomocą modelu konstytutywnego względem wartości pomierzonych. Można zauważyć, że największe różnice występują w okresie pierwszych 10-70 godzin testu, gdzie model w większości przypadków przeszacowuje odkształcenia próbki. Dużą niestabilnością i dużymi różnicami wykazuje się również próbka przy naprężeniu początkowym 10 MPa dla której w czasie od ok 100 do 500 godzin wartości odkształcenia wyznaczonego za pomocą modelu względem pomierzonego są niedoszacowane, a następnie w czasie dłuższym od 500 godzin, kiedy model zaczyna przeszacowywać wartości.



Rys. 7-7 Wykres odchylenia wartości odkształceń wyznaczonych za pomocą modelu konstytutywnego względem wartości pomierzonych dla aproksymacji każdej z próbek niezależnie

Fig. 7-7 Deviation of model-predicted strain values from experimental measurements for independent approximation each sample.

Na Rys. 7-8 przedstawiono odchylenia wartości odkształceń wyznaczonych za pomocą modelu konstytutywnego względem wartości pomierzonych w wybranym przedziale czasowym od 100 do 200h czasu pełzania. Pozwala on ocenić poziom błędów przypadkowych, spowodowanych przede wszystkim przez wahania temperatury przez wysoki współczynnik rozszerzalności termicznej, jakim charakteryzuje się HDPE (Rys. 3-5). Wykres prezentuje różnice pomiędzy średnimi wartościami godzinowymi, więc błędy przypadkowe pojedynczych pomiarów (błędy czujników) zostały w znacznym stopniu zredukowane. Oznacza to, że przy wahanii temperatury materiału w zakresie $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ szerokość pasma wahań odkształcenia wynosi 0,0002-0,0004. Zarejestrowane wahania chwilowych wartości odkształcenia próbek mieszczą się w zakresie podawanym w literaturze (opisany w rozdziale 3.3).

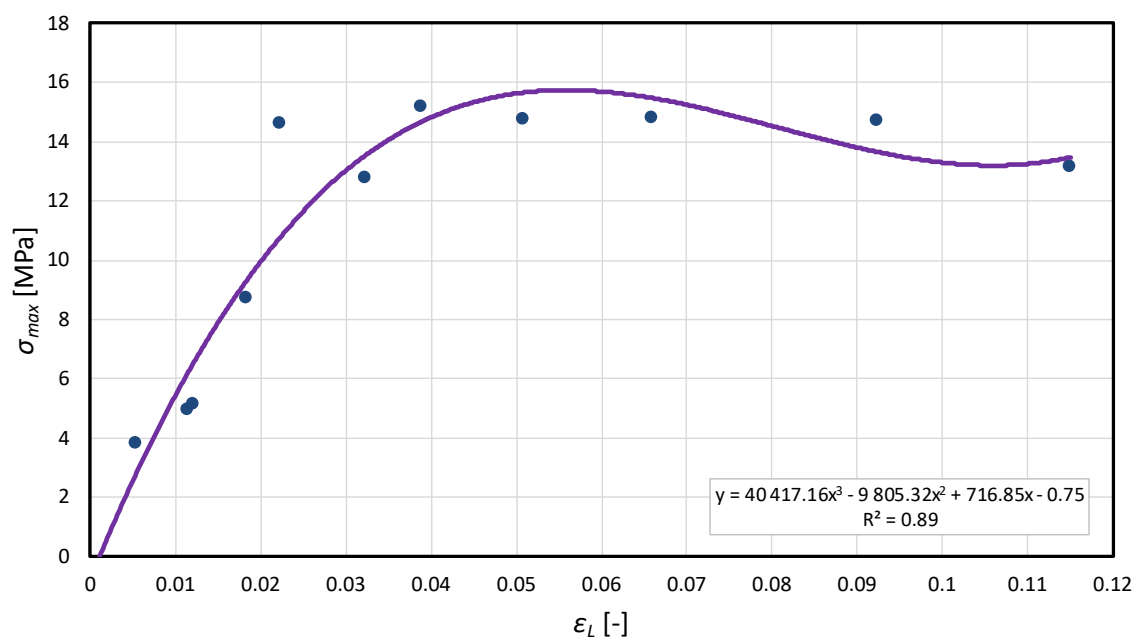


*Rys. 7-8 Wykres odchyleń wartości odkształceń
wyznaczonych za pomocą modelu konstytutywnego względem wartości pomierzonych
w przedziale czasowym od 100 do 200h badania*

*Fig. 7-8 Deviations of strain values predicted by the constitutive model relative to the measured values
over the 100-200h segment of the test*

Redukcję tego rodzaju błędów można w przyszłości wykonać na przykład poprzez korektę opartą na wynikach ciągłego pomiaru temperatury tzw. *próbki-świadka* z dokładnością nie gorszą niż 0,1 °C (temperatura materiału może różnić się od temperatury powietrza w pomieszczeniu laboratorium) oraz pomiar odkształcenia nieobciążonej próbki-świadka, wykonywany synchronicznie z pomiarami próbek badawczych.

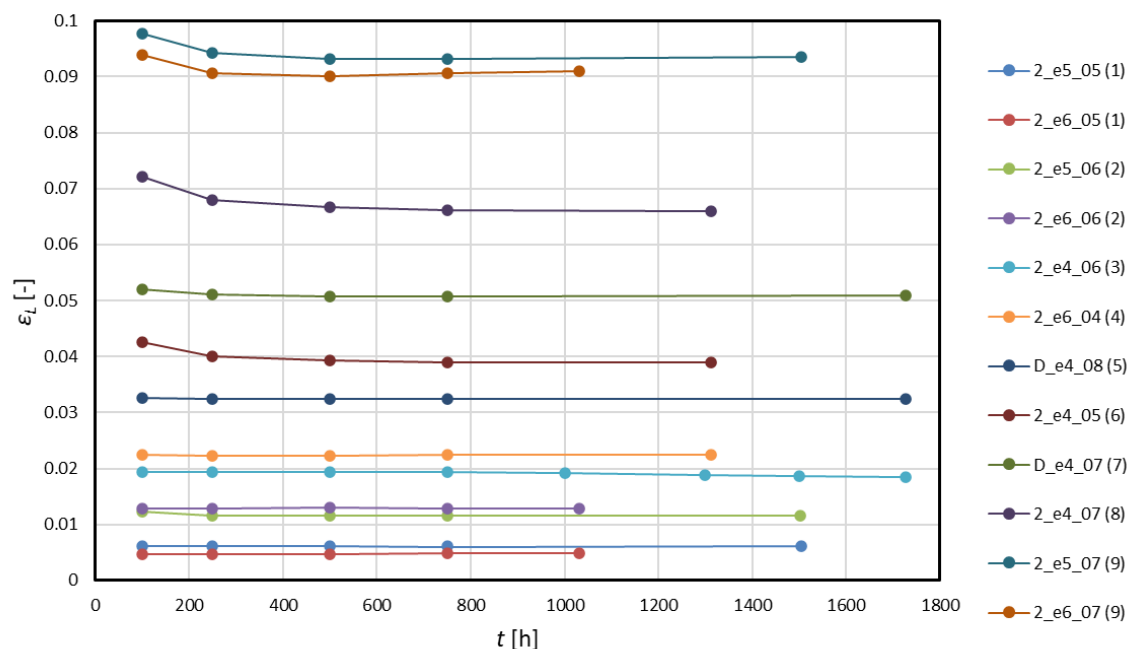
Na Rys. 7-9 została przedstawiona zmienność parametru naprężenia maksymalnego σ_{max} w funkcji odkształcenia długookresowego ε_L . W zakresie odkształceń od 0 do ok. 6 % naprężenie maksymalne rośnie, co wskazuje na zdolność materiału do umocnienia na skutek wymuszonego odkształcenia. W zakresie odkształcenia 6-9 % (niebieskie punkty) wartość σ_{max} utrzymuje się na stabilnym poziomie (ok. 14,5 MPa). Powyżej granicy 9 % materiał ulega powolnemu osłabieniu.



Rys. 7-9 Wykres odchylen wartości odkształceń wyznaczonych za pomocą modelu konstytutywnego względem wartości pomierzonych

Fig. 7-9 Deviation of model-predicted strain values from experimental measurements

Wykres (Rys. 7-10) przedstawia wyliczone wartości docelowej wartości odkształcenia w zależności od czasu badania eksperymentalnego, na którym dokonywana była aproksymacja współczynników modelu.



Rys. 7-10 Zmienność estymacji wartości odkształcenia ϵ_L za pomocą modelu konstytutywnego wyznaczonego na podstawie określonego czasu badania próbki

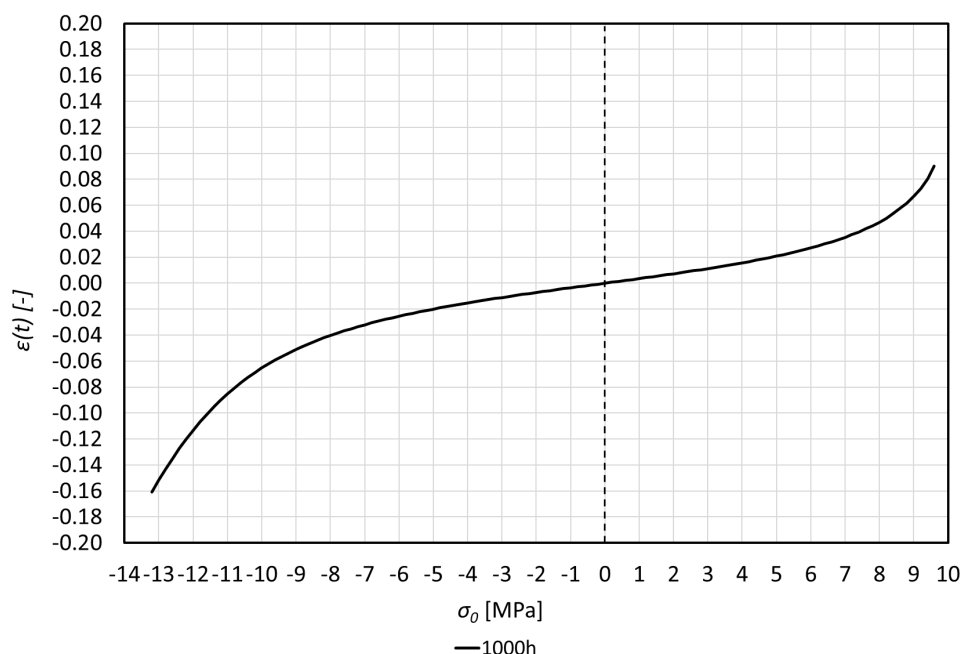
Fig. 7-10 Deviation of model-predicted strain values from experimental measurements

Można zauważyć, że prognozowana wartość ε_L wyznaczana za pomocą modelu konstytutywnego stabilizuje się przy ok. 400-500h badania niezależnie od wartości naprężenia początkowego. Oznacza to, że jest to minimalny czas wykonywania badań pełzania, potrzebny do wiarygodnego oszacowywania docelowej wartości odkształcenia za pomocą modelu konstytutywnego.

7.4. Analiza numeryczna

Klasyczny sposób opisu pełzania polega na rejestrowaniu krzywych odkształcenie-czas przy różnych poziomach naprężeń. Dysponując danymi zestawionymi w Tabeli 7-1, można wyznaczyć krzywe naprężenie-odkształcenie $\sigma - \varepsilon$, gdzie dla ustalonego czasu obciążenia (np. 1000 godzin) odczytuje się wartości odkształcenia odpowiadające różnym poziomom naprężenia i nanosi je na wykres $\sigma - \varepsilon$. Taka krzywa dla $t = 1000h$ reprezentuje zależność naprężenie-odkształcenie materiału po 1000 godzinach, a punkt na tej krzywej odpowiada odkształceniu, jakie osiąga materiał przy danym naprężeniu po 1000 godzin. Warto podkreślić, że w normach (ASTM D2990, 2017; ISO 899-2, 2003) wprowadza się pojęcie modułu pełzania, który odpowiada nachyleniu siecznemu krzywej efektywnej sztywności materiału po zadanym czasie. Taki moduł pełzania jest wielkością fikcyjną – nie opisuje on rzeczywistego natychmiastowego zachowania materiału, lecz pozwala tylko obliczyć odkształcenie po czasie t przy założeniu liniowej sprężystości. W praktyce jednak, gdy zakres odkształceń nie jest mały i materiał jest poddany nieliniowym odkształceniom, pojedynczy moduł pełzania nie jest wystarczający do prawidłowego opisu deformacji długookresowych. Należy wtedy korzystać z pełnej krzywej $\sigma - \varepsilon$ dla danego czasu, uwzględniającej nieliniowość materiału.

W celu wykorzystania krzywej $\sigma - \varepsilon$ (1000h) w analizie MES, należy dobrać odpowiedni model materiału zdolny odtworzyć tę nieliniową zależność naprężenie-odkształcenie. Zamiast implementować złożone modele lepkosprężyste, można wykorzystać statyczną krzywą $\sigma - \varepsilon$ i dopasować do niej model sprężysto-plastyczny lub hiperelastyczny w celu oszacowania odkształceń długookresowych. W pracy zastosowano podejście polegające na potraktowaniu krzywej $\sigma - \varepsilon$ (Rys. 7-11) jako równoważnej krzywej materiałowej, którą zaimplementowano do modelu Response Function (*How to Set Up...*, 2021). Krzywa dla naprężeń dodatnich została skalibrowana na podstawie badań pełzania przy jednoosiowym rozciąganiu, a część ujemnych naprężeń uzyskano poprzez podstawienie do modelu ujemnych wartości naprężenia σ_0 .

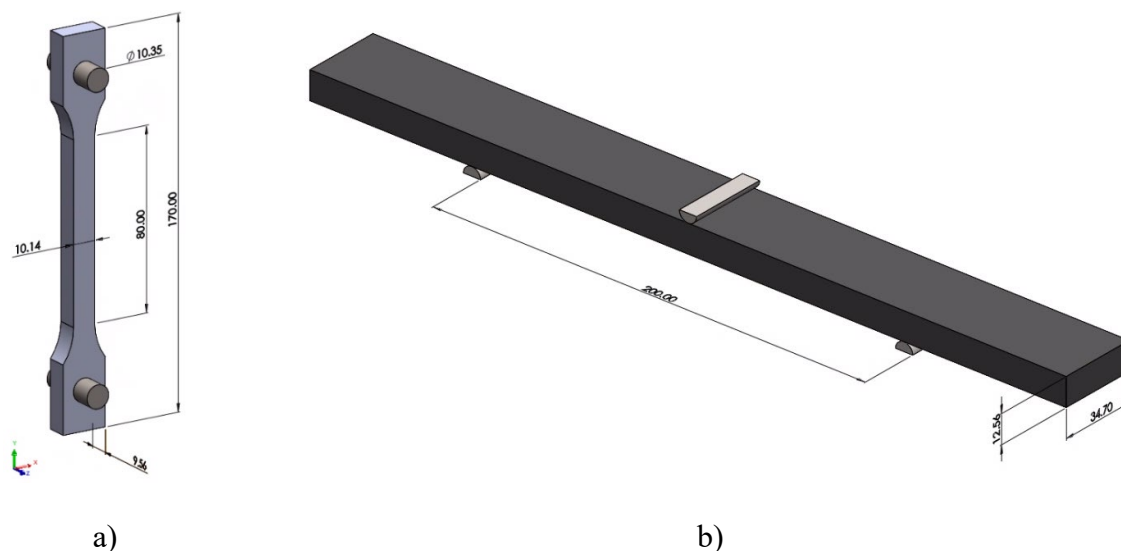


Rys. 7-11 Krzywa naprężenie-odkształcenie dla chwili czasowej 1000h, zaimplementowana do modelu Response Function w ANSYS

Fig. 7-11 Stress-strain curve at 1000 h, implemented in the Response Function model in ANSYS

W celu weryfikacji modelu konstytutywnego na podstawie przeprowadzonych badań podjęto się obliczenia wydłużeń i ugięć modeli wiosełek (Rys. 7-12a) oraz belek zginanych (Rys. 7-12b). Porównano obliczone ugięcia belki z wynikami badań eksperymentalnych, w których mierzono pełzanie (ugięcie w czasie) próbek z HDPE. Model geometryczny oraz warunki brzegowe odzwierciedlały rzeczywisty układ doświadczalny. Obciążenie odpowiadało sile użytej w doświadczeniu, a wynikiem obliczeń było ugięcie w stanie ustalonym.

Modele numeryczne (Rys. 7-13) zostały przygotowane z wykorzystaniem elementów skończonych drugiego rzędu z włączoną *formulacją mieszaną u-p*, co pozwoliło poprawnie odwzorować zachowanie materiału o ograniczonej ściśliwości i uniknąć nienaturalnego usztywnienia objętościowego (ANSYS Help: Theory..., 2022). Zastosowana siatka nieliniowa z lokalnym zagęszczeniem w strefach kontaktu umożliwia rejestrację istotnych zmian w polu naprężeń i odkształceń. Wprowadzono także nieliniowe warunki kontaktu między belką, rolkami podporowymi i dociskiem, co umożliwiło odwzorowanie rzeczywistego oddziaływania tarcia oraz lokalnych przemieszczeń. Warunki zbieżności ustalono w oparciu o pełną metodę Newtona-Raphsona z kontrolą sił, przemieszczeń i obrotów, przy tolerancji 0,5 % i wartościach progowych wyznaczanych automatycznie przez *solver*.



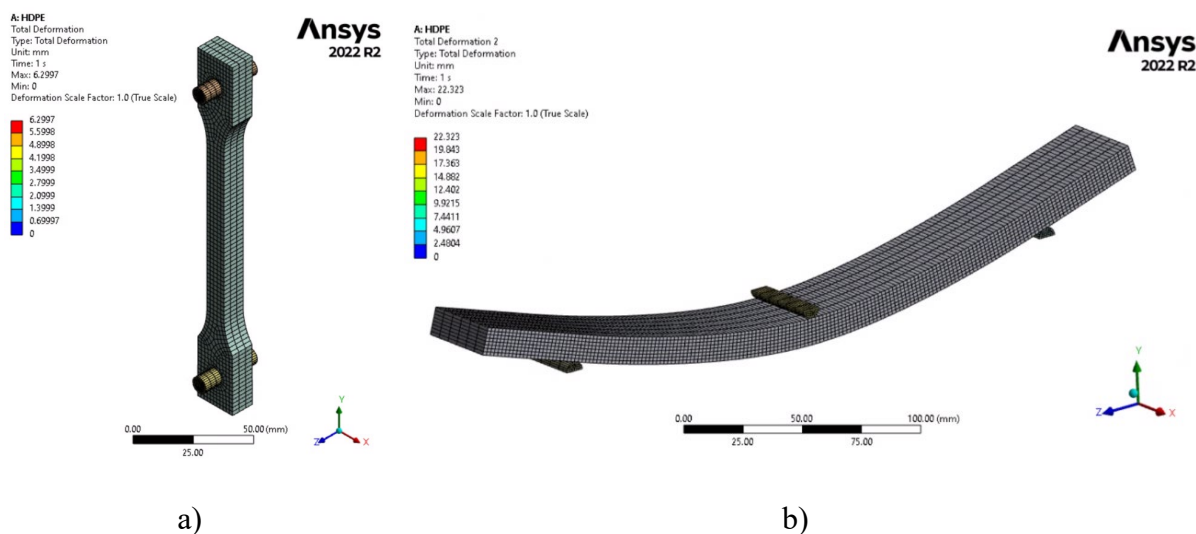
Rys. 7-12 Model CAD próbki a) „wioselka”
b) belki pryzmatycznej, użytych do kalibracji parametrów proponowanego modelu w ANSYS

*Fig. 7-12 CAD model of the a) dog-bone b) prismatic beam specimen,
used to calibrate the model parameters in ANSYS*

W analizie numerycznej zastosowano pojedynczy krok obliczeniowy o czasie końcowym równym 1 s, z automatycznym podziałem na podkroki. Liczba podkroków początkowych została ustalona na 10, przy minimalnej wartości 1 i maksymalnej 20. Obliczenia prowadzono w trybie iteracyjnym, z aktywowaną opcją dużych przemieszczeń. Zbieżność momentów była sterowana automatycznie. Dla zapewnienia stabilności obliczeń wprowadzono liniowe wyszukiwanie oraz *tłumienie numeryczne* w ramach metody stabilizacji, z czynnikiem tłumienia równym $1 \cdot 10^{-4}$ i siłą stabilizującą 0,2. Funkcja aktywacji stabilizacji uruchamiała się wyłącznie w przypadku braku zbieżności. Tak skonfigurowany układ stanowił wiarygodną podstawę do dalszych analiz parametrycznych i kalibracji modelu konstytutywnego.

W pierwszym kroku obliczone zostały próbki z testów jednoosiowego rozciągania, dla których uwzględnione zostały odpowiadające każdej z próbek rozstawy otworów (L_0) oraz średnie szerokości i grubości.

Tabela 7-3 przedstawia zestawienie wydłużeń i odkształceń próbek poddanych pełzaniu jednoosiowemu. Dla każdej próbki, przy określonym naprężeniu początkowym σ_0 , zestawiono wyniki pomiarów z wartościami uzyskanymi z obliczeń MES, gdzie materiał odwzorowano za pomocą krzywej $\sigma - \varepsilon$ ($t=1000h$). Ujęto zarówno wartości wydłużenia ΔL , jak i odkształcenia względnego ε , co umożliwiało weryfikację modelu na dwóch poziomach, zarówno geometrycznym, jak i materiałowym.



Rys. 7-13 Model dyskretny MES próbki a) „wioselka”
b) belki pryzmatycznej, użytych do weryfikacji obliczonych ugięć z wynikami eksperymentalnymi na podstawie proponowanego modelu konstytutywnego

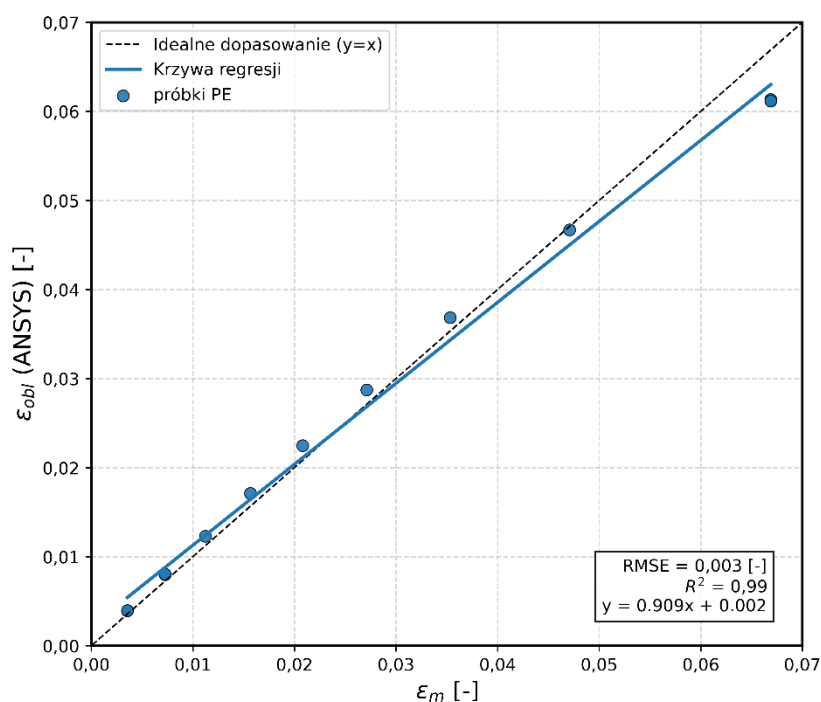
Fig. 7-13 Discrete FEM model of the a) dog-bone b) prismatic specimen used to verify calculated deflections against experimental results based on the proposed constitutive model

Tabela 7-3 Zestawienie wyników obliczeń MES wydłużenia i odkształcenia próbek poddanych pełzaniu przy rozciąganiu oraz porównanie z wynikami badań eksperymentalnych w chwili czasowej 1000h

Table 7-3 Summary of comparison of FEM-calculated elongation and strain for tensile creep test with experimental results at 1000h

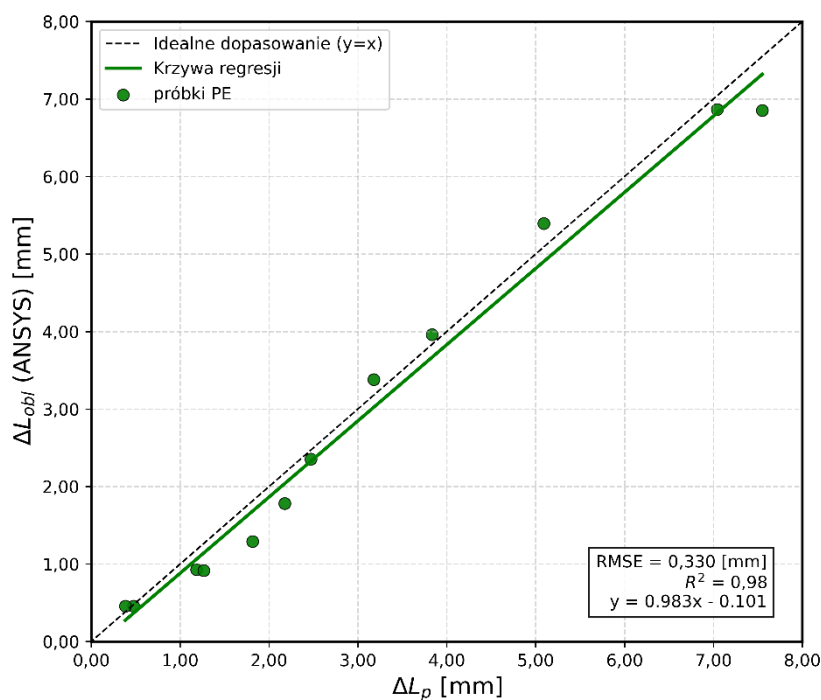
Oznaczenie	Napężenie początkowe σ_0 [MPa]	Wydłużenie pomierzone ΔL_p [mm]	Wydłużenie obliczone ΔL_{obl} [mm]	Różnica [mm]	Odkształcenie model konst. ϵ_m [-]	Odkształcenie obliczone ϵ_{obl} [-]	Różnica [-]
2_e5_05	1	-0,48	-0,46	-0,02	0,004	0,004	-0,0004
2_e6_05	1	-0,38	-0,46	0,07	0,004	0,004	-0,0004
2_e5_06	2	-1,18	-0,93	-0,26	0,007	0,008	-0,0008
2_e6_06	2	-1,27	-0,91	-0,35	0,007	0,008	-0,0008
2_e4_06	3	-1,81	-1,29	-0,52	0,011	0,012	-0,0011
2_e6_04	4	-2,18	-1,78	-0,40	0,016	0,017	-0,0014
D_e4_08	5	-2,47	-2,35	-0,12	0,021	0,022	-0,0017
2_e4_05	6	-3,18	-3,38	0,20	0,027	0,029	-0,0016
D_e4_07	7	-3,83	-3,96	0,13	0,035	0,037	-0,0015
2_e4_07	8	-5,09	-5,39	0,30	0,047	0,047	0,0004
2_e5_07	9	-7,55	-6,85	-0,70	0,067	0,061	0,0056
2_e6_07	9	-7,04	-6,86	-0,18	0,067	0,061	0,0057

Dla małych naprężeń początkowych ($\sigma_0 = 1-3$ MPa) rozbieżności pomiędzy wartościami doświadczalnymi i numerycznymi są niewielkie i mieszczą się w zakresie setnych części milimetra w wydłużeniu oraz tysięcznych części mm w odkształceniu. Model dobrze odwzorowuje charakter powolnego, quasi-liniowego wzrostu deformacji w czasie, a różnice są zarówno dodatnie i ujemne, co świadczy o braku systematycznego błędu. Wraz ze wzrostem σ_0 do 4-7 MPa pojawiają się nieznacznie większe odchylenia, jednak nadal utrzymują się one w granicach akceptowalnych w obliczeniach inżynierskich. Na Rys. 7-15 porównano wartości wydłużeń obliczonych numerycznie i pomierzonych doświadczalnie po 1000 godzinach. Obserwuje się bardzo dobrą zgodność wydłużeń w szerokim zakresie naprężeń, co potwierdza, że różnice widoczne w Tabeli 7-3 nie mają charakteru systematycznego. Wyniki wykazują się tendencją do niedoszacowania wydłużenia obliczonego za pomocą MES (ujemne różnice w ΔL), przy równoczesnym zachowaniu bardzo dobrej zgodności w wartościach ε . W strefie dużych naprężeń ($\sigma_0 \approx 9$ MPa) rozbieżności przybierają bardziej wyraźny charakter (Rys. 7-14). W przypadku próbek 2_e5_07 i 2_e6_07 wydłużenia wyznaczone metodą MES są mniejsze od wydłużeń wyznaczonych eksperymentalnie (różnice ΔL rzędu $-0,7$ mm i $-0,18$ mm). Jednocześnie obliczone odkształcenia ε są nieznacznie większe od pomierzonych (różnice dodatnie, ok. $+0,0056-0,0057$). Krzywa regresji liniowej wskazuje na bardzo dobre dopasowanie ($R^2=0,99$), a błąd RMSE odkształceń obliczonych do wyznaczonych z modelu wynosi 0,003. Drobne rozbieżności, widoczne zwłaszcza w próbkach obciążonych skrajnymi wartościami naprężenia, można wiązać z niejednorodnością przekroju próbek oraz czułością pomiarów przemieszczeń. W istocie, największe różnice pojawiają się w strefie 9 MPa, co dobrze koresponduje z wcześniejszymi obserwacjami dotyczącymi odkształceń. Ogólny obraz dopasowania potwierdza, że model pozwala prognozować rzeczywiste przemieszczenia geometryczne próbek. Poziom dopasowania krzywej regresji wynosi $R^2=0,98$ przy błędzie RMSE równym 0,33 mm.



Rys. 7-14 Wykres korelacyjny: odkształcenie obliczone (MES) w funkcji odkształcenia pomierzonego, uzyskanego z badań eksperymentalnych pełzania przy rozciąganiu w chwili czasowej 1000h

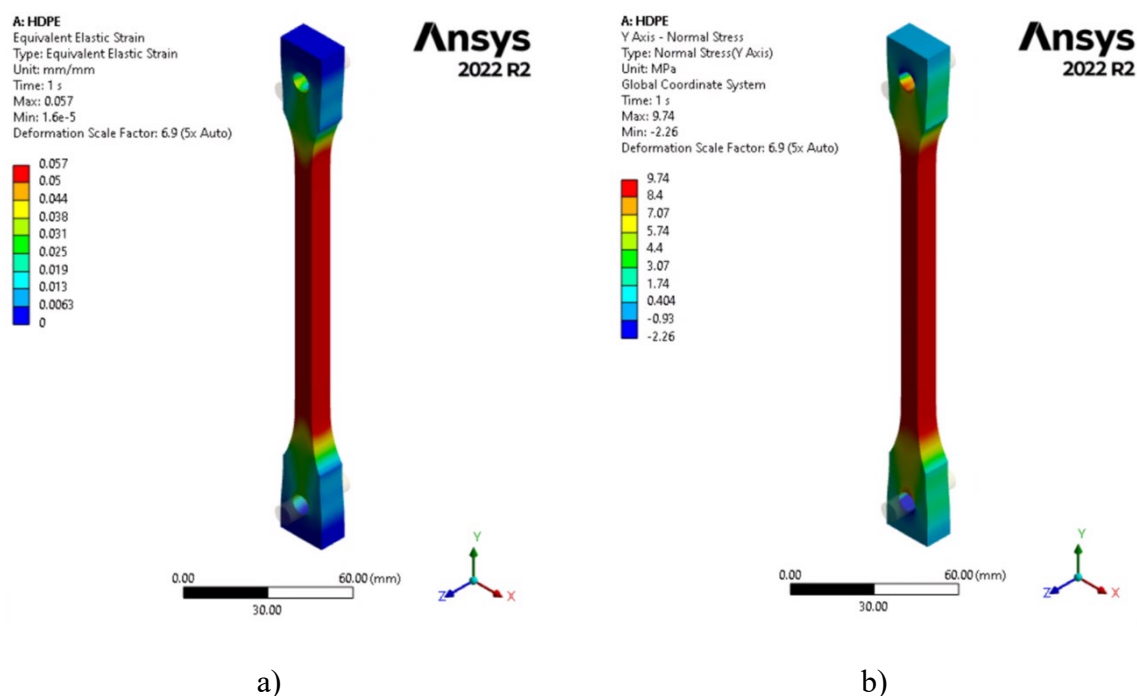
Fig. 7-14 Correlation plot: FEM-calculated strain as a function of experimentally measured creep strain at 1000h



Rys. 7-15 Wykres korelacyjny: wydłużenie obliczone (MES) w funkcji wydłużenia pomierzonego, uzyskanego z badań eksperymentalnych pełzania przy rozciąganiu w chwili czasowej 1000h

Fig. 7-15 Correlation plot: FEM-calculated strain as a function of experimentally measured creep strain at 1000h

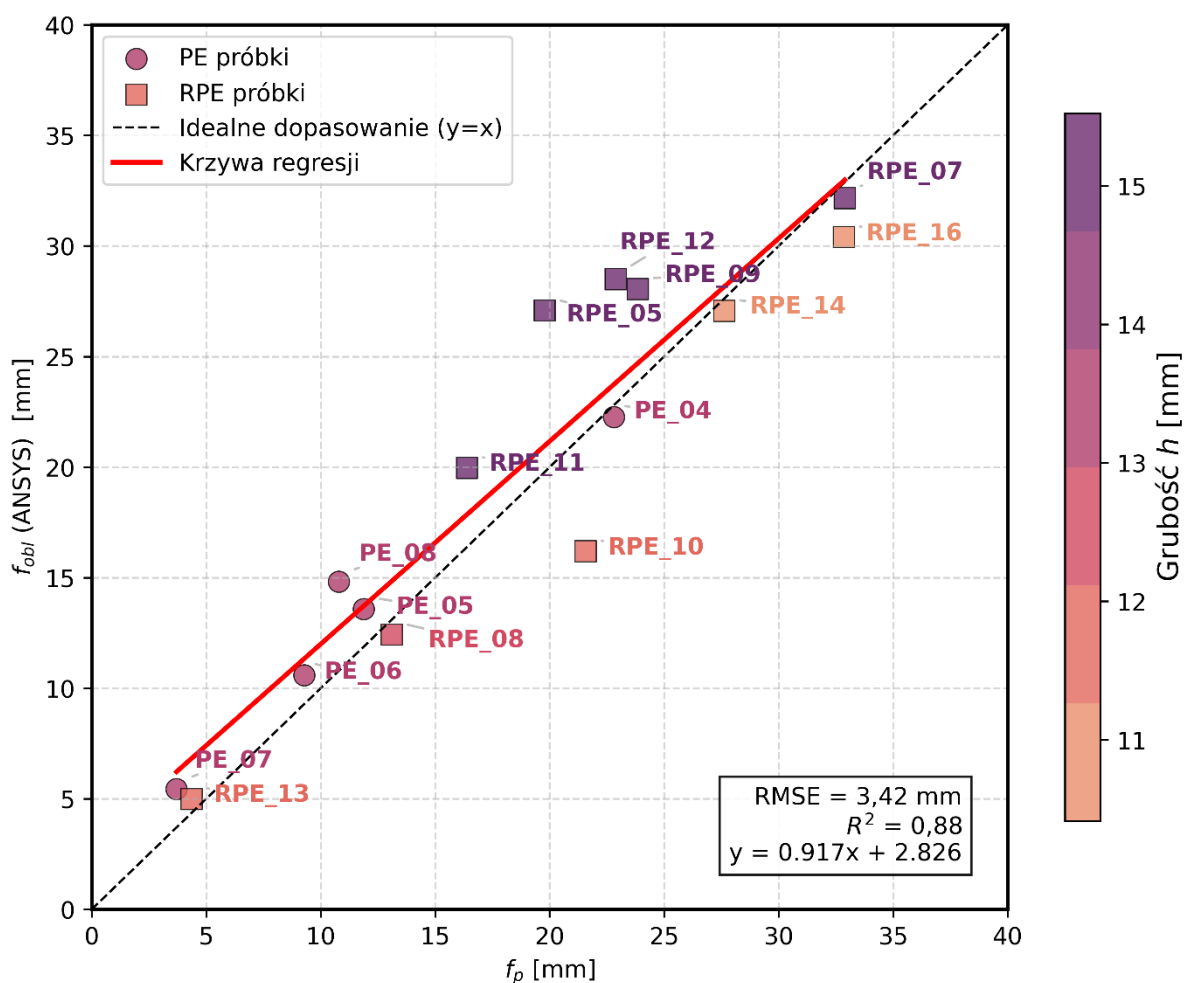
Rysunek 7-16 prezentuje przykładowe pola odkształceń i naprężeń w próbce poddanej naprężeniu początkowemu $\sigma_0 = 9$ MPa. Skala deformacji na rysunkach została celowo wzmocniona pięciokrotnie, aby lepiej uwidocznić rozkłady w materiale oraz charakter deformacji próbki.



Rys. 7-16 Wyniki obliczeń MES dla próbki 2_e5_07 (9MPa): a) odkształcenia b) naprężenia normalne. Skala skażona (5x)

Fig. 7-16 FEM results for specimen 2_e5_07 (9 MPa): a) strains, b) normal stresses. Scale exaggerated (5x)

W kolejnym etapie przeprowadzono obliczenia próbek zginanych, których model geometryczny oraz warunki brzegowe odpowiadały rzeczywistym układom badawczym. Dla każdej z belek przyjęto rzeczywiste wymiary przekroju poprzecznego oraz rozstaw podpór, co umożliwiło bezpośrednie porównanie wartości ugięć uzyskanych w analizie numerycznej z wynikami pomiarów doświadczalnych. Wykres korelacyjny (Rys. 7-17) przedstawia zestawienie wartości ugięć belek zginanych uzyskanych w obliczeniach MES i pomiarach eksperymentalnych po 1000 godzinach. Punkty w dużej mierze układają się wzdłuż linii idealnej zgodności, co potwierdza skuteczność metody także w złożonym stanie naprężenia. Wyjątkiem są próbki o najmniejszej i największej grubości h , gdzie różnice między wartościami obliczonymi i pomierzonymi są największe, co prowadzi do niedoszacowania lub przeszacowania ugięcia o kilkanaście procent. W konsekwencji, mimo dobrej globalnej zgodności, pewna grupa przypadków wskazuje na konieczność rozwinięcia modelu konstytutywnego.



Rys. 7-17 Wykres korelacyjny: ugięcie obliczone (MES) w funkcji ugięcia pomierzonego, uzyskanego z badań eksperymentalnych pełzania przy zginaniu w chwili czasowej 1000h

Fig. 7-17 Correlation plot: FEM-calculated deflection as a function of experimentally measured creep deflection in bending at 1000h

Tabela 7-4 przedstawia porównanie ugięć belek pryzmatycznych wyznaczonych numerycznie i zmierzonych doświadczalnie po 1000h pełzania. Uwzględniono zarówno grubość próbek, jak i wartość naprężenia początkowego σ_0 . Zestawiono także dodatkowe wielkości: naprężenia skrajne ($\sigma(-) / \sigma(+)$) oraz średnie odkształcenie ε .

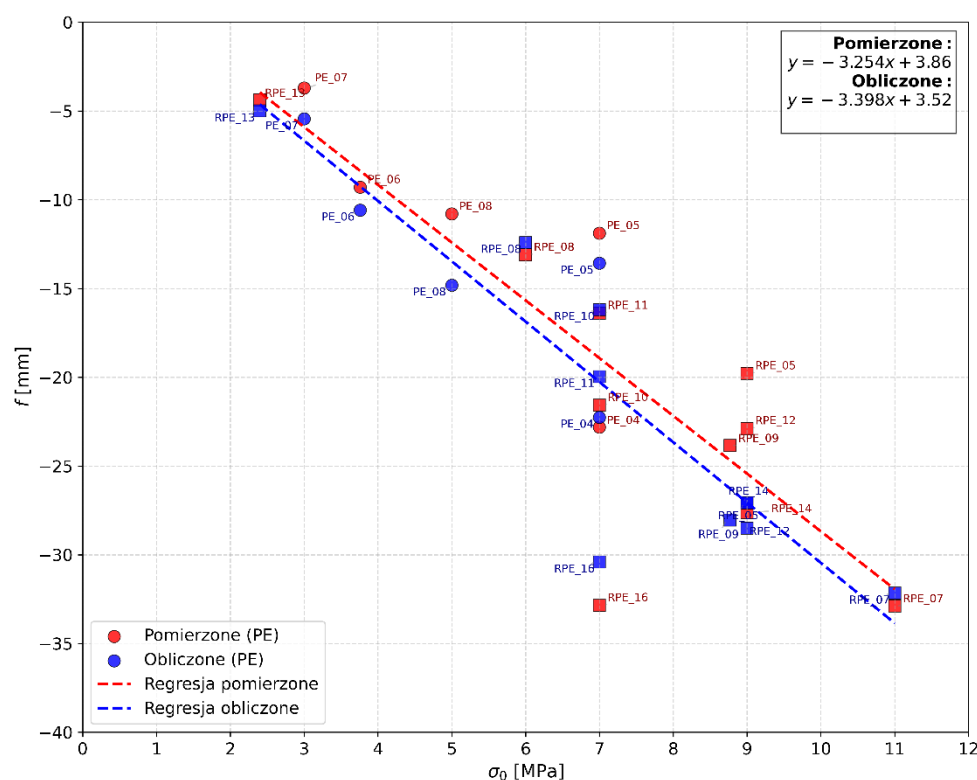
Tabela 7-4 Zestawienie wyników obliczeń MES ugięcia belek zginanych oraz porównanie z wynikami badań eksperymentalnych w chwili czasowej 1000h

Table 7-4 Summary of comparison of FEM-calculated deflections of bending beams with experimental results at 1000h

Oznaczenie	Typ	Grubość h [mm]	Napężenie początkowe σ_0 [MPa]	Ugięcie f pomierzone [mm]	Ugięcie f obliczone [mm]	Różnica [mm]	Napężenie σ (-) [MPa]	Napężenie σ (+) [MPa]	Odształcenie ε [-]
RPE_13	RPE	11,72	2,4	-4,37	-4,99	-0,62	-2,62	2,29	0,008
PE_07	PE	13,61	3,0	-3,71	-5,44	-1,73	-3,38	2,88	0,011
PE_06	PE	13,78	3,8	-9,29	-10,59	-1,30	-4,15	3,58	0,014
PE_08	PE	13,42	5,0	-10,80	-14,81	-4,02	-5,52	4,68	0,020
RPE_08	RPE	12,56	6,0	-13,11	-12,42	0,69	-6,57	5,50	0,025
PE_04	PE	13,45	7,0	-22,81	-22,26	0,55	-7,57	6,43	0,032
PE_05	PE	13,72	7,0	-11,89	-13,58	-1,69	-7,87	6,40	0,031
RPE_10	RPE	11,58	7,0	-21,57	-16,20	5,37	-7,68	6,41	0,031
RPE_11	RPE	14,79	7,0	-16,39	-19,97	-3,58	-7,99	6,50	0,033
RPE_16	RPE	10,44	7,0	-32,85	-30,40	2,45	-7,89	6,72	0,034
RPE_09	RPE	14,67	8,8	-23,85	-28,05	-4,20	-9,71	8,03	0,048
RPE_05	RPE	15,52	9,0	-19,79	-27,08	-7,30	-10,32	8,27	0,051
RPE_12	RPE	14,95	9,0	-22,88	-28,50	-5,62	-10,31	8,31	0,051
RPE_14	RPE	10,41	9,0	-27,62	-27,06	0,56	-10,16	8,39	0,050
RPE_07	RPE	14,99	11,0	-32,88	-32,16	0,72	-13,49	12,12	0,040

W zakresie małych naprężeń ($\sigma_0 = 2,4-3,8$ MPa) zgodność obliczeń i pomiarów jest bardzo dobra, różnice ugięć mieszczą się w granicach 0,5-1,7 mm. Wskazuje to, że w obszarze, gdzie pełzanie ma charakter umiarkowanie liniowy, model zapewnia adekwatne odwzorowanie efektów długotrwałego obciążenia. Przy większych obciążeniach ($\sigma_0 = 5-7$ MPa) pojawiają się bardziej zróżnicowane rozbieżności. W niektórych przypadkach MES zaniża ugięcie (np. PE_08: różnica $-4,02$ mm), w innych natomiast je zawyża (np. RPE_10: różnica $+5,37$ mm). Rozrzut ten wyraźnie koreluje z geometrią próbek, zwłaszcza z grubością h : cieńsze belki, wykazują większe ugięcia niż prognozuje model. Średni błąd względny ugięć uzyskanych z modelu w stosunku do wartości ugięć pomierzonych w testach wynosi ok. 18 %.

Na Rys. 7-18 przedstawiono zależność ugięcia od wartości naprężenia początkowego σ_0 , zestawiając wyniki obliczeń i eksperymentu.



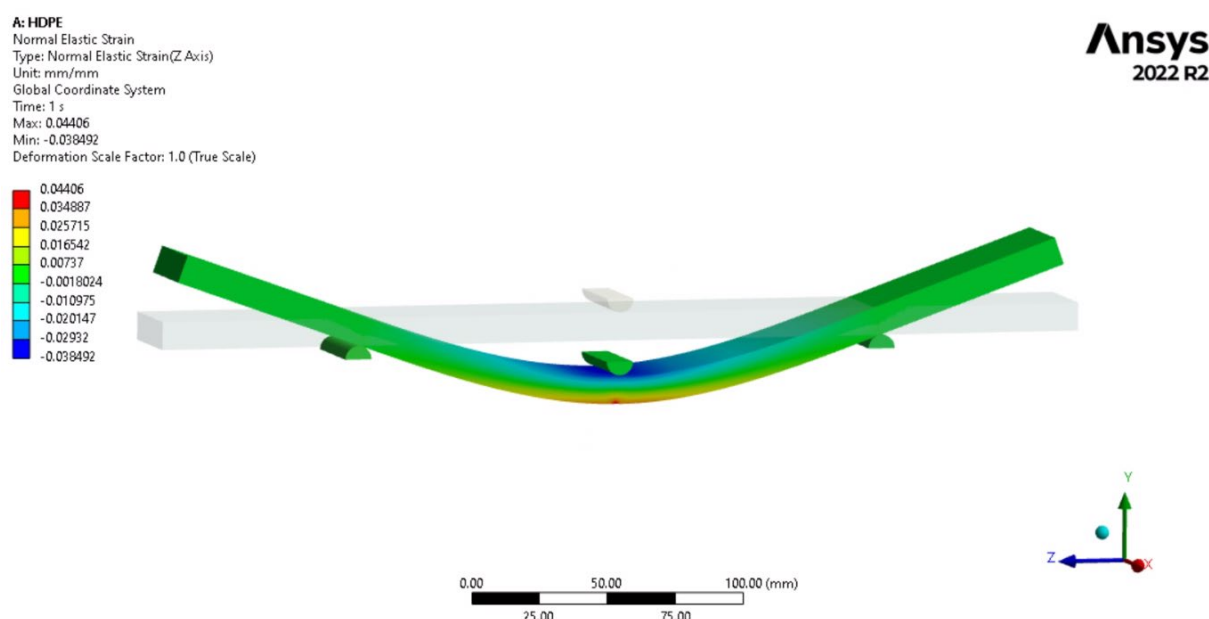
Rys. 7-18 Zależność wyników ugięcia uzyskanych z obliczeń MES z wynikami badań eksperymentalnych pełzania przy zginaniu w chwili czasowej 1000h w funkcji naprężenia początkowego

Fig. 7-18 Relationship between FEM-calculated deflections and experimental creep bending results at 1000h as a function of initial stress

Dla małych wartości σ_0 krzywe są do siebie zbliżone, jednak wraz ze wzrostem obciążenia pojawia się systematyczne odchylenie: obliczone ugięcia są coraz bardziej

rozbieżne od zmierzonych, a rozrzut rośnie szczególnie powyżej naprężeń początkowych 7-8 MPa. Tendencja ta jednoznacznie wskazuje, że wraz z przyrostem obciążenia zwiększa się rola zjawisk nieliniowych. Szczególnie istotne są tu efekty zależne od grubości próbek.

Na Rys. 7-19 pokazano przykładowy rozkład odkształceń w belce zginanej (próbka RPE_14) uzyskany w obliczeniach MES po 1000 godzinach. Wyraźnie widać duże zróżnicowanie odkształceń na kierunku pionowym przekroju – maksymalne odkształcenia koncentrują się przy włóknach rozciąganych i ściskanych, podczas gdy w pobliżu osi obojętnej odkształcenia są minimalne.



Rys. 7-19 Wyniki odkształceń belki zginanej uzyskanych z obliczeń MES: próbka RPE_14 w chwili czasowej 1000h

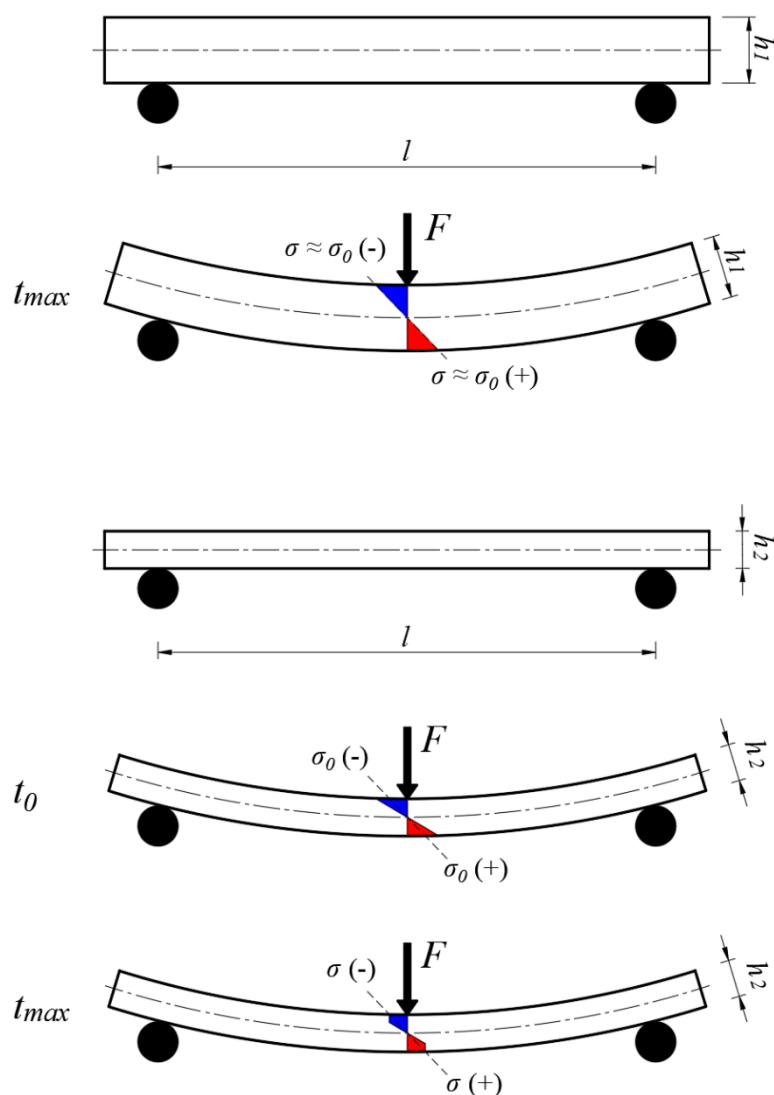
Fig. 7-19 Bending-beam strain results from FEM: specimen RPE_14 at 1000 h

Użycie krzywej $\sigma - \varepsilon$ przy 1000h do modelu umożliwiło uzyskanie przemieszczeń (ugięć) belek z obliczeń numerycznych zbliżonych do ugięć rzeczywistych, co pozwoliło na ominięcie trudności związanych z bezpośrednim modelowaniem zjawisk reologicznych (lepkosprężystości) w symulacji. Uzyskane zgodności wyników obliczeń z wynikami eksperymentu pozwalają stwierdzić, że zastosowany model konstytutywny (7.1) poprawnie prognozuje ugięcia elementów z HDPE w warunkach długotrwałego obciążenia na podstawie odkształceń z obliczonej 1000-godzinnej krzywej pełzania, z zastrzeżeniem, że dla próbek o mniejszych grubościach (np. RPE_16) nie wyznacza prawidłowo maksymalnego ugięcia. Zaniżone wartości ugięcia mogą świadczyć o nieuwzględnieniu zjawiska degradacji materiału pod wpływem zwiększonego gradientu naprężeń.

7.5. Zjawisko zmiany gradientu naprężeń

W przeprowadzonych próbach pełzania w układzie trójpunktowego zginania belek z HDPE przy tych samych wartościach naprężenia początkowego i rozstawie podpór, lecz o różnych grubościach, zaobserwowano systematyczne przyspieszenie degradacji materiału wraz ze zmniejszaniem grubości przekroju. Objawiało się to szybszym narastaniem ugięcia w czasie, wcześniejszym wejściem w stan nieliniowy oraz wyraźniejszym obniżaniem sztywności zginania. Zjawisko to zostało również uwidocznione w obliczeniach numerycznych, gdzie model nie doszacował wartości ugięcia belek zginanych dla próbek o mniejszej grubości h (Rys. 7-17).

Jednocześnie rozkład naprężeń ze względu na zróżnicowaną grubość pozostaje silnie niejednorodny: na jednej powierzchni dominuje rozciąganie, na przeciwległej – ściskanie, a w okolicy osi obojętnej naprężenia normalne zanikają. To niejednorodne pole naprężeń, a ściślej jego gradient, może więc być uznawany za jeden z głównych czynników inicjujących nadmierne pełzanie i przyspieszoną utratę nośności HDPE. Polietylen HDPE przy rozciąganiu wykazuje łatwiejszą aktywację mechanizmów degradacyjnych (np. poślizg lamel i rozrywanie wiązań) niż przy ścisaniu. Przy zginaniu naprężenia rozciągające i ściskające współlistnieją w niewielkiej odległości, co generuje duże gradienty odkształceń i lokalne pola ścinania w okolicy osi obojętnej (Rys. 7-20). W odróżnieniu od rozciągania jednoosiowego, gdzie gradient naprężeń $\nabla\sigma \approx 0$, obecność gradientu naprężeń prowadzi do nierównomiernej aktywacji mechanizmów lepkosprężystych i uszkodzeniowych, przyspieszając degradację w strefach przypowierzchniowych. Im większy jest gradient $\nabla\sigma = \partial\sigma/\partial y$ (liczony przyjmując oś y prostopadłą do płaszczyzny przekroju i skierowaną od osi obojętnej ku powierzchni rozciąganej), tym większe są niekompatybilności odkształceń między strefą rozciąganą i ścisakaną, co przyspiesza mikro-uszkodzenia i uplastycznienie reologiczne. Przyspieszenie pełzania w belkach o mniejszej grubości wynika nie tylko z większego naprężenia powierzchniowego, lecz z samej wartości gradientu naprężeń $\nabla\sigma$, który intensyfikuje lokalne procesy uszkodzeń i prowadzi do szybciej postępującej utraty sztywności.



Rys. 7-20 Schemat trójpunktowego zginania belki z tworzywa HDPE, ilustrujący wpływ grubości przekroju na gradient naprężeń (rozciągających i ściskających) oraz jego związek z intensyfikacją procesów degradacji materiału (h_1 , h_2 to grubości belki, l to rozpiętość belki, przerywana linia to gradient naprężeń belki o grubości h_1)

Fig. 7-20 Three-point-bending scheme of an HDPE beam illustrating how cross-section thickness (h_1 , h_2) influences the tensile-compressive stress gradient and its link to accelerated material degradation processes (l – beam span, dashed line – gradient of stress for beam with thickness h_1)

W dalszych badaniach nad udoskonaleniem modelu konstytutywnego, zasadne jest więc wprowadzenie bezwymiarowego parametru gradientu jako dodatkowej zmiennej sterującej odpowiedzią materiału, zależną od grubości h oraz naprężenia maksymalnego σ_{max} . Ponieważ ten gradient jednak nie jest możliwy do uwzględnienia bezpośrednio w jednej relacji krzywej $\sigma - \varepsilon$, niemożliwe jest dalsze bezpośrednie wykorzystywanie modelu Response Function i modeli podobnych w pakietach obliczeniowych MES bez rozszerzenia ich o parametr zależny od pola gradientu.

7.6. Podsumowanie

Ze względu na trwałość oraz bezpieczeństwo, w rzeczywistych konstrukcjach materiał nie powinien ulegać odkształceniom przekraczającym 6-9 %, co odpowiada naprężeniom normalnym (przy rozciąganiu) równym ok. 8 MPa. Wartości te są zgodne z zaleceniami m. in norm niemieckich dla polietylenu (*DIN 8075*, 1999). Dokładność prognoz opartych na modelach matematycznych w największym stopniu zależy od precyzyjnego wyznaczenia wartości σ_{max} . Pozostałe parametry, w większości standardowych zastosowań można uznać za drugorzędne. Kluczowy jest wybór modelu w celu właściwego odwzorowania pracy konstrukcji zgodnie z jej przeznaczeniem oraz wzajemnego oddziaływania z obiektami sąsiednimi. Możliwość udoskonalenia zaproponowanego modelu materiałowego upatruje się przede wszystkim w sparametryzowaniu stałej σ_{max} . Wyniki badań wskazują na zdolność materiału do wzmocnienia pod wpływem rozwoju odkształcenia. Wymaga to jednak przeprowadzenia szczegółowych badań z użyciem aparatury i procedur badawczych gwarantujących wysoką jakość wyników, niedostępnych w badaniach zrealizowanych w ramach pracy. Dalszych analiz wymaga zagadnienie niejednorodności materiału oraz efekt pamięci obciążenia, to jest czynników kształtujących trajektorię rozwoju odkształceń w czasie i zakres zmian odpowiedzi na obciążenia cykliczne.

Zestawienie parametrów modelu wyznaczonych na podstawie danych eksperymentalnych wskazuje na wyraźną niejednorodność analizowanej partii materiału. Dlatego przy dalszej implementacji modelu do zastosowań praktycznych warto uwzględnić obszerniejszą bazę danych eksperymentalnych, by zwiększyć odporność wyników na pojedyncze, nietypowe odchylenia i uzyskać bardziej reprezentatywny, ogólniejszy obraz właściwości HDPE ujawniający się pod wpływem długotrwałego obciążenia. Jednocześnie wyniki walidacji modelu konstytutywnego, oparte na danych eksperymentalnych, wskazują, że model może poprawnie prognozować długookresowe odkształcenia HDPE, a zaproponowana procedura obliczeniowa umożliwia jego praktyczne zastosowanie do wyznaczania docelowych przemieszczeń konstrukcji w okresie jej użytkowania.

Na podstawie analizy długookresowych, siecznych modułów odkształcenia można stwierdzić, że wyznaczanie średniego modułu odkształcenia z populacji testów o różnych wartościach naprężenia początkowego będzie skutkować znaczącym zawyżeniem wartości modułu dla naprężeń granicznych. W konsekwencji będzie to skutkować niedoszacowaniem deformacji elementów konstrukcyjnych poddanych obciążeniom bliskim granicznemu, na które konstrukcje są wymiarowane. Podczas projektowania z zastosowaniem modułu

siecznego należy jego wartość uzależnić od wartości naprężenia początkowego, lub przyjmować moduł odkształcenia wyznaczony przy granicznym naprężeniu początkowym (np. 7-8 MPa).

Zastosowanie granicznej krzywej $\sigma - \varepsilon$ ($t \rightarrow \infty$) w symulacji statycznej pozwala uzyskać rezultat długotrwałego pełzania bez jawnego modelowania upływu czasu oraz pominąć konieczności ustalania długookresowego, siecznego modułu odkształcenia. Podejście to jest uzasadnione w przypadku, gdy poszukiwany jest wyłącznie stan odkształcenia w określonym horyzoncie czasowym, a nie przebieg dochodzenia do tego stanu. W literaturze podkreśla się, że przy stałym obciążeniu możliwe jest zastąpienie rzeczywistego modelu lepkosprężystego odpowiednio dobranym modelem pseudosprężystym – otrzymując poprawne odkształcenia w wybranej chwili czasu, przy zachowaniu należytej ostrożności przy uogólnianiu takiego podejścia. W szczególności, jeśli w wymiarowanym elemencie występuje silnie niejednorodny rozkład naprężeń, zwłaszcza wykraczający poza zakres, w którym związki konstytutywne mogą być traktowane jako liniowe, wykorzystanie pojedynczej krzywej $\sigma - \varepsilon$ może wymagać podziału materiału na strefy lub użycia zaawansowanego modelu zależnego od stanu naprężenia. W przypadku rozpatrywanym w pracy wartości naprężeń w belce mieściły się w zakresie, w którym krzywa $\sigma - \varepsilon$ została w całości wyznaczona eksperymentalnie, więc model poprawnie odwzorował deformacje w całej populacji badanych próbek. Jednak w przypadku próbek o mniejszej grubości, w symulacjach zginania wyznaczał zaniżone wartości ugięć, co może wskazywać, że w pewnych warunkach nie jest w stanie poprawnie odwzorować tego zjawiska. Powodem może być opisany już wcześniej parametr naprężenia granicznego, który wykazuje zmianę wartości w zależności od wartości obciążenia, a więc model nie uwzględnia zjawiska ewentualnego umocnienia i osłabienia materiału. Kolejnym powodem mogą być kwestie związane z przygotowaniem modelu numerycznego, np. niewystarczające zagęszczenie siatki elementów skończonych w strefach kontaktu.

Proponowany model konstytutywny umożliwia ilościową prognozę długotrwałych deformacji HDPE przy różnych poziomach obciążeń, poprawnie odwzorowując zarówno stabilny, jak i przyspieszony reżim pełzania. Zróżnicowanie parametrów między próbkami wskazuje na potrzebę dalszych badań nad jednorodnością materiału i wpływem procesu wytwórczego końcowego produktu. Model, mimo uproszczeń względem literaturowych modeli fizycznych, stanowi interesującą propozycję, która posiada zdolność do zastosowań praktycznych: uwzględnia nieliniowe mechanizmy odpowiedzi, pozwala prognozować odkształcenia graniczne i może być używany w analizach numerycznych. W odróżnieniu

od proponowanego modelu materiałowego z rozdziału 6 oraz wybranych modeli literaturowych, ma charakter reologiczno-konstrytywny i umożliwia praktyczne wyznaczanie parametrów użytkowych materiału do projektowania konstrukcji.

8. Wnioski, kierunki dalszych badań i podsumowanie pracy

8.1. Wnioski ogólne

- 1) Długookresowe odkształcenia bezciśnieniowych zbiorników podziemnych z polietylenu o dużej gęstości (HDPE) zależą nie tylko od właściwości materiału, lecz także od warunków gruntowo-wodnych, doboru i wykonania zasypki, jakości robót ziemnych, poprawności i szczelności połączeń oraz staranności montażu, to jest warunków współdecydujących o trajektorii rozwoju odkształceń; w związku z tym wymagają właściwej, bieżącej kontroli deformacji i odpowiedniego monitoringu stanu technicznego.
- 2) Efektywne wykorzystanie zdolności HDPE do przenoszenia dużych odkształceń jest możliwe przy ograniczeniu prędkości przyrostu obciążenia. Właściwie zaprojektowane i eksploatowane zbiorniki podziemne mogą zapewniać wysoką trwałość, szczelność i niezawodność oraz niższe koszty utrzymania względem rozwiązań z materiałów tradycyjnych, co uzasadnia ich stosowanie, zwłaszcza w obszarach silnie zurbanizowanych i trudno dostępnych.
- 3) Elementy i systemy wykonane z HDPE, stosowane w infrastrukturze podziemnej, mimo małej masy i wysokiej odporności na korozję, z uwagi na pełzanie wymagają indywidualnego podejścia do projektowania oraz analizy współpracy z gruntem. Współpraca z gruntem stwarza możliwości optymalizacji zasad ustalania niezbędnej nośności elementów konstrukcyjnych z HDPE, jednak wymaga to dalszych analiz i potwierdzenia za pomocą obserwacji obiektów rzeczywistych i odpowiednio zaprogramowanych badań terenowych.
- 4) Naprężenia początkowe mają wyraźny wpływ na przebieg procesu pełzania; przy większych wartościach naprężeń, mimo ograniczonego, a nawet niewielkiego ryzyka zniszczenia, odkształcenia rozwijają się w sposób wyraźnie nieliniowy, co wymaga uwzględnienia w metodyce projektowania (wymiarowania) konstrukcji HDPE eksploatowanych długoterminowo.
- 5) Na podstawie uzyskanych wyników potwierdzono konieczność uwzględniania w projektowaniu konstrukcji z HDPE o wieloletnim okresie eksploatacji wpływu czasu działania obciążenia na wytrzymałość materiału oraz związanej z tym długookresowej redukcji sztywności.

- 6) Smukłość próbek wpływa na podatność na pełzanie HDPE w związku z nierównomiernym rozkładem naprężeń w przekroju. Przy większej smukłości gradient naprężeń między strefami rozciąganymi i ściskanymi sprzyja szybszemu rozwojowi pełzania w obszarach najbardziej obciążonych.
- 7) W pewnym zakresie odkształceń naprężenie graniczne σ_{max} osiąga wartość bliską ustalonej, zaś przy mniejszych wartościach naprężenia początkowego σ_0 może przyjmować wartość proporcjonalną do odkształcenia (zjawisko umocnienia). Dokładność aparatury pomiarowej oraz rozrzuty estymat parametrów modelu nie pozwalają jednak na weryfikację tej hipotezy na oczekiwanym poziomie wiarygodności.
- 8) Badania wytrzymałościowe i mikroskopowe HDPE wykluczają ryzyko kruchego pęknięcia oraz potwierdzają wysoką tolerancję na odkształcenia bez utraty ciągłości elementu. Wskazuje to na możliwość efektywnego wykorzystania materiału w konstrukcjach podziemnych współpracujących z ośrodkiem gruntowym, przy uwzględnieniu silnej zależności odpowiedzi materiału na obciążenie od prędkości narastania naprężenia.
- 9) Na podstawie przeprowadzonych badań nie stwierdzono istotnych różnic we właściwościach pełzania między surowcem (polietylenem) z recyklingu (RPE) a pierwotnym (PE), co wskazuje na możliwość zastosowań inżynierskich bez wyraźnego ryzyka pogorszenia właściwości mechanicznych odpowiadających za podatność na pełzanie; wskazana jest jednak dalsza weryfikacja ww. hipotezy na większej próbie badawczej.
- 10) Zgodność wyników analizy MES ściskania dennic z wynikami eksperymentu laboratoryjnego potwierdza zasadność stosowania metody analizy wstecz do szacowania krótkookresowego modułu odkształcenia „od dołu” z dokładnością rzędu 1-2 %.
- 11) Klasyczne, liniowe modele reologiczne nie opisują pełzania HDPE w sposób zgodny z obserwacją, zarówno w znaczeniu ilościowym, jak i jakościowym. Bardziej użyteczne okazują się modele nieliniowe i empiryczne (np. Findleya, Hadida), natomiast modele fizyczne i hybrydowe cechują się wysoką zdolnością prognostyczną kosztem złożoności obliczeniowej, co w praktyce sprzyja poszukiwaniu kompromisów i podejść łączonych.

- 12) Proponowany hybrydowy model materiałowy umożliwia predykcję maksymalnych odkształceń na poziomie dokładności modeli literaturowych, a ponadto poprawnie odwzorowuje odkształcenia materiału w III stadium pełzania, co potwierdza jego użyteczność praktyczną i przydatność do prognozowania całkowitego odkształcenia na podstawie badań krótkookresowych w szerszym zakresie naprężeń niż modele potęgowe i wykładnicze. Dla potwierdzenia uniwersalności, określenia zakresu stosowalności w praktyce inżynierskiej i pełnej kalibracji zaproponowanego modelu materiałowego niezbędne są dalsze badania na szerszym zbiorze danych i w zróżnicowanych warunkach obciążeń.
- 13) Proponowany model konstytutywny może znaleźć zastosowanie w projektowaniu konstrukcji z HDPE z uwzględnieniem zjawiska pełzania. Pozwala na wyznaczenie krzywych izochronowych naprężenie-odkształcenie niezbędnych do wymiarowania elementów, prognozowania długotrwałych deformacji i oceny wystąpienia stanów granicznych użytkowalności konstrukcji z polietylenu o dużej gęstości na podstawie wyników badań laboratoryjnych. Ze względu na weryfikację przeprowadzoną na niewielkim zbiorze danych doświadczalnych konieczne jest powtórzenie badań na większej próbie badawczej, oszacowanie naturalnej zmienności współczynników (niejednorodności materiału), doprecyzowanie ograniczeń i zakresu stosowalności modelu oraz uzupełnienie programu o badania pełzania przy ściskaniu, które jednoznacznie potwierdzą przydatność modelu do zastosowania w praktyce inżynierskiej.

8.2. Wnioski szczegółowe

- 1) Na podstawie testów niszczących przy jednoosiowym rozciąganiu określono wartość dopuszczalną naprężenia rozciągającego równą 12 MPa.
- 2) Maksymalne krótkookresowe naprężenia normalne przy badaniu ściskania wyniosły 25 MPa przy maksymalnej wartości odkształcenia podłużnego równego ok. 10 %.
- 3) Wartości podatności uzyskane z badań pełzania przy zginaniu i przy rozciąganiu HDPE są porównywalne: przy trójpunktowym zginaniu wynosiły $J(t_{max}) = 2,69-9,66 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ przy średniej wartości $4,62 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$, oraz medianie równej $4,10 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$, a przy jednoosiowym rozciąganiu $J(t_{max}) = 3,40-10,45 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ przy średniej wartości $5,62 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$, oraz medianie równej $5,13 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$. W ujęciu względnym podatność na pełzanie przy rozciąganiu jest większa

od podatności określonej przy zginaniu: średnia o 21,6 % a mediana o 25,1 %. Różnica pomiędzy minimalnymi wartościami stanowi 26,4 %, a pomiędzy wartościami maksymalnymi jest mniejsza i wynosi 8,2 %.

- 4) Smukłość próbek zginanych zwiększa podatność na pełzanie ze względu na gradient naprężeń wzdłuż osi prostopadłej do osi obojętnej przekroju próbki.
- 5) Na podstawie analizy numerycznej badań krótkookresowego ściskania dennic ustalono, że rzeczywiste ugięcia są mniejsze od uzyskanych w obliczeniach MES na początku próby. Wartość krótkookresowego modułu odkształcenia dennic ustalono na $E = 400$ MPa jako oszacowanie od dołu z błędem 1-2 %.
- 6) Moduły odkształcenia wyznaczone metodą normową przy rozciąganiu są istotnie mniejsze od modułów określonych przy zginaniu w całym zakresie czasu trwania obciążenia. Moduł E przy naprężeniu 9 MPa ze średnią wyznaczoną wg norm ($E=124,8$ MPa dla 100 lat) jest mniejszy o 40,5 MPa. Jest on również mniejszy od dolnej granicy przedziału ufności, wynoszącej 111,8 MPa o 27,5 MPa.
- 7) Wyniki badań pełzania przy rozciąganiu dowodzą niedoszacowania wydłużenia obliczonego za pomocą MES (ujemne różnice ΔL), przy równoczesnym zachowaniu bardzo dobrej zgodności w wartościach odkształcenia. W strefie dużych naprężeń ($\sigma_0 \approx 9$ MPa) rozbieżności pomiar – model są wyraźnie większe. Wydłużenia wyznaczone metodą MES są mniejsze od wydłużeń wyznaczonych eksperymentalnie do 0,18 mm. Jednocześnie obliczone odkształcenia ε są większe od pomierzonych (różnice dodatnie, ok. +0,0056-0,0057). Współczynnik dopasowania regresji liniowej wskazuje na bardzo dobre przyleganie do odkształceń wyznaczonych z modelu ($R^2=0,99$), przy błędzie RMSE wynoszącym 0,003.
- 8) Porównanie wyników symulacji numerycznych z wynikami wykonanych badań pełzania przy zginaniu wskazują, że w zakresie małych naprężeń ($\sigma_0 = 2,4-3,8$ MPa) zgodność obliczeń i obserwacji jest bardzo dobra, różnice ugięć mieszczą się w granicach 0,5-1,7 mm. Wskazuje to, że w obszarze, gdzie pełzanie ma charakter umiarkowanie liniowy, model zapewnia adekwatne odwzorowanie efektów długotrwałego obciążenia. Przy większych obciążeniach ($\sigma_0 = 5-7$ MPa) rozbieżności są bardziej zróżnicowane. W niektórych przypadkach model MES niedoszacowuje ugięcia (np. PE_08: różnica -4,02 mm), w innych natomiast je przeszacowuje (np. RPE_10: różnica +5,37 mm). Średni błąd względny ugięć uzyskanych z modelu w stosunku do wartości ugięć pomierzonych w testach wynosi ok. 18 %.

Rozrzut ten wyraźnie koreluje z geometrią próbek, zwłaszcza z grubością h – belki o małej grubości, wykazują większe ugięcia niż prognozuje model.

- 9) Pierwiastek średniego odchylenia kwadratowego wyznaczania parametrów modelu konstytutywnego wynosi 0,54 %. Błąd maksymalny jest równy ok. 3-krotności błędu średniego co w badanym przypadku wynosi 1,62 %.

8.3. Zalecenia

- 1) W procedurach projektowania zaleca się uwzględnianie redukcji wartości modułu odkształcenia $E(t)$ i nieliniowości odpowiedzi na obciążenie przy większych naprężeniach początkowych σ_0 . Bezpieczne jest ograniczanie wartości modułów odkształcenia w zgodzie z zakresem obciążeń ustalonych w eksperymentach.
- 2) Przy projektowaniu konstrukcji z HDPE poddanych długookresowemu obciążeniu zaleca się dobierać moduł odkształcenia do prognozowanego naprężenia w elemencie lub przyjmować moduły dla obciążeń granicznych odpowiadających naprężeniom początkowym $\sigma_0 \approx 7\text{-}8$ MPa.
- 3) Zaleca się ustawianie podłużnych osi profili w płaszczyznach pionowych podczas montażu dennicy do korpusu, co pozwala zminimalizować niekorzystne działanie poprzecznego ściskania profili towarzyszące owalizacji zbiornika pod wpływem parcia zasypki.
- 4) Na etapie realizacji, a następnie eksploatacji zbiorników podziemnych z HDPE należy zwracać szczególną uwagę na jakość robót ziemnych, zasypki, połączeń, staranność montażu, ciągłość (systematyczność) monitoringu deformacji i ich wpływ na stan techniczny, szczególnie w przypadku stwierdzenia odchyłeń wartości obserwowanych od dopuszczalnych (prognozowanych), określonych w projekcie.
- 5) Zaleca się systematycznie kontrolować prędkość przyrostu obciążenia działającego na zbiorniki podziemne. Należy rozważyć optymalizację zasad ustalania nośności elementów konstrukcyjnych z uwzględnieniem współpracy z gruntem.
- 6) Zaleca się rozszerzyć badania związane z zakresem zastosowań HDPE do realizacji obiektów infrastruktury podziemnej i rozwijać interdyscyplinarną współpracę naukowo-badawczą, łączącą obszary inżynierii materiałowej, geotechniki i technologii realizacji robót.

8.4. Kierunki dalszych badań

- 1) Udoskonalenie stanowisk pomiarowych i przygotowanie zmodyfikowanej procedury badania pełzania opartej na normach dotyczących badań przy rozciąganiu i zginaniu oraz rozbudowanie o możliwości badań pełzania przy ściskaniu.
- 2) Określenie długookresowych modułów odkształcenia oraz weryfikacja modeli konstytutywnych na podstawie wyników badań pełzania przy ściskaniu.
- 3) Ustalenie nowych, standardowych wymiarów próbek do badań pełzania, umożliwiających redukcję wpływu niejednorodności materiału, pozwalających na uśrednienie parametrów modelu konstytutywnego i ograniczenie ryzyka wystąpienia dużych błędów prognozy w przypadkach, gdy parametry wyprowadzane dla modelu są poprawnie wyznaczone, lecz nie są reprezentatywne dla populacji produktów.
- 4) Wykonanie serii badań krótkookresowych (od 500 do 5000h) na zmodyfikowanych stanowiskach pomiarowych w zakresie wartości naprężeń od 1 do 10 MPa przy rozciąganiu i zginaniu oraz w zakresie od 1 do 16 MPa przy ściskaniu.
- 5) Weryfikacja modelu konstytutywnego oparta na wynikach pełzania wyznaczonych na modelu fizycznym i przestrzennym modelu numerycznym. Dodatkowo konieczne jest opracowanie i wykorzystanie narzędzi w postaci aplikacji klasy „wirtualne laboratorium”, które umożliwią pełniejszą oraz bardziej reprezentatywną kalibrację i weryfikację parametrów modelu konstytutywnego.
- 6) Weryfikacja modelu konstytutywnego na innych materiałach posiadających zdolność pełzania, (np. GRP czy PCV), w celu oceny ogólności modelu.
- 7) Opracowanie praktycznych rekomendacji i wytycznych projektowych, uwzględniających aktualne doświadczenia z budową i eksploatacją bezciśnieniowych zbiorników podziemnych z tworzyw sztucznych, zwłaszcza w zakresie współpracy z otoczeniem gruntowym i efektywnego wykorzystania jego nośności.
- 8) Zastosowanie zaawansowanych technik monitoringu do obserwacji deformacji konstrukcji w warunkach rzeczywistych, co pozwoli na dalszą systematyczną weryfikację oraz doskonalenie modeli teoretycznych i lepsze zrozumienie mechanizmów pełzania w konfrontacji z warunkami jakim odpowiadają obiekty rzeczywiste (inżynierskie).

- 9) Analiza wpływu obciążeń cyklicznych i zmiennych na proces pełzania HDPE, ze względu na możliwe różnice pomiędzy rzeczywistymi warunkami eksploatacyjnymi oraz warunkami zgodnymi ze standardami obowiązującymi w badaniach laboratoryjnych, w tym uwzględniającymi jedynie stałe wartości obciążenia.
- 10) Analiza wpływu wahań temperatury medium roboczego (zawartości zbiorników i rurociągów) na właściwości mechaniczne materiału konstrukcji, w szczególności w kontekście nagrzewania się wód opadowych w kontakcie z powierzchnią terenu w okresach długotrwałych upałów oraz ich intensywnego napływu do zbiorników retencyjnych, np. w okresie gwałtownych opadów.

8.5. Podsumowanie

Rozprawa przedstawia przebieg i wyniki procesu identyfikacji własności lepkosprężystych polietylenu HDPE wykorzystywanego do produkcji wielkośrednicowych, podziemnych zbiorników retencyjnych. Po przeanalizowaniu dostępnej literatury przedmiotu, dotyczącej istniejących praw konstytutywnych, opisujących lepkosprężyste zachowanie się różnych materiałów oraz metod wyznaczania ich parametrów, wybrano trzy reprezentatywne modele literaturowe opisujące cechy lepkosprężyste: model potęgowy Findleya, model potęgowy Hadida i model wykładniczy Burgersa (zmodyfikowany) jak również proponowany, własny, trzelementowy model wykładniczy, uwzględniający pełzanie III rzędu. Następnie podjęto próbę scharakteryzowania badanego polietylenu za pomocą wybranych modeli poprzez wyznaczenie wartości parametrów równań konstytutywnych. Dla modeli opracowano metodykę wyznaczania parametrów równań na podstawie laboratoryjnych prób reologicznych pełzania w funkcji czasu, w warunkach trójpunktowego zginania. Przeprowadzono również analizę statystyczną wyprowadzonych wartości poszczególnych parametrów. Przeprowadzono identyfikację parametrów fizycznych modeli, a wyniki zamieszczono w pracy.

Na podstawie badań pełzania przy rozciąganiu zaproponowany został model konstytutywny opisujący zależność długookresowych odkształceń maksymalnych (ustalonych) HDPE od naprężeń początkowych i rzeczywistych. Na podstawie danych eksperymentalnych zostały wyznaczone parametry modelu. W celu oceny przydatności modelu w praktyce (w złożonym stanie odkształcenia), wyniki poddano weryfikacji poprzez porównanie odpowiednich prób doświadczalnych trójpunktowego zginania belek z numeryczną symulacją przeprowadzonych eksperymentów, wykorzystującą model konstytutywny uwzględniający uzyskane wartości parametrów.

Zaproponowane równanie konstytutywne umożliwia identyfikację krótko- i długookresowych własności mechanicznych polietylenu HDPE z dokładnością wystarczającą do celów projektowych, co potwierdzono również w symulacjach numerycznych. Całość przeprowadzonych badań oraz analiz pozwala na stwierdzenie, że cel rozprawy został zrealizowany, a uzyskanie pozytywnych wyników weryfikacji pozwala wnioskować, że postawiona w pracy teza znalazła wszechstronne potwierdzenie.

Bibliografia

- Abdul-Hameed, H., Messenger, T., Ayoub, G., Naït-Abdelaziz, M., Qu, Z., i Zaïri, F. (2014). A two-phase hyperelastic-viscoplastic constitutive model for semi-crystalline polymers: Application to polyethylene materials with a variable range of crystal fractions. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 37, 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2014.04.016>
- Abu Al-Rub, R. K., Tehrani, A. H., i Darabi, M. K. (2015). Application of a large deformation nonlinear-viscoelastic viscoplastic viscodamage constitutive model to polymers and their composites. *International Journal of Damage Mechanics*, 24(2), 198-244. <https://doi.org/10.1177/1056789514527020>
- Affatato, S. (2008). 13—Ageing of polyethylene composite implants in medical devices. W R. Martin (Red.), *Ageing of Composites* (s. 357-374). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845694937.3.357>
- Albozahid, M., Diwan, A., Diwan, M., i Alansari, L. (2021). *Effect of Weathering on Tensile Properties of Low and High Density Polyethylene*. OP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1094, 012140. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1094/1/012140>
- Alrubaie, M. A. A., Lopez-Anido, R. A., i Gardner, D. J. (2020). Flexural Creep Behavior of High-Density Polyethylene Lumber and Wood Plastic Composite Lumber Made from Thermally Modified Wood. *Polymers*, 12(2), 262. <https://doi.org/10.3390/polym12020262>
- Amargo-Zbiorniki podziemne*. (2024). <https://www.amargo.pl/zbiorniki-chemoodporne/zbiorniki-podziemne/> (data dostępu: 24.06.2025)
- Amjadi, M., i Fatemi, A. (2021). Creep behavior and modeling of high-density polyethylene (HDPE). *Polymer Testing*, 94, 107031. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107031>
- Andersen, B. (2004). *Investigations on Environmental Stress Cracking Resistance of LDPE/EVA Blends*. [rozprawa doktorska] Martin Luther University Halle-Wittenberg, Germany
- ANSYS Help: Theory—Chapter 3: Structures with Geometric Nonlinearities*. (2022). https://ansyshelp.ansys.com/public//Views/Secured/corp/v242/en/ans_thry/thy_geo.html (dostęp 20.08.2025)
- Antypas, I. (2020). The influence of polyethylene processing on the plastic containers blowing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1515, 042042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042042>
- Arrhenius, S. (1889). Über die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 4U(1), 96-116. <https://doi.org/10.1515/zpch-1889-0408>

- ASTM D790. (2017). *Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/d0790-17>
- ASTM D2990. (2017). *Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics* (Wersja D2990 – 17). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2990-17>
- Babuska, I., i Oden, J. T. (2004). Verification and validation in computational engineering and science: Basic concepts. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(36), 4057–4066. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.03.002>
- Banerjee, S., Manna, B., i Shahu, J. T. (2024). Behaviour of Geocell Reinforcement in a Multi-Layered Flexible Pavement Under Repeated Loading. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10(3), 34. <https://doi.org/10.1007/s40891-024-00541-7>
- Baranowski, W., Palutkiewicz, P., i Margol, M. (2015). Zbiorniki i pojemniki z tworzyw sztucznych stosowane w budownictwie indywidualnym. *Przegląd Budowlany*, 86(2), 24–29.
- Bednarz, B., i Dąbska, A. (2021). Analiza pracy kompensatorów dławicowych na rurociągach stalowych służących do hydrotransportu na obiekcie hydrotechnicznym. *Gospodarka Wodna*, 10/2021
- Behseta, K., Mackenzie, D., i Hamilton, R. (2012). Plastic load evaluation for a fixed tube sheet heat exchanger subject to proportional loading. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 92, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2011.12.002>
- Beijer, J. G. J., i Spoormaker, J. L. (2000). Modelling of creep behaviour in injection-moulded HDPE. *Polymer*, 41(14), 5443–5449. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00753-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00753-3)
- Bernardo, C. A., Cunha, A. M., i Oliveira, M. J. (1996). The recycling of thermoplastics: Prediction of the properties of mixtures of virgin and reprocessed polyolefins. *Polymer Engineering i Science*, 36(4), 511–519. <https://doi.org/10.1002/pen.10437>
- Booth, D. B., Roy, A. H., Smith, B., i Capps, K. A. (2016). Global perspectives on the urban stream syndrome. *Freshwater Science*, 35(1), 412–420. <https://doi.org/10.1086/684940>
- Borkowski, K. (2015). Plastics industry – Manufacturing materials for 21st century. *Mechanik*, 4, 278–282. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.4.158>
- Boshoff, W. (2014). Cracking Behavior of Strain-Hardening Cement-Based Composites Subjected to Sustained Tensile Loading. *ACI Materials Journal*, 111. <https://doi.org/10.14359/51686602>
- Bozorg-Haddad, A., Iskander, M., i Wang, H.-L. (2010). Compressive Creep of Virgin HDPE Using Equivalent Strain Energy Density Method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(12), 1270–1281. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000136](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000136)

- Bruhns, O. T. (2020). Large deformation plasticity: From basic relations to finite deformation. *Acta Mechanica Sinica*, 36(2), 472–492. <https://doi.org/10.1007/s10409-020-00926-7>
- Campbell, J. (2015). Chapter 9 – Properties of Castings. W J. Campbell (Red.), *Complete Casting Handbook* (Wydanie 2., s. 447–528). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63509-9.00009-1>
- Carrington, D., i editor, D. C. E. (2025). Climate crisis ‘wreaking havoc’ on Earth’s water cycle, report finds. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2025/jan/06/climate-crisis-wreaking-havoc-on-earths-water-cycle-report-finds> (data dostępu: 24.07.2025)
- Cheng, J. J. (2008). *Mechanical and Chemical Properties of High Density Polyethylene: Effects of Microstructure on Creep Characteristics*. [rozprawa doktorska] University of Waterloo, Ontario, Canada
- Chevali, V. S., Dean, D. R., i Janowski, G. M. (2009). Flexural creep behavior of discontinuous thermoplastic composites: Non-linear viscoelastic modeling and time–temperature–stress superposition. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(6–7), 870–877. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.012>
- Chian, S. C., i Madabhushi, S. P. G. (2012). Effect of buried depth and diameter on uplift of underground structures in liquefied soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.020>
- Chirikov, A. A., Sokolova, M. D., i Gogoleva, O. V. (2020). Development of method for welding of ultra-high molecular weight polyethylene by electromagnetic induction. *IX Eurasian Symposium on the problems of strength and resource in low climatic temperatures (EURASTRENCOLD-2020)*, 30, 23–27. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.005>
- Creep And Relaxation Of Nonlinear Viscoelastic Materials With An Introduction To Linear Viscoelasticity*. (1976), William N. Findley, James S. Lai, Kasif Onaran, Dover Publications, INC., New York, ISBN: 978-0-486-66016-5
- Darwish, A. M. (2008). Anchoring of empty underground tanks against underground-water-induced floatation by using arched cable system. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 1(3), 226–229. <https://doi.org/10.1080/19373260801959247>
- Dąbrowski, W. i Pawłowska-Salach, A. (2023). Wybrane ekonomiczne aspekty retencjonowania wód deszczowych. *Instal*, (06)2023, 37–41. <https://doi.org/10.36119/15.2023.6.6>
- Dąbska, A., i Gołębiowska, A. (2019). *Podstawy geotechniki. Zadania według Eurokodu 7* (Wydanie 2.). Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- Dąbska, A., i Pisarczyk, S. (2025). *Nośność podłoża gruntowego fundamentów bezpośrednich* (Wydanie 2.). Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- Dembińska, A. (2021). *Elementy modelowania statystycznego—Wykład 13 i 14*. [materiały dydaktyczne] Wydział MINI Politechniki Warszawskiej, Warszawa

- DIN 8075 (1999) *Polyethylene (PE) pipes - General quality requirements and testing* (Wersja DIN8075 :1999-08). DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Germany
- Drozdov, A. D., Høj Jermiin, R., i de Claville Christiansen, J. (2023). Lifetime Predictions for High-Density Polyethylene under Creep: Experiments and Modeling. *Polymers*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/polym15020334>
- Drozdov, A. D., Jermiin, R. H., i Christiansen, J. de Claville. (2024). *Lifetime predictions for virgin and recycled high-density polyethylene under creep conditions* (arXiv:2404.10336). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.10336>
- EELIX - Horizontal Tanks. (2024). <https://eelix.eu/en/products/horizontal-tanks/> (data dostępu: 25.06.2024)
- El Naggar, H. (2021). Special Issue—Soil–structure interaction of buried structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48(2), v–vi. <https://doi.org/10.1139/cjce-2020-0825>
- Elkateb, T., Chalaturnyk, R., i Robertson, P. K. (2003). An overview of soil heterogeneity: Quantification and implications on geotechnical field problems. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(1), 1–15. <https://doi.org/10.1139/t02-090>
- Emblem, A. (2012). 13 – Plastics properties for packaging materials. W A. Emblem i H. Emblem (Red.), *Packaging Technology* (s. 287–309). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095701.2.287>
- EN ISO 11296-4. (2011). *Rury utwardzane na miejscu—Określenie współczynnika pełzania w środowisku suchym na podstawie próby trojunktowego zginania*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa
- PN EN 1997-1 *Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne*. (2008). Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa
- Europlast—Zbiorniki strukturalne trzywarstwowe. (2024). <https://euro-plast.pl/57/zbiorniki-strukturalne-trzywarstwowe-na-scieki> (data dostępu: 22.04.2025)
- Faraway, J. J. (2002). *Practical Regression and Anova using R* (T. 168). University of Bath, Claverton Down, Bath, United Kingdom
- Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic properties of polymers*. John Wiley i Sons, Canada
- Findley, W. N. (1987). 26-Year creep and recovery of poly(vinyl chloride) and polyethylene. *Polymer Engineering i Science*, 27(8), 582–585. <https://doi.org/10.1002/pen.760270809>
- Findley, W. N., Lai, J. S., i Onaran, K. (1989). *Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials: With an Introduction to Linear Viscoelasticity*. Dover Publication INC., New York
- Flory, P. J., i Yoon, D. Y. (1978). Molecular morphology in semicrystalline polymers. *Nature*, 272(5650), 226–229. <https://doi.org/10.1038/272226a0>

- Frank, A., Pinter, G., i Lang, R. W. (2009). Prediction of the remaining lifetime of polyethylene pipes after up to 30 years in use. *Polymer Testing*, 28, 737–745. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.06.004>
- Fried, J. R. (2014). *Polymer Science and Technology*. (Wydanie 3.) Prentice Hall, Westford, Massachusetts, USA
- Geiß, P. L., i Schumann, M. (2017). Creep Load Conditions. W L. F. M. da Silva, A. Öchsner, i R. D. Adams (Red.), *Handbook of Adhesion Technology* (s. 1–33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42087-5_34-2
- Global High-Density Polyethylene (HDPE) Market Report and Forecast 2024-2032*. (2024). <https://www.expertmarketresearch.com/reports/high-density-polyethylene-hdpe-market>, (data dostępu: 22.04.2025)
- Gnoffo, C., Arrigo, R., i Frache, A. (2025). Mechanical recycling of HDPE-based packaging: Interplay between cross contamination, aging and reprocessing. *Polymer Degradation and Stability*, 236, 111290. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111290>
- Goddard, J. B. (2011). A Brief History of the Development and Growth of the Corrugated Polyethylene Pipe Industry in North America. *Journal of ASTM International*, 8(6), 1–10. <https://doi.org/10.1520/JAI102693>
- Grodecki, W., Madryas, C., Tajduś, A., Tokarz, A., Wichur, A., i Żyliński, R. (2005). Wybrane problemy budownictwa podziemnego. *Górnictwo i Geoinżynieria*, R. 29, z. 3/1, 37–53.
- Guilford, j. P. (1942). *Fundamental Statistics In Psychology And Education*. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, New York, USA
- Gwóźdź, M. (2007). *Modele obliczeniowe podłoża gruntowego w aspekcie różnych metod i technologii wzmocnienia. - Praca Doktorska*. Politechnika Krakowska, Kraków
- Hadid, M., Rechak, S., i Zouani, A. (2002). Empirical nonlinear viscoelastic model for injection molded thermoplastic composite. *Polymer Composites*, 23(5), 771–778. <https://doi.org/10.1002/pc.10475>
- Haward, R. N. (2007). Strain hardening of high density polyethylene. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 45(9), 1090–1099. <https://doi.org/10.1002/polb.21123>
- Hearle, J. W. S. (2005). 5—Fibres and fabrics for protective textiles. W R. A. Scott (Red.), *Textiles for Protection* (s. 117–150). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845690977.1.117>
- Hibbitt, H. D., Marcal, P. V., i Rice, J. R. (1970). A finite element formulation for problems of large strain and large displacement. *International Journal of Solids and Structures*, 6(8), 1069–1086. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(70\)90048-X](https://doi.org/10.1016/0020-7683(70)90048-X)
- Hiss, R., Hobeika, S., Lynn, C., i Strobl, G. (1999). Network Stretching, Slip Processes, and Fragmentation of Crystallites during Uniaxial Drawing of Polyethylene and Related Copolymers. A Comparative Study. *Macromolecules*, 32(13), 4390–4403. <https://doi.org/10.1021/ma981776b>

- Höhne, G. W. H., Hemminger, W., i Flammersheim, H.-J. (1996). *Differential Scanning Calorimetry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03302-9>
- Homkhiew, C., Ratanawilai, T., i Thongruang, W. (2014). Effects of natural weathering on the properties of recycled polypropylene composites reinforced with rubberwood flour. *Industrial Crops and Products*, 56, 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.02.034>
- Horvath, J. (1998). *Mathematical Modeling of the Stress-Strain-Time Behavior of Geosynthetics Using the Findley Equation: General Theory and Application to EPS-Block Geofoam*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29564.80002>
- How to Set Up Response Functions for Hyperelastic Material Models—Lesson 2 | ANSYS Innovation Courses*. (2021). <https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/topics-in-hyperelasticity-using-ansys-mechanical/lessons/how-to-set-up-response-functions-for-hyperelastic-material-models-lesson-2/> (data dostępu: 22.07.2025)
- ISO 527-1. (2019). *Plastics—Determination of tensile properties Part 1: General principles*. International Standards
- ISO 527-2. (2012). *Plastics—Determination of tensile properties Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. International Standards
- ISO 899-1. (2017). *Plastics—Determination of creep behaviour—Part 1: Tensile creep*. ISO. International Standards
- ISO 899-2. (2003). *Plastics—Determination of creep behaviour Part 2: Flexural creep by three-point loading*. International Standards
- Jakowluk, A. (1993). *Procesy pełzania i zmęczenia w materiałach*. (Wydanie 1.) Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa
- Janimak, J. J., i Stevens, G. C. (2001). Inter-relationships between tie-molecule concentrations, molecular characteristics and mechanical properties in metallocene catalysed medium density polyethylenes. *Journal of Materials Science*, 36(8), 1879–1884. <https://doi.org/10.1023/A:1017517118154>
- Janson, L.-E. (1993). Method for tightness testing of plastics pressure pipelines. *Construction and Building Materials*, 7(4), 241–244. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(93\)90008-Z](https://doi.org/10.1016/0950-0618(93)90008-Z)
- Januchta-Szostak, A., Ogorzelska, A., i Peplińska, S. (2024). Modernizacja rynków małych i średnich miast wobec adaptacji do zmian klimatu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Architektura, Urbanistyka, Architektura Wnętrz*, 15 Wydanie Specjalne. <https://architecturejournal.put.poznan.pl/Modernizacja-rynkow-malych-i-srednich-miast-wobec-adaptacji-do-zmian-klimatu-,176960,0,1.html>
- KAI - Underground Tank. (2024). <https://www.kiaico.com/gallery-photo.html> (data dostępu: 12.04.2024)
- Kałuża, T., Błażejowski, R., i Spychała, M. (2023). *Aquanet-Retencja—Katalog cz.III*. Aquanet retencja. <https://www.aquanet-retencja.pl/wp-content/uploads/2024/03/AQUANET-RETENCJA-KATALOG-III.pdf> (data dostępu: 13.04.2024)

- Kam, P. M., Aznar-Siguan, G., Schewe, J., Milano, L., Ginnetti, J., Willner, S., McCaughey, J. W., i Bresch, D. N. (2021). Global warming and population change both heighten future risk of human displacement due to river floods. *Environmental Research Letters*, 16(4), 044026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd26c>
- Kanthabhabha Jeya, R., i Bouzid, A.-H. (2018). Compression Creep and Thermal Ratcheting Behavior of High Density Polyethylene (HDPE). *Polymers*, 10(2), 156. <https://doi.org/10.3390/polym10020156>
- Kartalis, C., Papaspyrides, C., Pfaendner, R., Hoffmann, K., i Herbst, H. (2000). Mechanical recycling of post-used HDPE crates using the restabilization technique. II: Influence of artificial weathering. *Journal of Applied Polymer Science*, 77, 1118–1127. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20000801\)77:5<1118:AID-APP20>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20000801)77:5<1118:AID-APP20>3.0.CO;2-J)
- Keller, A. (1957). A note on single crystals in polymers: Evidence for a folded chain configuration. *Philosophical Magazine*, 2(21), 1171–1175
- Koerner, G. R., Hsuan, Y. G., i Koerner, R. M. (2007). 3—The durability of geosynthetics. W R. W. Sarsby (Red.), *Geosynthetics in Civil Engineering* (s. 36–65). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845692490.1.36>
- Kolupaev, V. (2006). *3D-Creep Behaviour of Parts Made of Non-reinforced Thermoplastics (in German: Dreidimensionales Kriechverhalten von Bauteilen aus unverstärkten Thermoplasten)*, [rozprawa doktorska] Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle-Saale ISBN: 3897208547
- Komar, W. (2007). *Lepkosprężyste związki konstytutywne w tkaninach technicznych*. [rozprawa doktorska] Politechnika Gdańska, Gdańsk
- Koronacki, J., i Mielniczuk, J. (2006). *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych* (Wydanie 3.). Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa
- Kwacz, M., i Zadrosz, J. (2007). *Przykłady zastosowań systemów rurowych z tworzyw sztucznych w sieciach podziemnych*. Konferencja Techniczna PRiK „Sieci wodociągowe z tworzyw sztucznych. Nowe rozwiązania z PP i PE”, Bielsko-Biała.
- Kwacz, M., i Zadrosz, J. (2008). Stuletni czas eksploatacji? – Przykłady zastosowań rur z tworzyw sztucznych w sieciach podziemnych, cz. I, *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, (2)2008, Kraków
- Lanzoni, L., i Tarantino, A. M. (2021). Nonuniform bending theory of hyperelastic beams in finite elasticity. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 135, 103765. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2021.103765>
- Leaderman, H. (1962). Large longitudinal retarded elastic deformation of rubberlike network polymers. *Transactions of the Society of Rheology*, 6(1), 361–382.
- Li, Q., Li, W., Lu, Q., Li, Y., i Yang, T. (2023). Study on the detection method of HDPE electro-fusion welding defect based on X-ray technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2419(1), 012069. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2419/1/012069>

- Liu, H. (2007). *Material Modelling for Structural Analysis of Polyethylene* [UWSpace]. <http://hdl.handle.net/10012/2646> (data dostępu: 28.06.2025)
- Lynch, J. K., Nosker, T. J., Renfree, R. W., i Krishnaswamy, P. R. (2004). *Weathering Effects on Mechanical Properties of Recycled HDPE Based Plastic Lumber*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:171088945>
- Madryas, C., Kolonko, A., i Wysocki, L. (2002). *Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych* (Wydanie 1.). Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław
- May, D. L., Gordon, A. P., i Segletes, D. S. (2013). The Application of the Norton-Bailey Law for Creep Prediction Through Power Law Regression. *Volume 7A: Structures and Dynamics*, V07AT26A005. <https://doi.org/10.1115/GT2013-96008>
- Mendes, A. A., Cunha, A. M., i Bernardo, C. A. (2011). Study of the degradation mechanisms of polyethylene during reprocessing. *Polymer Degradation and Stability*, 96(6), 1125–1133. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.02.015>
- Metale i Tworzywa Sztuczne Co Wrzucać w 2025? Kompletny Poradnik Recyklingu*. (2025). <https://itworzywasztuczne.pl/metale-i-tworzywa-sztuczne-co-wrzucamy> (data dostępu: 22.04.2024)
- Mioduszewski, W. (2012). Zjawiska ekstremalne w przyrodzie–susze i powódzie. W *Współczesne problemy kształtowania i ochrony środowiska. Monografie* (T. 3, s. 57–74). Katedra Melioracji i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn
- Modelowanie ośrodka lepkosprężystego w metodzie elementów czasoprzestrzennych*, (2015) Magdalena Emilia Lachowicz, [rozprawa doktorska], Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Bydgoszcz.
- Mohanty, A. D., i Bae, C. (2015). Transition Metal-Catalyzed Functionalization of Polyolefins Containing CC, CC, and CH Bonds. W P. J. Pérez (Red.), *Advances in Organometallic Chemistry* (Tom 64, s. 1–39). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.adomc.2015.08.002>
- Moser, A. P., i Folkman, S. (2008). *Buried Pipe Design* (Wydanie 3.). McGraw-Hill Education, ISBN 0071603638, New York, USA
- Największy kolektor retencyjny w stolicy niemal gotowy*. (2023), <https://um.warszawa.pl/-/najwiekszy-kolektor-retencyjny-w-stolicy-niemal-gotowy>, (data dostępu: 30.11.2024)
- Naumenko, K. (2006). *Modeling of high-temperature creep for structural analysis applications*. Martin Luther University Halle-Wittenberg. DOI:10.1007/978-3-540-70839-1_1
- Naumenko, K., i Altenbach, H. (2007). *Modeling of Creep for Structural Analysis*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70839-1_1
- Nguyen, K. Q., Mwiseneza, C., Mohamed, K., Cousin, P., Robert, M., i Benmokrane, B. (2021). Long-term testing methods for HDPE pipe - advantages and disadvantages: A review. *Engineering Fracture Mechanics*, 246, 107629. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107629>

- Ni, P. (2016). *Nonlinear soil-structure interaction for buried pressure pipes under differential ground motion*, Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston
- Niou, S., Chaoui, K., Azzouz, S., Hamlaoui, N., i Alimi, L. (2018). A method for mechanical property assessment across butt fusion welded polyethylene pipes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1–4), 543–561. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1908-y>
- Nitta, K., i Maeda, H. (2010). Creep behavior of high density polyethylene under a constant true stress. *Polymer Testing*, 29(1), 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.09.005>
- Nowicka, A., i Rutkowska, A. (2021). Problematyka betonozy we współczesnych metropoliach. W R. Mędrzycki (Red.), *Metropolie wobec wyzwań i problemów społecznych* (s. 182–199). Instytut Metropolitalny, Gdańsk
- O'Donnell, E., i Thorne, C. (2020). Urban flood risk management: The blue–green advantage. W *Blue–Green Cities* (s. 1–13). Thomas Telford. <https://doi.org/10.1680/bgc.64195.001>
- Oh, J.-O., i Yoon, S.-H. (2012). Measurements of Thermal Expansion Coefficients in GRP Pipe. *Composites Research*, 25. <https://doi.org/10.7234/kscm.2012.25.1.026>
- Oral, E., Kurtz, S. M., i Muratoglu, O. K. (2011). Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Total Joint Implants*. W P. Ducheyne (Red.), *Comprehensive Biomaterials* (s. 29–49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-055294-1.00199-9>
- Ostrowska-Maciejewska, J. (1994). *Mechanika ciał odkształcalnych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- Pan, J. P., Zhu, X. W., i Tan, L. J. (2013). Experimental Study on Microwave Test of Cold Weld Defects in HDPE Piping Thermal Fusion Welds. *Applied Mechanics and Materials*, 433–435, 895–899. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.433-435.895>
- Pandit, A. (2022). Underground Retention Tanks in Multi-Family Development—Managing Stormwater in High-Density Areas. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 3(1), 617–624. <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2022.3.2-617-624>
- Papanicolaou, G. C., i Zaoutsos, S. P. (2011). Viscoelastic constitutive modeling of creep and stress relaxation in polymers and polymer matrix composites. W *Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites* (s. 3–47). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857090430.1.3>
- PE pipe: Design and installation* (1. ed). (2006). American Water Works Association
- Petermann, J., i Schultz, J. M. (1978). Lamellar separation during the deformation of high-density polyethylene. *Journal of Materials Science*, 13(1), 50–54. <https://doi.org/10.1007/BF00739272>
- Piché, L. (1984). Ultrasonic velocity measurement for the determination of density in polyethylene. *Polymer Engineering i Science*, 24(17), 1354–1358. <https://doi.org/10.1002/pen.760241713>

- Pieczonka, T. (2010). *Dylatometryczna metoda wyznaczania liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej ciał stałych*. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Kraków
- Pielichowski, J., i Puszyński, A. (1998). *Chemia polimerów*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Kraków
- Piergiovanni, L., i Limbo, S. (2016). Plastic Packaging Materials. W L. Piergiovanni i S. Limbo (Red.), *Food Packaging Materials* (s. 33–49). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24732-8_5
- Pisarczyk, S. (2005). *Geoinżynieria: Metody modyfikacji podłoża gruntowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- Placet, V., Passard, J., i Perré, P. (2008). Viscoelastic properties of wood across the grain measured under water-saturated conditions up to 135 °C: evidence of thermal degradation. *Journal of Materials Science*, 43, 3210–3217
- PN-EN ISO 10456. (2009). *Materiały i wyroby budowlane - Właściwości cieplno-wilgotnościowe*. Polski Komitet Normalizacyjny.
- Posch, W. (2011). 3—Polyolefins. W M. Kutz (Red.), *Applied Plastics Engineering Handbook* (s. 23–48). William Andrew Publishing, Oxford, <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10003-0>
- Rabek, J. F. (1996). *Photodegradation of Polymers*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-80090-0>
- Rajakumar, K., Sarasvathy, V., Thamarai Chelvan, A., Chitra, R., i Vijayakumar, C. T. (2009). Natural Weathering Studies of Polypropylene. *Journal of Polymers and the Environment*, 17(3), 191–202. <https://doi.org/10.1007/s10924-009-0138-7>
- Rangrej, J., i Kodwani, H. (2024). A Review of Analysis of Underground Water Tanks Considering Different Conditions. *International Journal of Innovative Research in Technology and Science*, 12, 235–239
- Raya, R. K., i Gupta, R. (2023). Mechanical Behaviour and Failure Analysis of Glass Fibre-Reinforced Plastic Panels for a Directional Tunnel: An Underground Water Storage Device. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(4), 4851–4863. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07190-w>
- Rech, J., Ramakers-van Dorp, E., Möglinger, B., i Hausnerova, B. (2022). Modeling of Creep Behavior of Particulate Composites with Focus on Interfacial Adhesion Effect. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22). <https://doi.org/10.3390/ijms232214120>
- Reimer, L. (2000). Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis, Second Edition. *Measurement Science and Technology*, 11(12), 1826. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/12/703>

Relationship between Short-Term and Long-Term Creep, and the Molecular Structure of Polyethylene (2009). Behjat Y. [rozprawa doktorska] University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada

Responsibility when specifying engineered products. (2024). <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/article/2024/10/01/responsibility-when-specifying-engineered-products> (data dostępu: 12.02.2025)

Reverdy, F. (2020). *How to Optimize High Density Polyethylene (HDPE) Ultrasonic Inspections.* <https://blog.eddyfi.com/en/how-to-optimize-high-density-polyethylene-hdpe-ultrasonic-inspections>

Rosato, D. V., Rosato, D. V., i Rosato, M. V. (2004). 2—PLASTIC PROPERTY. W D. V. Rosato, D. V. Rosato, i M. V. Rosato (Red.), *Plastic Product Material and Process Selection Handbook* (s. 40–129). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-185617431-2/50005-0>

Rusch, H. (1960). Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 57(7). <https://doi.org/10.14359/8009>

Saadallah, Y., Flilissa, S., i Hamadouche, B. (2024). Viscoelastic creep in bending of olive wood (*Olea Europea L.*). *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 21(1), 58–64. <https://doi.org/10.1007/s13196-024-00337-2>

Samarin, Yu. P. (1974). Derivation of exponential approximations for creep curves by the method of successive isolation of exponential terms. *Strength of Materials*, 6(9), 1062–1066. <https://doi.org/10.1007/BF01528264>

Sandford, T. C. (2000). Soil-structure interaction of buried structures. *A2K04: Committee on Subsurface Soil-Structure Interaction*. Transportation in the New Millennium

Sarabi, B. (1986). Anstrengungsverhalten von Kunststoffen unter biaxial-statischer Belastung. *Kunststoffe*, 76(2), 182–186

Satoto, R., Subowo, W. S., Yusiasih, R., Takane, Y., Watanabe, Y., i Hatakeyama, T. (1997). Weathering of high-density polyethylene in different latitudes. *Polymer Degradation and Stability*, 56(3), 275–279. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(96\)00213-3](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(96)00213-3)

Shi, J., Yu, N., Zeng, L., Chen, H., i Li, X. (2024). Study on buried polyethylene pipe reinforced by steel wires under internal pressure and foundation settlement. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 37(5), 1619–1647. <https://doi.org/10.1177/08927057231196082>

Skonieczna, M., Hański, A., Topiłko, J., Barszczewska, M., i Wdowikowski, M. (2021). Miejskie Powodzie—Winny Klimat Czy Człowiek. *Obserwator, IMGW-PIB*, Warszawa

Spalding, M. A., i Chatterjee, A. (2017). *Handbook of industrial polyethylene and technology: Definitive guide to manufacturing, properties, processing, applications and markets set.* John Wiley i Sons, Canada, ISBN:9781119159766, DOI:10.1002/9781119159797

- Speight, J., Lange, N. A., i Dean, J. A. (2005). *Lange's Handbook of Chemistry* (Wydanie 16.) (Vol. 1–1 online resource (1606 pages)). McGraw-Hill Professional Publishing; WorldCat, New York
- Starowicz, M. (2021). *Podstawy chemii polimerów* [e-book]. Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Kraków
- Stuart, B. H. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications* (1. wyd.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470011149>
- Stuart, S. J. (2011). *Evaluation of HDPE and PVC pipes used for cross-drains in highway construction* [PhD Thesis]. Auburn University, Auburn, Alabama, USA
- Su, W.-F. (2013). Radical Chain Polymerization. W W.-F. Su (Red.), *Principles of Polymer Design and Synthesis* (s. 137–183). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38730-2_7
- System Weholite, Uponor.* (2021). <https://www.uponor.com/en-pl/infra/produkty/kanalizacja-deszczowa/rury-weholite> (data dostępu: 12.02.2024)
- Tariq, F., Naz, N., Khan, M. A., i Baloch, R. A. (2012). Failure Analysis of High Density Polyethylene Butt Weld Joint. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 12(2), 168–180. <https://doi.org/10.1007/s11668-011-9536-y>
- Thakur, A. (2019). *Melt Flow Rate Study of Recycled High Density Polyethylene*. 9, 14–26.
- The Human Cost of Disasters—An overview of the last 20 years 2000-2019.* (2020). CRED - Brussels, UNDRR - Geneva. <https://reliefweb.int/report/world/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019> (data dostępu: 18.02.2025)
- The hydrological situation in Poland—Spring/summer 2025: Analysis.* (2025). <https://wodnesprawy.pl/en/the-hydrological-situation-in-poland-in-the-spring-analysis-and-forecasts-of-the-threat-of-drought/> (data dostępu: 12.08.2025)
- The Report of the Midterm Review of the Implementation of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030.* (2023) <https://sendaiframework-mtr.undrr.org/publication/report-midterm-review-implementation-sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030#editors-recommendations> (data dostępu: 15.02.2025)
- Tworzywa—Fakty 2022—Plastics Europe PL.* (2022). <https://plasticseurope.org/pl/knowledge-hub/tworzywa-fakty-2022/> (data dostępu: 22.07.2024)
- Uponor Infra w programie TVN Turbo Polak Potrafi.* (2019, styczeń 30). [Nagranie wideo]. <https://www.youtube.com/watch?v=cBHKHueZlkYit=56s> (data dostępu: 14.06.2024)
- US Fusion. (2021). *The Plastics Pipe Institute Handbook of Polyethylene Pipe*. US Fusion, Baton Rouge, LA, USA
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson,

- E., ... SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Wang, G.-F., Sun, F., Xiong, X.-H., He, L., i Zhang, K.-H. (2020). A 3D Creep Model considering Disturbance Damage and Creep Damage and Its Application in Tunnel Engineering. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020(1), 7073089. <https://doi.org/10.1155/2020/7073089>
- Wang, W., Buhl, P., i Klenk, A. (2015). A unified viscoplastic constitutive model with damage for multi-axial creep–fatigue loading. *International Journal of Damage Mechanics*, 24(3), 363–382. <https://doi.org/10.1177/1056789514537007>
- Wang, Z., Shijun Zhang, Jichun Qie, Qijiang You, Lu Xu, i Qiuju Zhang. (2024). Improvement of butt-fusion welding procedure and performance evaluation method for thick-walled bimodal polyethylene pipes. *Polymer Testing*, 135, 108448. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108448>
- Ward, I. M., i Sweeney, J. (2013). *Mechanical properties of solid polymers* (Wydanie 3.) John Wiley i Sons, Canada
- Warning: Underground plastic stormwater detention systems. (2024). <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/article/2024/10/01/warning-underground-plastic-stormwater-detention-systems> (data dostępu: 14.01.2025)
- Warszawa: Kolektor Burakowski jak nowy. Koniec renowacji—Inżynieria.com. (2022). <https://inzynieria.com/inzbezwypokowa/wiadomosci/63345,warszawa-kolektor-burakowski-jak-nowy-koniec-modernizacji> (data dostępu: 14.08.2024)
- Warszawa: Kolektor Wiślany, czyli wielkie wyzwanie także dla producenta rur. (2022). <https://inzynieria.com/filmy/branzy/film/1/1219,warszawa-kolektor-wislany-czyli-wielkie-wyzwanie-takze-dla-producenta-rur> (data dostępu: 14.08.2024)
- Westbrook, R., i Walker, D. (1996). *Structural Engineering Design in Practice: Project Design Examples*. Longman Scientific & Technical, London, UK
- What Is the Melting Point of PE Plastic? (2023). EuroPlas. <https://europas.com.vn/en-US/blog-1/what-is-the-melting-point-of-pe-plastic> (data dostępu: 14.01.2024)
- Wikipedia contributors. (2024). Polyethylene—Wikipedia, The Free Encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polyethylene&oldid=1231173633> (data dostępu: 16.04.2024)
- Wobet-Hydret Zbiorniki bezodpływowe. (2016). <https://www.wobet-hydret.pl/zbiorniki-bezodplywowe> (data dostępu: 15.02.2024)
- Wysokowski, A. (2010). Odwodnienie parkingów i miejsc obsługi podróżnych cz. II - odwodnienie wglebne. *Inżynier Budownictwa*, 11. <https://inzynierbudownictwa.pl/odwodnienie-parkingow-i-miejsc-obslugi-podroznych-cz-ii-odwodnienie-wglebne/> (data dostępu: 27.05.2024)

- Yan, Y. (2016). 2—Developments in fibers for technical nonwovens. W G. Kellie (Red.), *Advances in Technical Nonwovens* (s. 19–96). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100575-0.00002-4>
- Zawadzki, J. (1984). Własności reologiczne materiałów. w *Mechanika Techniczna: T. X* (s. 125–220). PWN, Warszawa
- Zhao, Y., Lu, Z., Liu, J., Yao, H., Tang, C., Nie, Y., i Zhang, J. (2024). Creep behavior and viscoelastic-plastic models for polymer-blend HDPE geocell sheets based on the stepped isothermal method. *Geotextiles and Geomembranes*, 52(1), 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2023.09.008>
- Zou, C., Wang, Y., Lin, J., i Chen, Y. (2016). Creep behaviors and constitutive model for high density polyethylene geogrid and its application to reinforced soil retaining wall on soft soil foundation. *Construction and Building Materials*, 114, 763–771. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.194>

Spis rysunków

Polski

Rys. 2-1 Zbiornik z HDPE DN2400 przed montażem na terenie inwestycji (fot. Dąbska A.)	21
Rys. 2-2 Zbiornik HDPE z dennicą: a) sferyczną (<i>EELIX - Horizontal Tanks</i> , 2024), b) płaską (<i>Amargo - Zbiorniki podziemne</i> , 2024)	22
Rys. 2-3 Zbiornik HDPE z dennicą: a) sferyczną wzmacnianą wspornikami (<i>Amargo – Zbiorniki podziemne</i> , 2024), b) płaską usztywnianą tzw. żebrami (<i>KAI – Underground Tank</i> , 2024) .	22
Rys. 2-4 Ustawienie zbiorników dwupłaszczowych strukturalnych w tzw. baterie: a) schemat (Europlast – zbiorniki strukturalne trzywarstwowe, 2024), b) realizacja montażu zbiorników w terenie (<i>Uponor Infra...</i> , 2019)	23
Rys. 2-5 Spawanie ekstruzyjne elementów zbiorników z HDPE: a) ręczne, b) automatyczne (<i>System Weholite...</i> , 2021).....	23
Rys. 2-6 Zbiornik dwupłaszczowy z dennicą płaską podczas montażu w wykopie (<i>Wobet-Hydret Zbiorniki bezodpływowe</i> , 2016).....	26
Rys. 2-7 Schemat usytuowania zbiornika w terenie o rodzimym gruncie słaboprzepuszczalnym podczas intensywnych opadów atmosferycznych (opracowanie własne).....	26
Rys. 2-8 Schemat oddziaływań gruntu i wody na zbiornik podziemny z HDPE: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny (opracowanie własne)	28
Rys. 2-9 Zmiana warunków współpracy zasypki z konstrukcją w strefie grunt-dennica na skutek ugięcia dennicy (opracowanie własne)	30
Rys. 2-10 Charakter deformacji gruntu zasypki w strefie ugięcia dennicy: a) przemieszczenia wypadkowe, b) wektory przemieszczeń (opracowanie własne).....	31
Rys. 3-1 Granulat polietylenu HDPE (Antypas, 2020): a) surowy materiał, b) materiał barwiony	33
Rys. 3-2 Struktura meru w polietylenie (Posch, 2011).....	34
Rys. 3-3 Schemat budowy polimerów: a) struktura amorficzna, b) półkryształiczna c) kryształiczna. Linie faliste symbolizują nieuporządkowane segmenty łańcuchów polimerowych, natomiast fragmenty uporządkowane (zaznaczone pogrubieniem) odpowiadają obszarom kryształicznym (Piergiovanni i Limbo, 2016)	38
Rys. 3-4 Model szkieletu i łańcuchów kryształicznych złożonych: a) regularnie, b) nieregularnie (Flory i Yoon, 1978).....	39
Rys. 3-5 Zależność zmiany wydłużenia od temperatury dla wybranych materiałów (Bednarz i Dąbska, 2021; Oh i Yoon, 2012).....	41
Rys. 3-6 Krzywa pełzania ciała stałego w czasie: a) wykres zmiany naprężenia w czasie: czarna linia – naprężenie nominalne, czerwona linia – naprężenie rzeczywiste w przekroju próbki, b) wykres zmiany odkształcenia ε (ugięcia f) w czasie: I – pierwsze stadium, II – drugie stadium, III – trzecie stadium (Jakowluk, 1993).....	44
Rys. 3-7 Wykres relaksacji i retardacji w czasie. Pełzanie (retardacja): po skokowym przyłożeniu stałego naprężenia a) odkształcenie rośnie w czasie i asymptotycznie zbliża się do wartości granicznej b). Relaksacja: po skokowym zadaniu stałego odkształcenia c) naprężenie maleje w czasie, zwykle wykładniczo d) (Geiß i Schumann, 2017)	47
Rys. 3-8 Zależność naprężenie-odkształcenie-czas w materiałach lepkosprężystych (Bozorg-Haddad i in., 2010)	48
Rys. 3-9 Główne krzywizny relacji krzywej podatności J względem czasu (logarytmicznego) (Janson, 1993).....	49
Rys. 3-10 Krzywa podatności w funkcji czasu retardacji λ_2 (Ward i Sweeney, 2013)	50
Rys. 3-11 Krzywe pełzania polietylenu w temperaturze pokojowej (75°F) (Findley, 1987).....	58

Rys. 3-12 Odształcenia pełzające próbek o różnych wymiarach: 10 x 0,2 mm (czarna linia), 5 x 0,5 mm (czerwona linia) przy rozciąganiu osiowym ze stałym, kontrolowanym naprężeniem (t/s – czas w sekundach) (Nitta i Maeda, 2010).....	65
Rys. 3-13 Schemat utleniania obszaru amorficznego w polimerze półkryształicznym przez UV powodującym rozerwanie łańcucha (Rabek, 1996)	66
Rys. 5-1 Kształt i podstawowe wymiary próbki typu „wiosółko” do badań pełzania przy rozciąganiu, zgodne z normą ISO 527-2:1993	75
Rys. 5-2 Badania niszczące na maszynie wytrzymałościowej do rozciągania Heckert: a) tarcza do pomiaru siły i wskaźnik przemieszczenia, b) próbka w fazie po osiągnięciu szyjki.....	76
Rys. 5-3 Próbkę po zakończeniu testu rozciągania: a) próbka zerwana, b) próbka wydłużona do wyczerpania zakresu maszyny wytrzymałościowej.....	76
Rys. 5-4 Badania rozciągania przy wymuszonym przemieszczeniu na maszynie wytrzymałościowej do rozciągania Heckert. Po lewej tarcza do odczytu wartości siły, po prawej próbka umieszczona w szczękach maszyny oraz ekstensometr motylkowy, mierzący wydłużenie próbki	78
Rys. 5-5 Zależność naprężenie-odkształcenie dla próbki $d/e4/3$, materiał PE, w teście rozciągania. Niebieska krzywa prezentuje prognozowany przebieg stabilizacji maksymalnego naprężenia normalnego w warunkach obciążenia długookresowego	79
Rys. 5-6 Przebieg procesu relaksacji próbki $d/e4/3$, materiał PE, w teście rozciągania.....	80
Rys. 5-7 Zależność naprężenie-odkształcenie dla próbki $d/e4/4$, materiał PE, w teście rozciągania. Niebieska krzywa prezentuje prognozowany przebieg stabilizacji maksymalnego naprężenia normalnego w warunkach obciążenia długookresowego	80
Rys. 5-8 Przebieg procesu relaksacji próbki $d/e4/4$, materiał PE, w teście rozciągania.....	81
Rys. 5-9 Próbka S_M3 przygotowana do badania: a) widok z góry, b) widok z boku.....	82
Rys. 5-10 Test ściskania, próbka S_M3: a) próbka przed rozpoczęciem badania, b) próbka po uzyskaniu maksymalnej wartości obciążenia	83
Rys. 5-11 Wykres testu ściskania – zależność naprężenia do odkształcenia, próbka S_M3	83
Rys. 5-12 Stanowiska do badania pełzania tworzyw sztucznych przy zginaniu oraz rozciąganiu.....	85
Rys. 5-13 Stanowisko do badań pełzania przy zginaniu: a) widok ogólny na platformę, b) pojedyncze stanowisko pomiarowe, c) obciążniki do generowania stałego obciążenia na próbki, d) urządzenie do akwizycji danych oraz termometr elektroniczny.....	87
Rys. 5-14 Próbkę do badań pełzania przy zginaniu: a) widok próbki od góry, b) widok próbki z boku	88
Rys. 5-15 Rozkład geometryczny i wskaźnik z-score parametrów przekrojów poprzecznych próbek zginanych: a) szerokość, b) grubość, c) moment bezwładności	89
Rys. 5-16 Rozkład naprężeń początkowych próbek zginanych	91
Rys. 5-17 Maksymalne wartości podatności $J(t_{max})$ w funkcji naprężenia początkowego σ_0 . Wartości podzielone na pary Typ – Rozstaw ($N = 24$)	96
Rys. 5-18 Maksymalne wartości podatności $J(t_{max})$ w funkcji rozstawu l. Wartości podzielone na Typ materiału ($N = 24$)	97
Rys. 5-19 Maksymalne wartości podatności $J(t_{max})$ w funkcji grubości próbki h. Wartości podzielone na pary Typ – Rozstaw ($N = 24$)	98
Rys. 5-20 Średnie krzywe podatności $J(t)$ w funkcji czasu. Krzywe podzielone na pary Typ – Rozstaw. Półprzezroczyste pola określają przedział ufności w danej chwili czasowej dla $p\text{-value}=0,05$	99
Rys. 5-21 Trójczynnikiowa analiza wariancji (ANOVA) dla Typu materiału (Typ), rozstawu (l) i grubości próbek (h) w wybranych siedmiu chwilach czasowych. Wykres dla wszystkich zbadanych próbek z odrzuceniem próbek, które osiągnęły III stadium pełzania (liczba próbek $N=22$ od 1 do 500h oraz $N=16$ dla 1000h).	101

Rys. 5-22 Wykres maksymalnego odkształcenia w funkcji naprężenia początkowego próbek poddanych pełzaniu przy zginaniu.....	103
Rys. 5-23 Koncepcja stanowisk pomiarowych do pełzania przy rozciąganiu: a) widok z boku, b) widok od frontu, c) widok 3D	104
Rys. 5-24 Stanowiska do pełzania przy rozciąganiu.	105
Rys. 5-25 Stanowiska do pełzania przy rozciąganiu: a) obciążniki na końcach stalowych ramion, b) uchwyt próbki wraz z czujnikiem pomiarowym	105
Rys. 5-26 Rozkład geometryczny i wskaźnik z-score parametrów przekrojów poprzecznych próbek rozciąganych: a) szerokość, b) grubość, c) moment bezwładności	107
Rys. 5-27 Krzywe pełzania – odkształcenie ε próbek PE przy rozciąganiu w funkcji czasu.....	110
Rys. 5-28 Krzywe podatności pełzania $J(t)$ próbek PE przy jednoosiowym rozciąganiu w funkcji czasu	111
Rys. 5-29 Średnia krzywa podatności $J(t)$ w funkcji czasu. Półprzezroczyste pole zakreśla rozrzut wyników w danej chwili czasowej dla p-value=0,05	112
Rys. 5-30 Maksymalne wartości podatności $J(t_{max})$ w funkcji naprężenia początkowego σ_0	113
Rys. 5-31 Wykres maksymalnego odkształcenia $\varepsilon(t_{max})$ w funkcji naprężenia początkowego σ_0 próbek poddanych pełzaniu przy rozciąganiu.....	114
Rys. 5-32 Krzywe DSC próbek HDPE: a) ogrzewanie – etap 1, b) chłodzenie, c) ogrzewanie – etap 2	119
Rys. 5-33 Dopasowanie widma HDPE do wzorca bibliotecznego.....	121
Rys. 5-34 Widma FTIR-ART badanych próbek z HDPE	121
Rys. 5-35 Porównawcze zobrazowanie struktury materiału PE i RPE w różnych powiększeniach: a) 50-200x, b) 2000x c) 5000x.....	123
Rys. 5-36 Mikrostruktura polimeru w miejscu zerwania (próbka e6_02): a) powiększenie 100x, b) powiększenie 450x	124
Rys. 5-37 Mikrostruktura polimeru w obszarze szyjki (próbka e6_3): a) kruchy przełom, b) próbka rozciągana – widoczne sferyczne elementy.....	124
Rys. 5-38 Dennica RPE DN1000 SN4 przygotowana do badań: a) pomiar zewnętrznej strzałki wygięcia, b) pomiar wewnętrznej strzałki wygięcia. Widoczny pierścień usztywniający, założony na obwodzie dennicy	126
Rys. 5-39 Model geometryczny dennicy DN1000 SN4 oraz płyt prasy, przyjęty do obliczeń w środowisku Ansys Mechanical.....	129
Rys. 5-40 Wykres porównania średniego pomiaru ugięcia z testu ściskania dennic DN1000 SN4 oraz wyników modelowania MES (Ansys Mechanical) dla przyjętego modułu odkształcenia $E = 400$ i 450 MPa	130
Rys. 5-41 Rozkład ugięć dennicy w ostatnim kroku obciążenia: a) widok przestrzenny, b) przekrój poprzeczny, c) widok z góry.....	131
Rys. 5-42 Rozkład naprężeń głównych: a) minimalnych (strefy najintensywniejszego ściskania), b) maksymalnych (strefy najintensywniejszego rozciągania).....	132
Rys. 6-1 Porównanie dopasowania modeli literaturowych do danych eksperymentalnych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka PE_01 (3,0 MPa).....	137
Rys. 6-2 Porównanie dopasowania modeli literaturowych do danych eksperymentalnych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka PE_08 (6,0 MPa).....	138
Rys. 6-3 Porównanie dopasowania modeli literaturowych do danych eksperymentalnych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka RPE_15 (11,0 MPa)	139
Rys. 6-4 Porównanie modelu proponowanego do danych eksperymentalnych na tle modeli literaturowych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka PE_07 ($\sigma_0 = 3,0$ MPa).....	141
Rys. 6-5 Porównanie modelu proponowanego do danych eksperymentalnych na tle modeli literaturowych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka RPE_08 ($\sigma_0 = 6,0$ MPa)	142

Rys. 6-6 Porównanie modelu proponowanego do danych eksperymentalnych na tle modeli literaturowych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka RPE_04 ($\sigma_0 = 9,0 \text{ MPa}$)	142
Rys. 6-7 Porównanie modelu proponowanego do danych eksperymentalnych na tle modeli literaturowych – odkształcenie w funkcji czasu, próbka RPE_15 ($\sigma_0 = 11,0 \text{ MPa}$)	143
Rys. 6-8 Wartości wyznaczonych parametrów modelu proponowanego (6.1) w zależności od wartości naprężenia początkowego badanych próbek pełzania przy zginaniu. Parametry modelu: a) B_1 , b) B_2 , c) B_3 , d) T_1 , e) T_2 , f) T_3	146
Rys. 6-9 Zależność wyznaczonego modułu odkształcenia przy naprężeniach początkowych od czasu badania próbki wraz z ekstrapolacją w czasie	148
Rys. 6-10 Zależność wyznaczonego modułu odkształcenia przy naprężeniach początkowych od czasu badania próbki wraz z ekstrapolacją w czasie	150
Rys. 7-1 Porównanie wyników pomiarów i aproksymacji za pomocą funkcji modelu (aproksymacja łączna wyników wszystkich próbek)	158
Rys. 7-2 Zmiana siecznego modułu odkształcenia w funkcji naprężenia normalnego i czasu trwania obciążenia	159
Rys. 7-3 Zależność modułu odkształcenia E od naprężenia nominalnego σ_0 dla prognozowanego czasu 1000h oraz 100 lat	160
Rys. 7-4 Odkształcenie długookresowe ε_L w funkcji naprężenia początkowego σ_0 wyznaczone za pomocą równania (7.2)	162
Rys. 7-5 Izochrony odkształcenia $\varepsilon(t)$ oraz długookresowego ε_L w funkcji naprężenia początkowego σ_0 wyznaczone za pomocą równania (7.2)	163
Rys. 7-6 Analiza czułości parametrów modelu konstytutywnego a) wykres radarowy b) wykres krzywych czułości	165
Rys. 7-7 Wykres odchyłeń wartości odkształceń wyznaczonych za pomocą modelu konstytutywnego względem wartości pomierzonych dla aproksymacji każdej z próbek niezależnie	166
Rys. 7-8 Wykres odchyłeń wartości odkształceń wyznaczonych za pomocą modelu konstytutywnego względem wartości pomierzonych w przedziale czasowym od 100 do 200h badania	167
Rys. 7-9 Wykres odchyłeń wartości odkształceń wyznaczonych za pomocą modelu konstytutywnego względem wartości pomierzonych	168
Rys. 7-10 Zmienność estymacji wartości odkształcenia ε_L za pomocą modelu konstytutywnego wyznaczonego na podstawie określonego czasu badania próbki	168
Rys. 7-11 Krzywa naprężenie-odkształcenie dla chwili czasowej 1000h, zaimplementowana do modelu Response Function w ANSYS	170
Rys. 7-12 Model CAD próbki a) „wiosółka” b) belki pryzmatycznej, użytych do kalibracji parametrów proponowanego modelu w ANSYS	171
Rys. 7-13 Model dyskretny MES próbki a) „wiosółka” b) belki pryzmatycznej, użytych do weryfikacji obliczonych ugięć z wynikami eksperymentalnymi na podstawie proponowanego modelu konstytutywnego	172
Rys. 7-14 Wykres korelacyjny: odkształcenie obliczone (MES) w funkcji odkształcenia pomierzonego, uzyskanego z badań eksperymentalnych pełzania przy rozciąganiu w chwili czasowej 1000h	174
Rys. 7-15 Wykres korelacyjny: wydłużenie obliczone (MES) w funkcji wydłużenia pomierzonego, uzyskanego z badań eksperymentalnych pełzania przy rozciąganiu w chwili czasowej 1000h	174
Rys. 7-16 Wyniki obliczeń MES dla próbki 2_e5_07 (9MPa): a) odkształcenia b) naprężenia normalne. Skala skażona (5x)	175
Rys. 7-17 Wykres korelacyjny: ugięcie obliczone (MES) w funkcji ugięcia pomierzonego, uzyskanego z badań eksperymentalnych pełzania przy zginaniu w chwili czasowej 1000h	176

Rys. 7-18 Zależność wyników ugięcia uzyskanych z obliczeń MES z wynikami badań eksperymentalnych pełzania przy zginaniu w chwili czasowej 1000h w funkcji naprężenia początkowego	178
Rys. 7-19 Wyniki odkształceń belki zginanej uzyskanych z obliczeń MES: próbka RPE_14 w chwili czasowej 1000h.....	179
Rys. 7-20 Schemat trójpunktowego zginania belki z tworzywa HDPE, ilustrujący wpływ grubości przekroju na gradient naprężeń (rozciągających i ściskających) oraz jego związek z intensyfikacją procesów degradacji materiału (h_1 , h_2 to grubości belki, l to rozpiętość belki, przerywana linia to gradient naprężeń belki o grubości h_1).....	181

English

Fig. 2-1 DN2400 HDPE tank before installation at the construction site (photo Dąbska A.)	21
Fig. 2-2 HDPE tank with end cap: a) spherical (<i>EELIX - Horizontal Tanks</i> , 2024), b) flat (<i>Amargo - Zbiorniki podziemne</i> , 2024).....	22
Fig. 2-3 HDPE tank with end cap: a) spherical reinforced with supports (<i>Amargo – Zbiorniki podziemne</i> , 2024), b) flat stiffened with so-called ribs (<i>KAI – Underground Tank</i> , 2024) ...	22
Fig. 2-4 Arrangement of double-walled structural tanks in a so-called battery: a) scheme (<i>Europlast – zbiorniki strukturalne trzywarstwowe</i> , 2024), b) implementation of tank installation on site (<i>Uponor Infra...</i> , 2019).....	23
Fig. 2-5 Extrusion welding of HDPE tank components: a) manual, b) automatic (<i>System Weholite...</i> , 2021).....	23
Fig. 2-6 Double-walled tank with flat end cap during installation in excavation (<i>Wobet-Hydret Zbiorniki bezodpływowe</i> , 2016)	26
Fig. 2-7 Scheme of tank location in the field on natural low-permeability soil during heavy rainfall events (own study)	26
Fig. 2-8 Scheme of soil and water interactions on an underground HDPE tank: a) cross-section, b) longitudinal section (own study).....	28
Fig. 2-9 Change soil-structure (backfill-end cap) interaction condition due to the end cap deflection (own study)	30
Fig. 2-10 Soil backfills deformation characteristics in the end cap deflection zone: a) resultant displacements, b) displacement vectors (own study).....	31
Fig. 3-1 HDPE polyethylene granulate (Antypas, 2020): a) raw material, b) coloured material	33
Fig. 3-2 Mer structure for polyethylene (Posch, 2011)	34
Fig. 3-3 Scheme of polymer structure: a) amorphous, b) semi-crystalline, c) crystalline. Wavy lines symbolize disordered segments of polymer chains, while the ordered fragments (indicated in bold) correspond to crystalline regions (Piergiovanni i Limbo, 2016)	38
Fig. 3-4 Framework and complex crystalline chain model: a) regularly arranged, b) irregularly arranged (Flory i Yoon, 1978).....	39
Fig. 3-5 Dependence longitudinal change on temperature for selected materials (Bednarz i Dąbska, 2021; Oh i Yoon, 2012)	41
Fig. 3-6 Creep curve of a solid body over time: a) plot of stress variation in time: black line – nominal stress, red line – true stress in the specimen cross-section, b) plot of strain ε (deflection f) variation in time: I – primary stage, II – secondary stage, III – tertiary stage (Jakowluk, 1993)	44
Fig. 3-7 Scheme of relaxation and retardation in time. Creep (retardation): after an instantaneous step of constant stress a), strain increases over time and asymptotically approaches the limit value b). Relaxation: after an instantaneous step of constant strain c), stress decays with time, typically exponentially d) (Geiß i Schumann, 2017)	47
Fig. 3-8 Stress-strain-time relationships in viscoelastic materials (Bozorg-Haddad i in., 2010)	48

Fig. 3-9 Principal curvatures for the $\ln J$ versus $\log t$ relation (Janson, 1993)	49
Fig. 3-10 The creep compliance as a function of retardation time λ_2 (Ward i Sweeney, 2013).....	50
Fig. 3-11 Creep curves of polyethylene at room temperature (75°F) (Findley, 1987)	58
Fig. 3-12 Creep strains of samples of different dimensions: 10 x 0.2 mm (black line), 5 x 0.5 mm (red line) under axial tension with constant, controlled stress (t / s – time in seconds) (Nitta i Maeda, 2010).....	65
Fig. 3-13 Scheme of oxidation of the amorphous region in a semi-crystalline polymer by UV radiation causing chain scission (Rabek, 1996)	66
Fig. 5-1 Shape and basic dimensions of a dogbone type specimen for creep testing under tension, compliant with the standard ISO 527-2:1993	75
Fig. 5-2 Tensile strength testing on a Heckert machine: a) force measurement dial and displacement indicator, b) specimen at the necking stage.....	76
Fig. 5-3 Specimens after completion of tensile testing: a) fractured specimen, b) specimen elongated to the limit of the testing machine's range	76
Fig. 5-4 Tensile testing under controlled displacement on a Heckert tensile testing machine. On the left, the force reading dial; on the right, the specimen mounted in the machine grips with a clip-on extensometer measuring specimen elongation	78
Fig. 5-5 Stress-strain relationship for d/e4/3 sample (PE material) in the tensile test. The blue curve represents the predicted stabilization of the maximum normal stress under long-term loading conditions	79
Fig. 5-6 Relaxation process of d/e4/3 sample (PE material) in the tensile test	80
Fig. 5-7 Stress–strain relationship for d/e4/4 sample (PE material) in the tensile test. The blue curve shows the predicted stabilization of the maximum normal stress under long-term loading conditions	80
Fig. 5-8 Relaxation process of d/e4/4 sample (PE material) in the tensile test	81
Fig. 5-9 Specimen S_M3 prepared for testing: a) top view, b) side view	82
Fig. 5-10 Compression test, specimen S_M3: a) specimen before testing, b) specimen after reaching maximum load.....	83
Fig. 5-11 Compression test graph – stress versus strain relationship, specimen S_M3	83
Fig. 5-12 Benches for creep testing of plastics under bending and tension	85
Fig. 5-13 Creep at bending testing bench: a) general view of the platform, b) individual measurement station, c) weights for applying constant load to specimens, d) data acquisition device and electronic thermometer.....	87
Fig. 5-14 Specimens for creep bending tests: a) top view of the specimen, b) side view of the specimen.....	88
Fig. 5-15 Distribution of geometric and Z-score for parameters of cross-sections of bending specimens: a) width, b) thickness, c) moment of inertia.....	89
Fig. 5-16 Distribution of initial stresses for bending specimens	91
Fig. 5-17 Maximum values of creep compliance $J(t_{max})$ as a function of initial stress σ_0 The values are grouped by material type and span ($N = 24$)	96
Fig. 5-18 Maximum values of creep compliance $J(t_{max})$ as a function of specimen span l . The values are grouped by material type ($N = 24$)	97
Fig. 5-19 Maximum values of creep compliance $J(t_{max})$ as a function of specimen thickness h . The values are grouped by material type and span ($N = 24$)	98
Fig. 5-20 Mean creep compliance $J(t)$ as a function of time. The curves are grouped by material type and span. The semi-transparent shaded areas indicate the confidence interval at each time point for p -value=0,05	99
Fig. 5-21 Three-factor analysis of variance (ANOVA) for material type (Typ), span (l), and specimen thickness (h) at seven selected time points. The analysis was performed for all tested	

samples, excluding those that reached the tertiary creep stage (sample size: N=22 for 1 to 500h, and N=16 for 1000h).....	101
Fig. 5-22 Maximum strain versus initial stress for specimens subjected to bending creep.....	103
Fig. 5-23 Concept of measurement benches for creep testing under tension: a) side view, b) front view, c) 3D view	104
Fig. 5-24 Benches for creep testing at tensile loading.....	105
Fig. 5-25 Creep at tensile testing benches: a) weights on the ends of steel arms, b) specimen grip with measurement sensor	105
Fig. 5-26 Distribution of geometric and Z-score for parameters of cross-sections of tensile specimens: a) width, b) thickness, c) moment of inertia	107
Fig. 5-27 Creep curves – strain ε of PE specimens under tension as a function of time.....	110
Fig. 5-28 Creep compliance $J(t)$ of PE specimens under uniaxial tension testing as a function of time.....	111
Fig. 5-29 Mean creep compliance $J(t)$ as a function of time. The semi-transparent shaded area indicate the spread of results at each time point for p-value=0,05.....	112
Fig. 5-30 Maximum values of creep compliance $J(t_{max})$ as a function of initial stress σ_0	113
Fig. 5-31 Plot of maximum strain $\varepsilon(t_{max})$ as a function of initial stress σ_0 for specimens subjected to creep under tension	114
Fig. 5-32 DSC curves of HDPE specimens: a) heating – stage 1, b) cooling, c) heating – stage 2	119
Fig. 5-33 Matching the HDPE spectrum to the reference library standard	121
Fig. 5-34 FTIR-ATR spectra of the tested HDPE samples.....	121
Fig. 5-35 Comparative imaging of PE and RPE material structures at different magnifications: a) 50-200x, b) 2000x, c) 5000x.....	123
Fig. 5-36 Polymer microstructure at the fracture site of the sample e6_02: a) 100x magnification, b) 450x magnification.....	124
Fig. 5-37 Polymer microstructure in the necking region of sample e6_3: a) brittle fracture, b) tensile specimen – visible spherical elements	124
Fig. 5-38 RPE DN1000 SN4 end cap prepared for testing: a) measurement of external deflection, b) measurement of internal deflection. Visible stiffening ring fitted around the circumference of the end cap	126
Fig. 5-39 Geometric model of DN1000 SN4 end cap and press plates adopted for calculations in the Ansys Mechanical environment	129
Fig. 5-40 Comparison graph of average deflection measurements from compression tests of DN1000 SN4 end caps and FEM simulation results (Ansys Mechanical) for assumed deformation modulus values of $E = 400$ and 450 MPa	130
Fig. 5-41 Deflection distribution of the end cap at the final loading step: a) 3D view, b) cross-section, c) top view	131
Fig. 5-42 Principal stress distribution: a) minimum (zones of highest compression), b) maximum (zones of highest tension).....	132
Fig. 6-1 Comparison of literature models fitting to experimental data – strain vs. time, specimen PE_01 (3,0 MPa).....	137
Fig. 6-2 Comparison of literature models fitting to experimental data – strain vs. time, specimen PE_08 (6,0 MPa).....	138
Fig. 6-3 Comparison of literature models fitting to experimental data – strain vs. time, specimen RPE_15 (11,0 MPa).....	139
Fig. 6-4 Comparison of the proposed model with experimental data against literature models – strain as a function of time,, specimen PE_07 ($\sigma_0 = 3,0$ MPa)	141
Fig. 6-5 Comparison of the proposed model with experimental data against literature models – strain as a function of time, specimen RPE_08 ($\sigma_0 = 6,0$ MPa)	142

Fig. 6-6 Comparison of the proposed model with experimental data against literature models – strain as a function of time, specimen RPE_04 ($\sigma_0 = 9,0 \text{ MPa}$)	142
Fig. 6-7 Comparison of the proposed model with experimental data against literature models – strain as a function of time, specimen RPE_15 ($\sigma_0 = 11,0 \text{ MPa}$)	143
Fig. 6-8 Values of the identified parameters of the proposed model (6.1) versus the initial stress level for specimens subjected to flexural creep. Parameters of model: a) B_1 , b) B_2 , c) B_3 , d) T_1 , e) T_2 , f) T_3	146
Fig. 6-9 Strain modulus vs. testing time at initial stresses (with extrapolation)	148
Fig. 6-10 Strain modulus vs. testing time at initial stresses (with extrapolation in time)	150
Fig. 7-1 Comparison of experimental results with model function approximation (approximation of all specimens)	158
Fig. 7-2 Change of the secant modulus of deformation as a function of normal stress and load duration	159
Fig. 7-3 Relationship between modulus E and initial stress σ_0 at the predicted times of 1000h and 100 years.	160
Fig. 7-4 Long-term strain ε_L as a function of initial stress σ_0 determined using Equation (7.2)	162
Fig. 7-5 Isochrones of strain $\varepsilon(t)$ and long-term strain ε_L as a function of initial stress σ_0 determined using Equation (7.2)	163
Fig. 7-6 Sensitivity analysis of constitutive model parameters a) radar chart b) sensitivity curve chart	165
Fig. 7-7 Deviation of model-predicted strain values from experimental measurements for independent approximation each sample.	166
Fig. 7-8 Deviations of strain values predicted by the constitutive model relative to the measured values over the 100-200 h segment of the test	167
Fig. 7-9 Deviation of model-predicted strain values from experimental measurements	168
Fig. 7-10 Deviation of model-predicted strain values from experimental measurements	168
Fig. 7-11 Stress-strain curve at 1000 h, implemented in the Response Function model in ANSYS ..	170
Fig. 7-12 CAD model of the a) dog-bone b) prismatic beam specimen, used to calibrate the model parameters in ANSYS	171
Fig. 7-13 Discreet FEM model of the a) dog-bone b) prismatic specimen used to verify calculated deflections against experimental results based on the proposed constitutive model	172
Fig. 7-14 Correlation plot: FEM-calculated strain as a function of experimentally measured creep strain at 1000h	174
Fig. 7-15 Correlation plot: FEM-calculated strain as a function of experimentally measured creep strain at 1000h	174
Fig. 7-16 FEM results for specimen 2_e5_07 (9 MPa): a) strains, b) normal stresses. Scale exaggerated (5x)	175
Fig. 7-17 Correlation plot: FEM-calculated deflection as a function of experimentally measured creep deflection in bending at 1000h	176
Fig. 7-18 Relationship between FEM-calculated deflections and experimental creep bending results at 1000h as a function of initial stress	178
Fig. 7-19 Bending-beam strain results from FEM: specimen RPE_14 at 1000 h	179
Fig. 7-20 Three-point-bending scheme of an HDPE beam illustrating how cross-section thickness (h_1 , h_2) influences the tensile-compressive stress gradient and its link to accelerated material degradation processes (l – beam span, dashed line – gradient of stress for beam with thickness h_1)	181

Spis tabel

Polski

Tabela 3-1 Rodzaje polietylenu i jego charakterystyczne parametry	34
Tabela 3-2. Podatność na pełzanie polietylenu HDPE (Beijer i Spoormaker, 2000; Janson, 1993; Ward i Sweeney, 2013)	50
Tabela 3-3. Empiryczne formuły obliczeniowe do wyznaczenia odkształceń materiałów lepkosprężystych przy pełzaniu w czasie.....	52
Tabela 3-4. Zestawienie modeli do opisu pełzania materiałów lepkosprężystych pod względem zakresu stosowalności i weryfikacji laboratoryjnej.....	69
Tabela 5-1 Program badań laboratoryjnych	74
Tabela 5-2 Zestawienie wyników badań HDPE przy rozciąganiu – próba niszcząca	77
Tabela 5-3 Zestawienie wymiarów próbek rozciąganych przy wymuszonym przemieszczeniu i wartości charakterystycznych danych pomiarowych.....	78
Tabela 5-4 Zestawienie wymiarów próbek z krótkookresowych testów ściskania i wyników przeprowadzonych testów.....	83
Tabela 5-5 Zestawienie parametrów obciążenia badanych próbek HDPE – pełzanie przy zginaniu trójpunktowym.....	91
Tabela 5-6 Zestawienie parametrów testu i wyników badań próbek HDPE – pełzanie przy zginaniu trójpunktowym.....	95
Tabela 5-7 Wyniki testu Shapiro-Wilka reszt modelu trójczynnikowego ANOVA na podstawie wszystkich badanych próbek z odrzuceniem próbek, które osiągnęły III stadium pełzania (N = 22)	100
Tabela 5-8 Zestawienie parametrów obciążenia i czasu badania próbek w teście pełzania HDPE przy rozciąganiu	108
Tabela 5-9 Zestawienie pomiarów maksymalnego wydłużenia i maksymalnego odkształcenia i podatności próbek w teście pełzania HDPE przy rozciąganiu.....	109
Tabela 5-10 Parametry materiałowe wyznaczone na podstawie krzywych DSC.....	120
Tabela 5-11 Zestawienie parametrów i wyników badań ściskania dennic DN1000	127
Tabela 5-12 Zestawienie wyników aproksymacji i ocena zmienności pomiarów.....	128
Tabela 6-1 Statystyki R^2 dopasowania modeli literaturowych do danych eksperymentalnych pełzania przy zginaniu	136
Tabela 6-2 Zestawienie parametrów proponowanego modelu materiałowego wyznaczonych poprzez aproksymację dla każdej z badanych próbek pełzania przy zginaniu	145
Tabela 7-1 Zestawienie wyników: odkształcenie próbki - model, wraz z prognozą na okres 100 lat (876000h).....	157
Tabela 7-2 Analiza czułości parametrów modelu konstytutywnego	164
Tabela 7-3 Zestawienie wyników obliczeń MES wydłużenia i odkształcenia próbek poddanych pełzaniu przy rozciąganiu oraz porównanie z wynikami badań eksperymentalnych w chwili czasowej 1000h	172
Tabela 7-4 Zestawienie wyników obliczeń MES ugięcia belek zginanych oraz porównanie z wynikami badań eksperymentalnych w chwili czasowej 1000h.....	177

Table 3-1 Polyethylene types and characteristic parameters	34
Table 3-2 Creep compliance of HDPE polyethylene (Beijer i Spoormaker, 2000; Janson, 1993; Ward i Sweeney, 2013)	50
Table 3-3 Empirical formulas for calculating time-dependent creep strains in viscoelastic materials..	52
Table 3-4 Overview of models for describing creep in viscoelastic materials with respect to applicability range and laboratory verification	69
Table 5-1 Laboratory testing program	74
Table 5-2 Summary of HDPE tensile test results – destructive testing	77
Table 5-3 Summary of tensile specimen dimensions under imposed displacement and characteristic measurement values	78
Table 5-4 Summary of specimen dimensions from short-term compression tests and corresponding test results	83
Table 5-5 Summary of loading parameters for the tested HDPE specimens – three-point bending creep	91
Table 5-6 Summary of test parameters and results for HDPE specimens – creep in three-point bending	95
Table 5-7 Shapiro-Wilk test results for residuals of the three-factor ANOVA model (excluding specimens that reached tertiary creep) (N = 22)	100
Table 5-8 Summary of loading parameters and testing time of specimens in the HDPE tensile creep test	108
Table 5-9 Summary of measurements of maximum elongation and calculated maximum strain and compliance of tested specimens in the HDPE tensile creep test	109
Table 5-10 Material parameters determined from DSC curves	120
Table 5-11 Summary of parameters and results of compression tests of DN1000 end caps	127
Table 5-12 Summary of approximation results and assessment of measurement variability	128
Table 6-1 R ² statistics for fitting literature models to experimental data of flexural creep	136
Table 6-2 Summary of the proposed material model parameters determined by approximation for each of the bending creep specimens	145
Table 7-1 Summary of results: sample strain – model, prediction for 100 years (8760000 hours).....	157
Table 7-2 Sensitivity analysis of constitutive model parameters	164
Table 7-3 Summary of comparison of FEM-calculated elongation and strain for tensile creep test with experimental results at 1000h	172
Table 7-4 Summary of comparison of FEM-calculated deflections of bending beams with experimental results at 1000h	177

Załącznik 1

Zestawienie wyników analizy statystycznej

Tabela Z1-1 Zestawienie charakterystycznych parametrów badanych próbek w teście pelzania HDPE przy zginaniu trójpunktowym

Lp.	Nazwa próbki	Typ materiału	Szerokość średnia b	Niepewność U_b	Odchylenie standardowe SD_b	Grubość średnia h	Niepewność U_h	Odchylenie standardowe SD_h	Moment bezwładności I	Niepewność U_I	Odchylenie standardowe SD_I
-	-	-	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
1	PE_01	PE	34,66	0,24	0,58	10,41	0,03	0,07	3258,4	36,1	85,4
2	PE_02	PE	36,20	0,37	0,92	10,47	0,06	0,15	3462,3	69,2	172,9
3	PE_03	PE	35,15	0,47	1,16	13,55	0,05	0,11	7287,2	126,5	298,9
4	PE_04	PE	34,78	0,24	0,60	13,45	0,02	0,05	7052,0	57,9	144,9
5	PE_05	PE	35,76	0,13	0,32	13,72	0,07	0,17	7696,2	121,1	294,3
6	PE_06	PE	36,48	0,20	0,50	13,78	0,08	0,18	7954,7	145,2	330,2
7	PE_07	PE	37,21	0,27	0,67	13,61	0,07	0,18	7817,2	133,3	340,6
8	PE_08	PE	35,38	0,23	0,56	13,42	0,02	0,04	7125,8	56,2	129,5
9	RPE_01	RPE	37,35	0,28	0,70	12,46	0,23	0,55	6020,9	336,5	805,3
10	RPE_02	RPE	35,79	0,18	0,44	11,90	0,10	0,25	5026,0	129,2	322,7
11	RPE_03	RPE	36,57	0,15	0,36	11,94	0,08	0,20	5187,5	106,4	265,6
12	RPE_04	RPE	36,15	0,24	0,60	11,93	0,08	0,19	5115,0	108,4	258,7
13	RPE_05	RPE	36,55	0,29	0,72	15,52	0,22	0,53	11386,3	492,6	1187,9
14	RPE_06	RPE	34,48	0,33	0,80	11,59	0,09	0,22	4473,4	112,7	275,1
15	RPE_07	RPE	35,28	0,46	1,13	14,99	0,14	0,34	9902,7	306,0	744,7
16	RPE_08	RPE	34,70	0,21	0,50	12,56	0,20	0,49	5729,5	275,9	675,6
17	RPE_09	RPE	34,21	0,61	1,49	14,67	0,06	0,16	9000,4	194,8	490,3
18	RPE_10	RPE	35,56	0,50	1,21	11,58	0,05	0,11	4601,6	88,0	204,2
19	RPE_11	RPE	37,96	0,34	0,83	14,79	0,09	0,22	10234,1	208,1	508,6
20	RPE_12	RPE	35,39	0,54	1,32	14,95	0,11	0,28	9854,2	264,4	664,6
21	RPE_13	RPE	37,47	0,31	0,76	11,72	0,06	0,14	5026,7	87,7	207,0
22	RPE_14	RPE	35,39	0,39	0,96	10,41	0,07	0,16	3327,0	76,5	178,0
23	RPE_15	RPE	35,61	0,17	0,41	10,35	0,05	0,13	3290,1	50,2	129,6
24	RPE_16	RPE	38,05	0,23	0,57	10,44	0,07	0,17	3608,1	75,8	184,4

Przykłady obliczenia niepewności pomiarowych i odchylenia standardowego

$$u_B(F) = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,289 \text{ [N]} - \text{waga hakowa zakres: 0-3 kN, } \Delta = 1 \text{ N}$$

$$u_B(l) = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,289 \text{ [mm]} - \text{linijka: } \Delta = 1 \text{ mm}$$

$$u_B(b), u_B(h) = \frac{0,02}{\sqrt{12}} = 0,00578 \text{ [mm]} - \text{suwmiarka: } \Delta = 0,02 \text{ mm}$$

$$U_b = k \times \sqrt{u_A(b)^2 + u_B(b)^2}$$

$$k = 2$$

Moment bezwładności:

$$I = \frac{b \times h^3}{12}$$

$$U_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial b} U_b\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial h} U_h\right)^2}$$

$$SD_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial b} SD_b\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial h} SD_h\right)^2}$$

Naprężenie początkowe przy zginaniu:

$$\sigma_0 = \frac{F l h}{8I}$$

$$U_{\sigma_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial F} U_F\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial l} U_l\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial h} U_h\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial I} U_I\right)^2}$$

Uzupełnienie analizy z rozdziału 5.4.2.4.

Analiza wariancji, $N=24$ próbki

Analiza polegała na wykonaniu testu trójczynnikowej wariancji ANOVA. Przeprowadzono test Shapiro-Wilka na resztach uzyskanych z modelu trójczynnikowego ANOVA, osobno dla każdego analizowanego czasu dla wszystkich badanych próbek stawiając hipotezę o normalności rozkładu reszt.

Tabela Z1-2 Wyniki testu Shapiro-Wilka reszt modelu trójczynnikowego ANOVA na podstawie wszystkich badanych próbek.

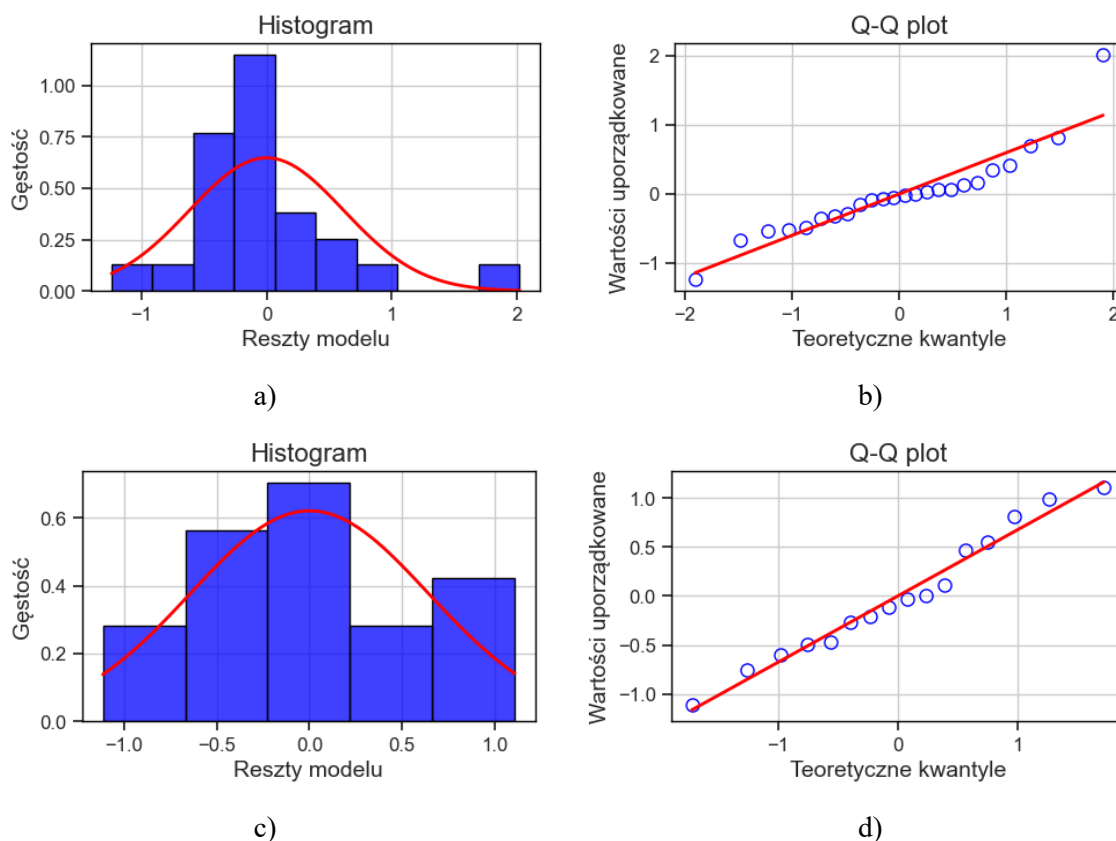
Table Z1-2 Results of the Shapiro-Wilk test of residuals from the three-factor ANOVA model based on all tested samples

Czas	p-value	Liczba próbek	Interpretacja
1h	0,294	24	Normalność reszt potwierdzona
6h	0,152	24	Normalność reszt potwierdzona
12h	0,062	24	Normalność reszt potwierdzona (blisko 0,05)
24h	0,014	24	Normalność reszt odrzucona
100h	0,425	23	Normalność reszt potwierdzona
500h	0,604	23	Normalność reszt potwierdzona
1000h	0,814	16	Normalność reszt potwierdzona

Wyniki testu Shapiro-Wilka przedstawione w Tabeli Z1-2 wskazują, że dla większości analizowanych czasów nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt ($p > 0,05$). Oznacza to, że założenie normalności, kluczowe dla poprawności wnioskowania w ANOVA, zostało spełnione dla czasów: max, 1h, 6h, 12h, 100h, 500h oraz 1000h. Wyjątek stanowi czas 24h, dla którego wartość p była istotnie mniejsza od progu istotności ($p = 0,014$), co sugeruje, że rozkład reszt w tym przypadku odbiega od normalnego. W związku z tym wyniki analizy wariancji dla tego czasu należy interpretować z ostrożnością, a w razie potrzeby rozważyć zastosowanie testów nieparametrycznych lub transformacji danych. Ogólnie jednak, dla większości przedziałów czasowych, wyniki ANOVA można uznać za wiarygodne pod względem spełnienia założeń statystycznych.

Na Rys. Z1-1 przygotowano wykresy przedstawiające rozkład reszt modelu trójczynnikowego dla podatności $J(t)$ w przedziałach czasowych gdzie normalność reszt nie została potwierdzona (24h) oraz gdzie uzyskano największą wartość p -value (1000h). Na każdym wykresie przedstawiono histogram reszt z nałożoną teoretyczną krzywą rozkładu normalnego oraz wykres Q-Q plot (quantile-quantile plot), który umożliwia wizualną ocenę zgodności rozkładu reszt z rozkładem normalnym. Histogram pozwala zobaczyć, czy rozkład

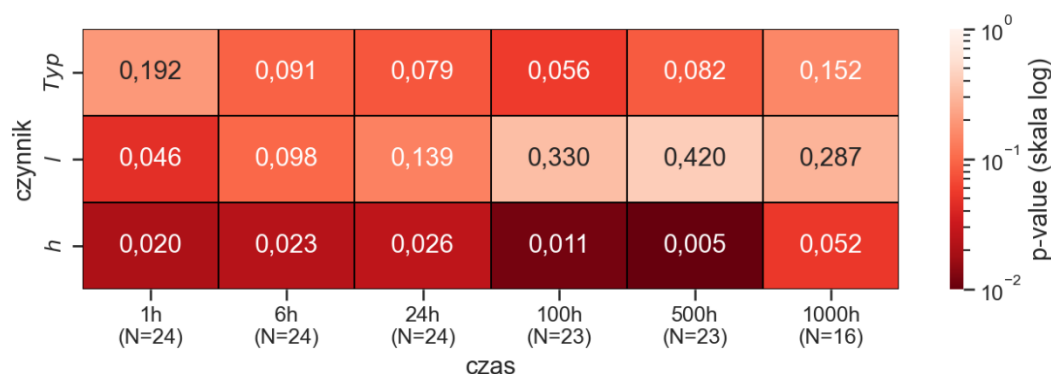
reszt jest symetryczny i zbliżony do normalnego, natomiast Q-Q plot pokazuje, na ile wartości empiryczne reszt pokrywają się z wartościami oczekiwanymi dla rozkładu normalnego. W przypadku gdy punkty na Q-Q plot układają się wzdłuż prostej, można uznać, że rozkład reszt nie odbiega istotnie od normalnego, co potwierdza spełnienie kluczowego założenia ANOVA (Dembńska, 2021; Koronacki & Mielniczuk, 2006).



Rys. Z1-1 Reszty modelu ANOVA dla podatności $J(t)$ - wszystkie próbki:
a) histogram dla 24h, b) Q-Q plot dla 24h c) histogram dla 1000h, d) Q-Q plot dla 1000h

Fig. Z1-1 Residuals of the ANOVA model for creep compliance $J(t)$ - all samples:
a) Histogram for 24h, b) Q-Q plot for 24h, c) Histogram for 1000h, d) Q-Q plot for 1000h

Rys. Z1-2 przedstawia wyniki trójczynnika analizy wariancji (ANOVA) przeprowadzonej dla pełnego zbioru danych, obejmującego wszystkie 24 próbki w przedziale czasowym od 1 do 24 godzin, 23 próbki dla 100 i 500 godzin oraz 16 próbek dla 1000 godzin. W analizie uwzględniono trzy czynniki: typ materiału (T_{yp}), rozstaw podpór (l) oraz grubość próbki (h). Wykresy p-wartości dla każdego czynnika i interakcji pozwalają ocenić, które z nich mają istotny wpływ na podatność na pełzanie w poszczególnych chwilach czasowych.



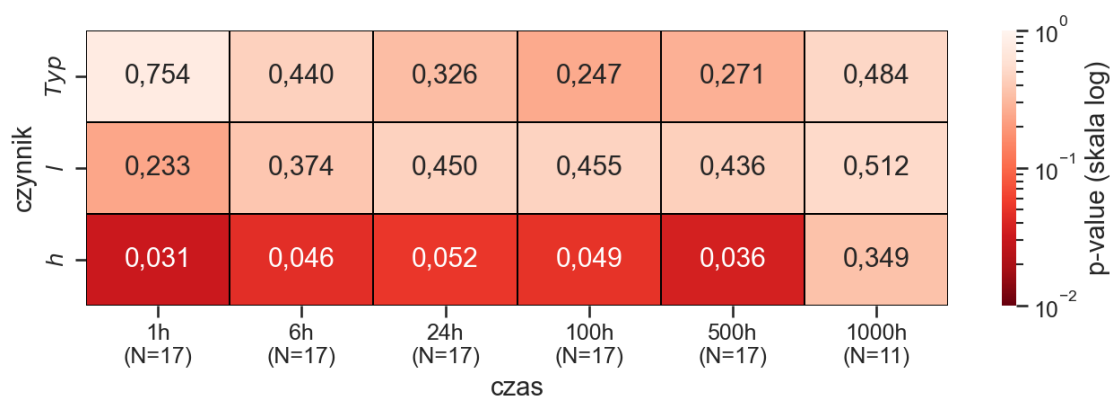
Rys. Z1-2 Trójczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) dla Typu materiału (Typ), rozstawu (l) i grubości próbek (h) w wybranych siedmiu chwilach czasowych. Wykres dla wszystkich zbadanych próbek (liczba próbek N=24 od 1 do 24h, N=23 od 100 do 500h oraz N=16 dla 1000h)

Fig. Z1-2 Three-way analysis of variance (ANOVA) for material type (Typ), span (l), and specimen height (h) at seven selected time points. The analysis was performed for all tested samples (sample size: N=24 for 1 to 24h, N=23 for 100 to 500h, and N=16 for 1000h)

Analiza pełnego zbioru próbek pozwoliła uchwycić ogólne trendy i zależności w badanej populacji. Wartości p dla grubości próbki są najmniejsze spośród wszystkich czynników i wszystkie analizowane czasy pełzania (od 1h do 500h) utrzymują się poniżej progu istotności statystycznej ($p < 0,05$). Najmniejsze wartości p obserwujemy po 100h ($p = 0,011$) i 500h ($p = 0,005$), co jednoznacznie wskazuje, że grubość próbki ma statystycznie istotny wpływ na podatność na pełzanie w całym badanym okresie, a jej znaczenie rośnie wraz z czasem trwania obciążenia. Dopiero w 1000h wartość p nieznacznie przekracza próg istotności ($p = 0,052$), co może głównie wynikać z mniejszej liczby próbek w tej grupie. Dla rozstawu podpór istotność statystyczna ($p < 0,05$) występuje wyłącznie w pierwszej godzinie badania ($p = 0,046$). W kolejnych przedziałach czasowych wartości p rosną i przekraczają próg istotności, co może oznaczać, że wpływ rozstawu podpór na podatność jest zauważalny tylko na początku testu, a w miarę upływu czasu staje się nieistotny. Wartości p dla typu materiału (PE vs. RPE) są przez cały czas powyżej progu istotności (najmniejsza $p = 0,056$ w 100h), co oznacza, że nie ma przesłanek do wnioskowania, że typ materiału ma statystycznie istotny wpływ na podatność na pełzanie w analizowanych przedziałach czasowych. Wszystkie interakcje (Typ vs l, Typ vs h, l vs h) mają wartości p znacznie powyżej 0,05 w całym zakresie czasowym, co oznacza, że nie zaobserwowano istotnych efektów synergii pomiędzy czynnikami. Wpływ każdego czynnika jest niezależny od pozostałych. Wraz z wydłużaniem czasu badania, istotność wpływu grubości próbki na podatność na pełzanie staje się coraz wyraźniejsza (najmniejsze p w 500h), podczas gdy wpływ rozstawu podpór zanika, a typ materiału i interakcje pozostają nieistotne przez cały czas.

Analiza wariancji, $N=17$ próbek (o $\sigma_0 = 8$ MPa)

Aby jednoznacznie wykluczyć wpływ znaczących obciążeń na populację testów podjęto próbę analizy rozkładu normalności a następnie trójczynnikową analizę wariancji ograniczonej do próbek, które były poddane naprężeniu początkowemu o wartości mniejszej niż 8,0 MPa. W tej grupie liczba próbek wynosi 17 dla przedziału 1-500 godzin oraz 11 dla 1000 godzin. Analiza ta pozwala na ocenę wpływu czynników konstrukcyjnych i materiałowych w warunkach umiarkowanego obciążenia, eliminując wpływ bardzo wysokich naprężeń, które mogą prowadzić do nieliniowych efektów pełzania. Test Shapiro-Wilka wykazał, że we wszystkich chwilach czasowych rozkład reszt jest normalny a najniższa wartość p-value wyniosła 0,485 dla 100h. Można więc uznać, że są podstawy do przeprowadzenia takiej analizy. Wyniki przedstawiono na Rys. Z5-3.



Rys. Z1-3 Trójczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) dla Typu materiału (Typ), rozstawu (l) i grubości próbek (h) w wybranych siedmiu chwilach czasowych. Wykres dla próbek o wartości naprężenia początkowego $\sigma_0 < 8,0$ MPa (liczba próbek $n=17$ od 1 do 500h oraz $n=11$ dla 1000h).

Fig. Z1-3 Three-way analysis of variance (ANOVA) for material type (Typ), span (l), and specimen height (h) at seven selected time points. The analysis was performed for samples with initial stress $\sigma_0 < 8,0$ MPa (sample size: $n=17$ for 1 to 500h, and $n=11$ for 1000h).

Po wykluczeniu próbek obciążonych naprężeniem początkowym większym od 8,0 MPa wartości p dla grubości próbki są najmniejsze spośród wszystkich czynników i w pierwszych sześciu przedziałach czasowych (od 1h do 500h) utrzymują się poniżej lub bardzo blisko progu istotności statystycznej ($p < 0,05$). Najmniejsze wartości p obserwujemy w 100h ($p = 0,036$) i 500h ($p = 0,049$), a także w 1h ($p = 0,031$) i 6h ($p = 0,046$). W 1000h wartość p (0,349) jest już wyraźnie powyżej progu istotności, co może wynikać z mniejszej liczby próbek w tej grupie. Oznacza to, że grubość próbki wciąż pozostaje istotnym czynnikiem wpływającym na podatność na pełzanie nawet w warunkach umiarkowanego obciążenia. Wartości p dla typu materiału (PE vs. RPE) są przez cały czas powyżej progu istotności (najmniejsza $p = 0,247$

w 100h), co oznacza, że typ materiału nie ma statystycznie istotnego wpływu na podatność na pełzanie w żadnym z analizowanych przedziałów czasowych, gdy analizujemy tylko próbki o mniejszej wartości naprężenia początkowego. Wartości p dla rozstawu podpór są wyraźnie większe niż dla grubości próbki i w żadnym z analizowanych czasów nie spadają poniżej progu istotności (najmniejsza $p = 0,233$ w 1h). Oznacza to, że rozstaw podpór nie ma istotnego wpływu na podatność na pełzanie w tej grupie próbek. Wszystkie interakcje (Typ vs l , Typ vs h , l vs h) mają wartości p znacznie powyżej 0,05 w całym zakresie czasowym, co oznacza, że nie zaobserwowano istotnych efektów synergii pomiędzy czynnikami. Wpływ każdego czynnika jest niezależny od pozostałych. Wraz z wydłużaniem czasu badania, istotność wpływu grubości próbki na podatność na pełzanie utrzymuje się na wysokim poziomie do 500h, po czym w 1000h wyraźnie maleje ($p = 0,349$), co może być efektem zmniejszonej liczby próbek i większej losowości wyników w tej grupie.

Dodatkowe informacje do rozdziału 5.4.3.2

Tabela Z1-3 Zestawienie charakterystycznych parametrów badanych próbek w teście pelzania HDPE przy rozciąganiu

<i>Lp.</i>	<i>Nazwa próbki</i>	<i>Szerokość b [mm]</i>	<i>Niepewność b [mm]</i>	<i>Odchylenie standardowe b [mm]</i>	<i>Grubość h [mm]</i>	<i>Niepewność h [mm]</i>	<i>Odchylenie standardowe h [mm]</i>	<i>Pole przekroju A [mm²]</i>	<i>Niepewność A [mm²]</i>
1	2_e4_05	10,29	±0,05	0,041	9,60	±0,15	0,127	98,75	±1,91
2	2_e4_06	10,29	±0,06	0,048	9,60	±0,14	0,130	98,78	±1,99
3	2_e4_07	10,14	±0,04	0,026	9,56	±0,05	0,041	96,94	±1,00
4	2_e5_05	11,42	±0,04	0,030	11,00	±0,08	0,060	125,58	±0,97
5	2_e5_06	11,36	±0,06	0,049	11,00	±0,10	0,087	125,00	±3,01
6	2_e5_07	10,32	±0,07	0,056	11,56	±0,06	0,041	119,34	±2,05
7	2_e6_04	10,40	±0,04	0,026	11,10	±0,03	0,010	115,40	±0,77
8	2_e6_05	10,51	±0,03	0,021	11,11	±0,08	0,067	116,77	±1,89
9	2_e6_06	11,17	±0,11	0,095	11,70	±0,04	0,034	130,65	±2,16
10	2_e6_07	10,62	±0,08	0,066	11,16	±0,06	0,046	118,48	±2,13
11	3_e6_08	11,22	±0,03	0,032	10,24	±0,10	0,081	114,90	±1,59
12	D_e4_07	10,68	±0,07	0,061	11,93	±0,03	0,021	127,34	±1,11
13	D_e4_08	10,35	±0,04	0,025	11,70	±0,04	0,021	121,02	±1,08

Tabela Z1-4 Charakterystyka próbek rozciąganych: wartości pomiarowe i standaryzowane (z-score)

<i>Lp.</i>	<i>Nazwa próbki</i>	<i>Napężenie początkowe σ_0 [mm]</i>	<i>Pole przekroju próbki A [mm]</i>	<i>z-score pola przekroju A</i>
1	2_e4_05	6,00	98,75	-1,13
2	2_e4_06	3,00	98,78	-1,13
3	2_e4_07	8,00	96,94	-1,25
4	2_e5_05	1,00	125,58	1,23
5	2_e5_06	2,00	125,00	1,19
6	2_e5_07	9,00	119,34	0,77
7	2_e6_04	4,00	115,40	0,48
8	2_e6_05	1,00	116,77	0,58
9	2_e6_06	2,00	130,65	1,6
10	2_e6_07	9,00	118,48	0,7
11	3_e6_08	10,00	114,90	0,44
12	D_e4_07	7,00	127,34	1,36
MAX (ABS)				1,60

Załącznik 2

*Karty badawcze z pomiarów pełzania
HDPE przy zginaniu*

KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	PE_01
Data rozpoczęcia badania	2023-06-02
Napężenie początkowe	5,00 MPa
Kanał zapisu	CH_1
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	22,12
Wilgotność względna średnia	48,91

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	35,60	10,42	3356,39
2	34,62	10,49	3330,22
3	34,23	10,36	3171,79
4	35,10	10,50	3386,05
5	34,14	10,33	3136,05
6	34,27	10,38	3193,93
Średnia	34,66	10,41	3261,49

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 34,66 ± 0,47 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 22,12 ± 0,03 °C
Grubość śr. <i>h</i> : 10,41 ± 0,06 mm	Wilgotność wzgl. śr.: 48,91 ± 0,43%
Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 3261,49 ± 73,01 mm ⁴	
Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

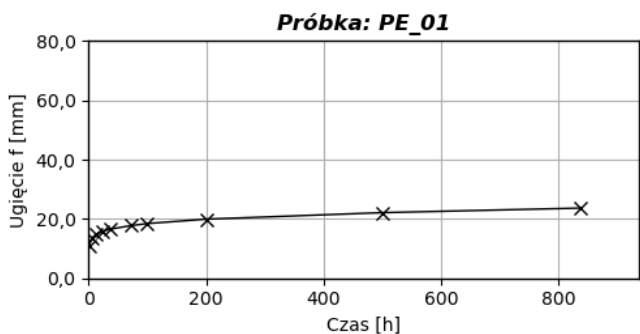
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-06-02	5,12	50,24	3139,84	5,01

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	11,07
6	13,61
12	14,71
24	15,86
36	16,54
72	17,76
100	18,46
200	19,94
500	22,13
1000	
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	23,67

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	PE_02
Data rozpoczęcia badania	2023-06-02
Napężenie początkowe	5,00 MPa
Kanał zapisu	CH 2
Rozpiętość	200,00
Temperatura średnia	22,12
Wilgotność względna średnia	48,91

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	34,98	10,47	3345,64
2	36,61	10,34	3372,72
3	36,42	10,54	3553,70
4	35,13	10,71	3596,38
5	37,09	10,47	3547,44
6	36,94	10,29	3353,99
Średnia	36,20	10,47	3461,84

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 36,20 ± 0,75 mm Grubość śr. <i>h</i> : 10,47 ± 0,12 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 3461,84 ± 142,50 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 200,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 22,12 ± 0,03 °C Wilgotność wzgl. śr. : 48,91 ± 0,43%
---	--

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

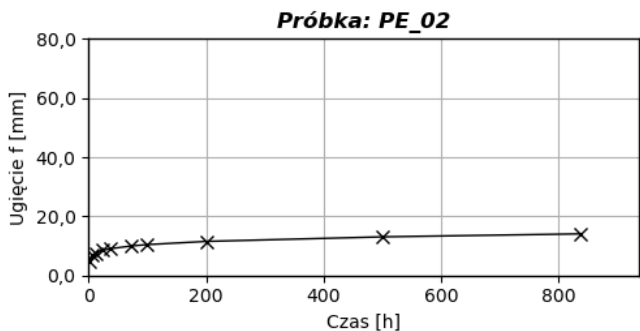
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-06-02	6,72	65,94	3296,83	4,99

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	4,79
6	6,72
12	7,59
24	8,51
36	9,03
72	9,97
100	10,44
200	11,53
500	13,06
1000	
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	14,08

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....
.....
.....
.....
.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	PE_03
Data rozpoczęcia badania	2023-08-10
Napężenie początkowe	3,00 MPa 5,00 MPa
Kanał zapisu	CH 3
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	22,19
Wilgotność względna średnia	53,78

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	34,17	13,50	7005,92
2	36,40	13,46	7396,99
3	34,36	13,49	7029,23
4	34,30	13,47	6985,79
5	36,80	13,74	7954,75
6	34,84	13,62	7335,47
Średnia	35,14	13,55	7280,81

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 35,14 ± 0,94 mm Grubość śr. <i>h</i> : 13,55 ± 0,09 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 7280,81 ± 247,00 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 22,19 ± 0,05 °C Wilgotność wzgl. śr. : 53,78 ± 0,36%
---	--

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

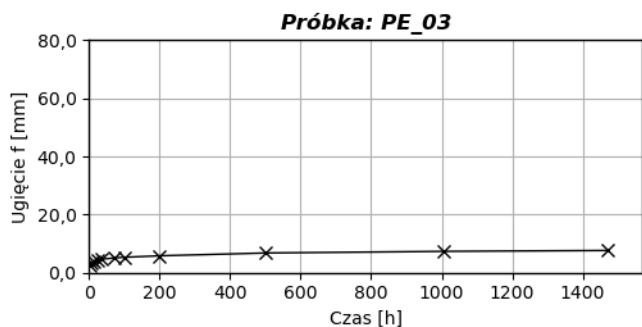
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-08-10	5,27	51,71	3231,83	3,00
2*	2023-10-10	8,77	86,05	5378,20	5,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	2,65
6	3,56
12	3,98
24	4,38
36	4,64
72	5,09
100	5,30
200	5,81
500	6,78
1000	7,34
1500	
2000	
5000	

5. UWAGI I OBSERWACJE

* próbka dociążona z 3 do 5 MPa w drugim etapie.
Wyniki nie są przedstawione w tabeli i na wykresie



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	PE_04
Data rozpoczęcia badania	2023-10-10
Napężenie początkowe	7,00 MPa
Kanał zapisu	CH 1
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	20,35
Wilgotność względna średnia	37,16

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	35,12	13,40	7041,86
2	35,08	13,52	7224,51
3	33,90	13,42	6827,72
4	34,29	13,41	6890,85
5	34,75	13,45	7045,96
6	35,54	13,48	7254,47
Średnia	34,78	13,45	7046,80

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 34,78 ± 0,49 mm Grubość śr. <i>h</i> : 13,45 ± 0,04 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 7046,80 ± 121,33 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 20,35 ± 0,03 °C Wilgotność wzgl. śr.: 37,16 ± 0,48%
---	---

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

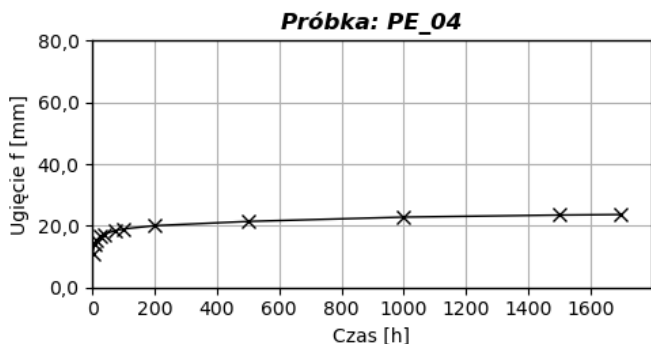
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-10-10	11,97	117,45	7340,60	7,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	11,08
6	13,99
12	15,22
24	16,49
36	17,22
72	18,42
100	18,97
200	20,04
500	21,41
1000	22,81
1500	23,48
2000	
5000	
10000	
Max	23,63

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	PE_05
Data rozpoczęcia badania	2023-10-10
Napężenie początkowe	7,00 MPa
Kanał zapisu	CH 2
Rozpiętość	200,00
Temperatura średnia	20,35
Wilgotność względna średnia	37,16

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	35,62	13,90	7971,81
2	36,16	13,81	7936,49
3	35,57	13,79	7773,12
4	35,33	13,81	7754,31
5	36,09	13,45	7317,66
6	35,77	13,56	7432,19
Średnia	35,76	13,72	7695,52

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 35,76 ± 0,26 mm Grubość śr. <i>h</i> : 13,72 ± 0,14 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 7695,52 ± 249,13 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 200,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 20,35 ± 0,03 °C Wilgotność wzgl. śr.: 37,16 ± 0,48%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

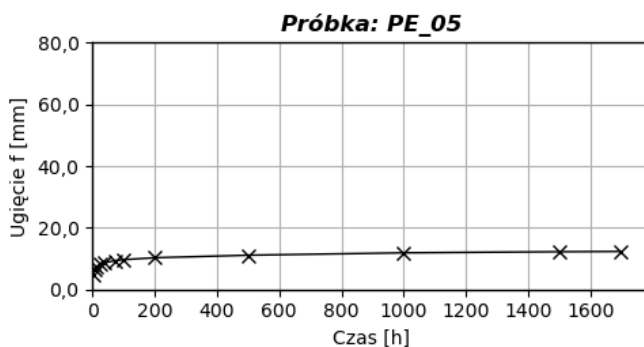
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-10-10	16,02	157,19	7859,41	7,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	4,71
6	6,60
12	7,36
24	8,14
36	8,59
72	9,34
100	9,66
200	10,29
500	11,11
1000	11,89
1500	12,24
2000	
5000	
10000	
Max	12,33

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....
.....
.....
.....
.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	PE_06
Data rozpoczęcia badania	2023-12-20
Napężenie początkowe	3,76 MPa
Kanał zapisu	CH 3
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	19,08
Wilgotność względna średnia	33,44

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	36,17	13,80	7921,45
2	37,24	13,82	8191,29
3	36,41	13,87	8095,97
4	36,37	14,03	8370,19
5	36,86	13,51	7574,26
6	35,85	13,62	7548,13
Średnia	36,48	13,78	7946,72

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 36,48 ± 0,41 mm Grubość śr. <i>h</i> : 13,78 ± 0,15 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 7946,72 ± 278,73 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 19,08 ± 0,02 °C Wilgotność wzgl. śr.: 33,44 ± 0,24%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

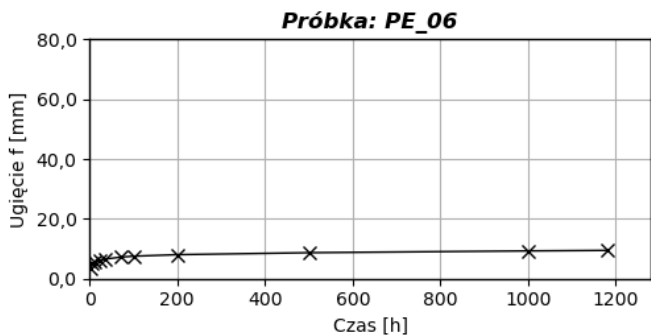
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-12-20	7,07	69,37	4335,68	3,76

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	3,59
6	4,96
12	5,56
24	6,18
36	6,56
72	7,23
100	7,52
200	8,03
500	8,69
1000	9,29
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	9,46

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	PE_07
Data rozpoczęcia badania	2024-02-07
Napężenie początkowe	3,00 MPa
Kanał zapisu	CH 2
Rozpiętość	200,00
Temperatura średnia	19,77
Wilgotność względna średnia	38,65

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	36,48	13,55	7562,95
2	38,05	13,57	7923,43
3	37,63	13,75	8151,94
4	36,67	13,88	8171,43
5	37,72	13,36	7495,66
6	36,71	13,54	7593,80
Średnia	37,21	13,61	7814,36

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 37,21 ± 0,54 mm Grubość śr. <i>h</i> : 13,61 ± 0,15 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 7814,36 ± 282,78 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 200,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 19,77 ± 0,02 °C Wilgotność wzgl. śr.: 38,65 ± 0,24%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

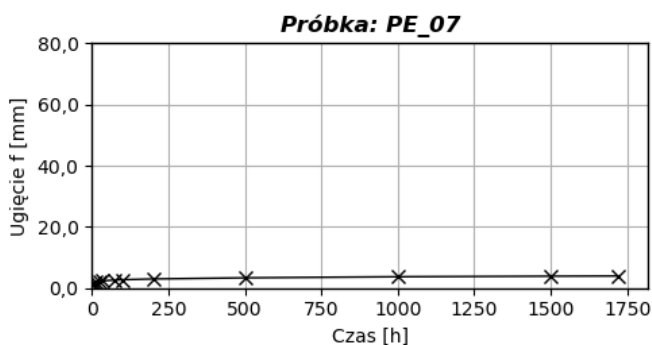
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2024-02-07	7,02	68,88	3444,01	3,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	1,27
6	1,79
12	2,01
24	2,24
36	2,37
72	2,62
100	2,74
200	2,99
500	3,36
1000	3,71
1500	3,89
2000	
5000	
10000	
Max	3,95

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	PE_08
Data rozpoczęcia badania	2024-02-07
Napężenie początkowe	5,00 MPa
Kanał zapisu	CH_3
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	19,77
Wilgotność względna średnia	38,65

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
Lp.	b [mm]	h [mm]	I [mm ⁴]
1	34,93	13,38	6972,45
2	35,91	13,43	7248,73
3	35,88	13,48	7323,87
4	34,50	13,44	6979,68
5	35,46	13,37	7062,39
6	35,59	13,42	7168,10
Średnia	35,38	13,42	7125,47

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b : $35,38 \pm 0,46$ mm Grubość śr. h : $13,42 \pm 0,04$ mm Moment bezwładności śr. I : $7125,47 \pm 112,15$ mm ⁴ Rozpiętość l : $250,00 \pm 0,58$ mm	Temperatura śr. T : $19,77 \pm 0,02$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $38,65 \pm 0,24\%$
---	---

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

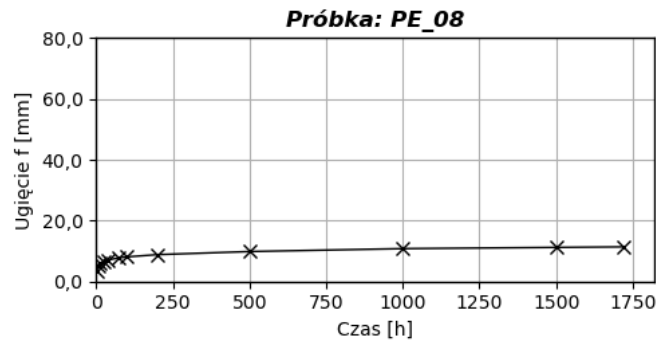
Lp.	Czas [rrrr-mm-dd]	Masa [kg]	F [N]	M_g [Nmm]	σ_g [MPa]
1	2024-02-07	8,65	84,87	5304,61	5,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas $t(i)$ [h]	Ugięcie f [mm]
1	3,61
6	5,19
12	5,86
24	6,57
36	6,99
72	7,74
100	8,09
200	8,83
500	9,84
1000	10,80
1500	11,21
2000	
5000	
10000	
Max	11,38

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....
.....
.....
.....
.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_01
Data rozpoczęcia badania	2023-02-12
Naprężenie początkowe	3,00 MPa 5,00 MPa 7,00 MPa
Kanał zapisu	CH_3
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	21,95
Wilgotność względna średnia	26,51

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>I</i> [mm ⁴]
1	38,20	12,88	6801,89
2	38,14	11,93	5396,61
3	36,68	13,10	6871,66
4	36,57	12,07	5358,78
5	37,28	12,87	6622,63
6	37,24	11,90	5229,61
Średnia	37,35	12,46	6018,78

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 37,35 ± 0,57 mm Grubość śr. <i>h</i> : 12,46 ± 0,45 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 6018,78 ± 655,61 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 21,95 ± 0,12 °C Wilgotność wzgl. śr.: 26,51 ± 0,25%
---	---

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

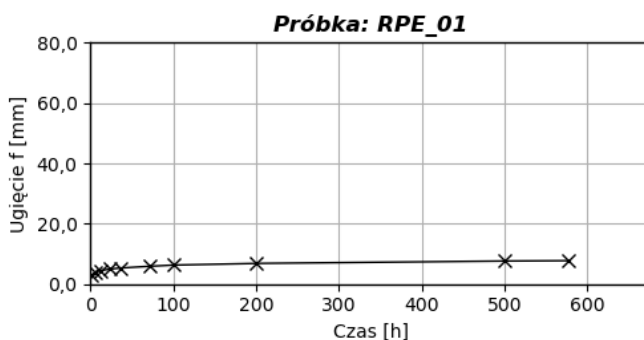
<i>Lp.</i>	Czas [rrrr-mm-dd]	Masa [kg]	<i>F</i> [N]	<i>M_g</i> [Nmm]	<i>σ_g</i> [MPa]
1	2023-02-12	4,69	46,02	2876,14	2,96
2*	2023-03-08	7,92	77,71	4856,94	5,00
3*	2023-04-05	11,17	109,60	6850,00	7,06

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	2,91
6	3,99
12	4,46
24	4,99
36	5,32
72	5,92
100	6,29
200	6,85
500	7,65
1000	
1500	
Max	7,76

5. UWAGI I OBSERWACJE

* próbka dociążona z 3 do 5 MPa w drugim etapie oraz z 5 do 7 MPa w trzecim etapie. Wyniki nie są przedstawione w tabeli i na wykresie.



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_02
Data rozpoczęcia badania	2023-02-12
Napężenie początkowe	5,00 MPa
Kanał zapisu	CH 2
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	21,95
Wilgotność względna średnia	26,51

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	35,32	11,91	4972,50
2	35,13	11,52	4475,63
3	36,07	11,91	5078,09
4	36,05	12,22	5481,98
5	36,17	12,10	5339,78
6	35,97	11,75	4862,65
Średnia	35,79	11,90	5027,40

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 35,79 ± 0,36 mm Grubość śr. <i>h</i> : 11,90 ± 0,20 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 5027,40 ± 264,03 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 21,95 ± 0,14 °C Wilgotność wzgl. śr.: 26,51 ± 0,25%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

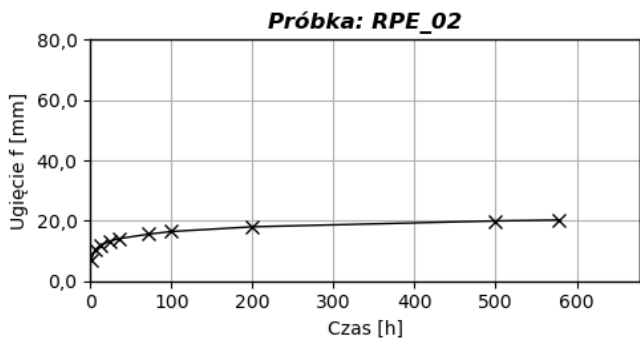
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-02-12	6,92	67,90	4243,69	5,02

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	7,14
6	10,38
12	11,77
24	13,24
36	14,10
72	15,56
100	16,43
200	17,99
500	19,94
1000	
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	20,24

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_03
Data rozpoczęcia badania	2023-02-12
Napężenie początkowe	7,00 MPa
Kanał zapisu	CH_1
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	22,15
Wilgotność względna średnia	27,60

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	36,62	12,33	5720,40
2	36,60	11,81	5024,00
3	36,91	11,80	5053,69
4	36,98	11,96	5272,05
5	36,14	11,91	5087,94
6	36,14	11,82	4973,47
Średnia	36,56	11,94	5184,60

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 36,56 ± 0,30 mm Grubość śr. <i>h</i> : 11,94 ± 0,17 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 5184,60 ± 221,16 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 22,15 ± 0,02 °C Wilgotność wzgl. śr.: 27,60 ± 0,22%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

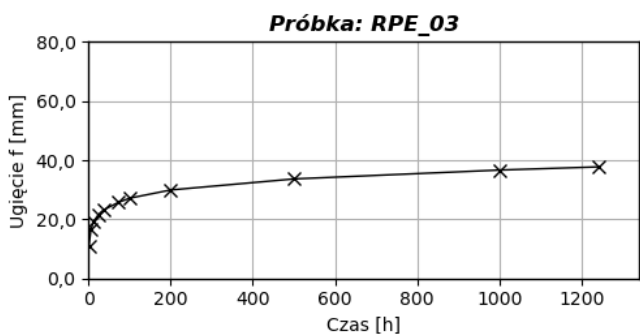
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-02-12	9,92	97,34	6083,44	7,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	11,12
6	16,64
12	19,07
24	21,61
36	23,12
72	25,69
100	27,15
200	29,93
500	33,66
1000	36,66
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	37,73

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_04
Data rozpoczęcia badania	2023-02-12
Napężenie początkowe	9,00 MPa
Kanał zapisu	CH_0
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	21,89
Wilgotność względna średnia	28,98

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	36,96	11,77	5022,04
2	36,62	11,92	5168,52
3	35,45	12,04	5156,02
4	35,71	11,79	4876,97
5	36,43	11,82	5013,38
6	35,75	12,26	5489,92
Średnia	36,15	11,93	5119,79

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 36,15 ± 0,49 mm Grubość śr. <i>h</i> : 11,93 ± 0,16 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 5119,79 ± 212,36 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 21,89 ± 0,04 °C Wilgotność wzgl. śr.: 28,98 ± 0,30%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

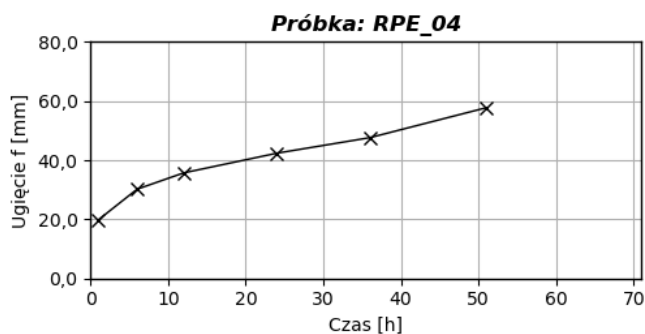
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-02-12	12,62	123,83	7739,21	9,02

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	19,81
6	30,19
12	35,70
24	42,35
36	47,61
72	
100	
200	
500	
1000	
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	57,73

5. UWAGI I OBSERWACJE

Próbka osiągnęła III stadium pełzania i uległa zniszczeniu po 51 godzinach



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_05
Data rozpoczęcia badania	2023-02-16
Napężenie początkowe	9,00 MPa
Kanał zapisu	CH_0
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	22,17
Wilgotność względna średnia	27,47

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	36,01	15,17	10476,08
2	37,76	14,95	10514,15
3	36,11	15,01	10176,26
4	35,83	16,01	12252,92
5	36,86	15,98	12534,42
6	36,73	16,02	12584,25
Średnia	36,55	15,52	11393,60

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 36,55 ± 0,59 mm Grubość śr. <i>h</i> : 15,52 ± 0,43 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 11393,60 ± 973,25 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 22,17 ± 0,02 °C Wilgotność wzgl. śr.: 27,47 ± 0,24%
--	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

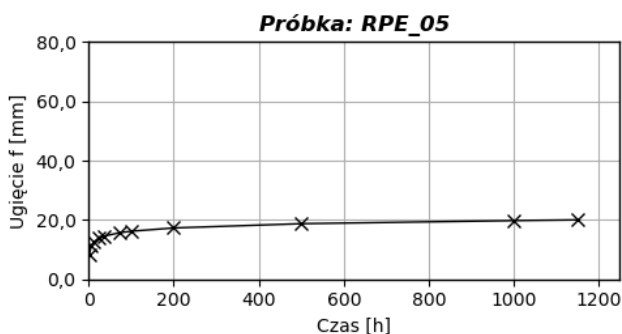
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-02-16	21,52	211,15	13197,14	8,97

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	8,13
6	11,25
12	12,51
24	13,80
36	14,52
72	15,69
100	16,20
200	17,31
500	18,75
1000	19,79
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	20,02

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_06
Data rozpoczęcia badania	2023-03-08
Napężenie początkowe	5,00 MPa
Kanał zapisu	CH 2
Rozpiętość	200,00
Temperatura średnia	22,31
Wilgotność względna średnia	28,55

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	35,29	11,68	4685,96
2	34,82	11,30	4186,81
3	33,89	11,31	4085,81
4	33,25	11,77	4517,93
5	35,21	11,75	4759,91
6	34,41	11,73	4628,04
Średnia	34,48	11,59	4473,17

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 34,48 ± 0,65 mm Grubość śr. <i>h</i> : 11,59 ± 0,18 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 4473,17 ± 228,48 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 200,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 22,31 ± 0,02 °C Wilgotność wzgl. śr.: 28,55 ± 0,33%
---	---

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

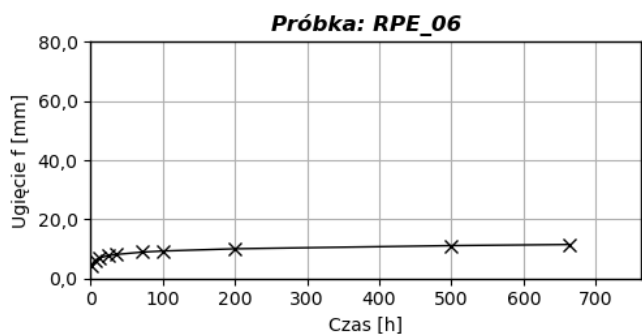
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-03-08	7,92	77,71	3885,55	5,03

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	4,34
6	6,14
12	6,91
24	7,69
36	8,13
72	8,93
100	9,29
200	10,04
500	11,12
1000	
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	11,48

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_07
Data rozpoczęcia badania	2023-04-05
Napężenie początkowe	11,00 MPa
Kanał zapisu	CH_0
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	20,68
Wilgotność względna średnia	42,53

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	35,67	15,36	10771,98
2	36,67	15,40	11160,71
3	34,07	14,80	9203,99
4	33,75	14,56	8681,14
5	35,69	15,05	10138,53
6	35,82	14,76	9598,50
Średnia	35,28	14,99	9898,90

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 35,28 ± 0,92 mm Grubość śr. <i>h</i> : 14,99 ± 0,28 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 9898,90 ± 611,28 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 20,68 ± 0,02 °C Wilgotność wzgl. śr.: 42,53 ± 0,17%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

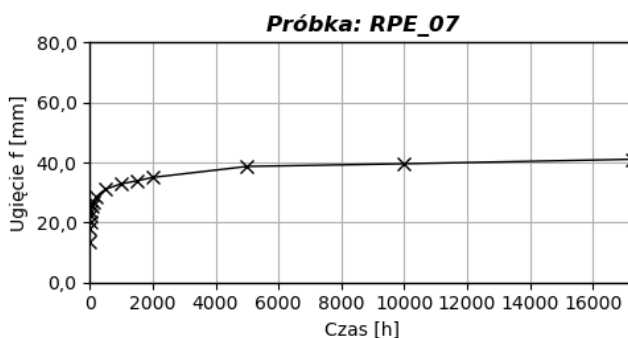
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-04-05	23,82	233,72	14607,62	11,03

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	13,47
6	18,12
12	20,16
24	22,26
36	23,50
72	25,65
100	26,60
200	28,51
500	31,10
1000	32,88
1500	33,90
2000	35,03
5000	38,69
10000	39,57
Max	41,07

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_08
Data rozpoczęcia badania	2023-04-05
Napężenie początkowe	6,00 MPa
Kanał zapisu	CH 2
Rozpiętość	200,00
Temperatura średnia	21,44
Wilgotność względna średnia	35,66

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	34,84	12,23	5311,00
2	34,50	12,26	5297,97
3	34,70	11,96	4947,00
4	35,61	13,04	6579,96
5	34,17	12,73	5874,20
6	34,39	13,16	6531,59
Średnia	34,70	12,56	5734,34

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 34,70 ± 0,41 mm Grubość śr. <i>h</i> : 12,56 ± 0,40 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 5734,34 ± 547,86 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 200,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 21,44 ± 0,02 °C Wilgotność wzgl. śr.: 35,66 ± 0,28%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

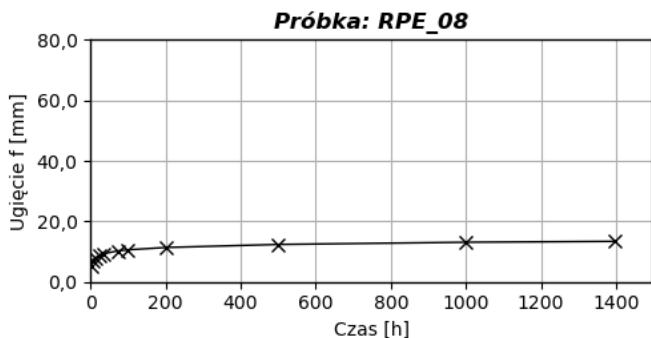
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-04-05	11,22	110,09	5504,53	6,01

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	5,02
6	7,07
12	7,95
24	8,83
36	9,35
72	10,23
100	10,61
200	11,37
500	12,38
1000	13,11
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	13,40

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_09
Data rozpoczęcia badania	2023-04-05
Napężenie początkowe	8,77 MPa
Kanał zapisu	CH 1
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	21,44
Wilgotność względna średnia	35,66

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	32,18	14,41	8024,11
2	34,98	14,75	9354,37
3	35,65	14,80	9630,82
4	35,17	14,83	9559,05
5	34,81	14,65	9120,86
6	32,46	14,60	8418,33
Średnia	34,21	14,67	9006,11

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 34,21 ± 1,22 mm Grubość śr. <i>h</i> : 14,67 ± 0,13 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 9006,11 ± 399,69 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 21,44 ± 0,02 °C Wilgotność wzgl. śr.: 35,66 ± 0,28%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

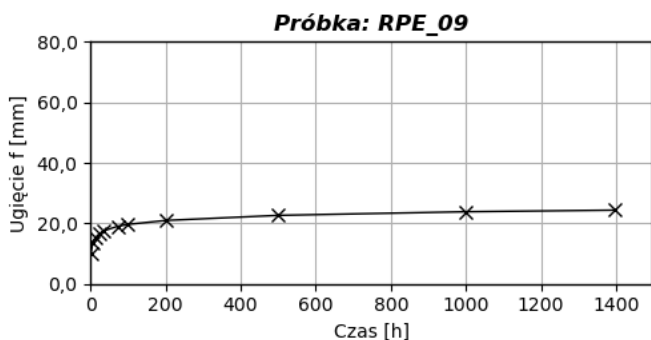
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-04-05	17,57	172,40	10774,80	8,77

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	10,09
6	13,70
12	15,17
24	16,67
36	17,56
72	19,03
100	19,67
200	20,96
500	22,65
1000	23,85
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	24,37

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_10
Data rozpoczęcia badania	2023-07-07
Napężenie początkowe	7,00 MPa
Kanał zapisu	CH_2
Rozpiętość	200,00
Temperatura średnia	22,57
Wilgotność względną średnia	53,97

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	37,07	11,64	4871,92
2	34,95	11,48	4406,48
3	34,29	11,50	4345,90
4	34,85	11,48	4393,87
5	35,09	11,64	4611,70
6	37,10	11,76	5028,22
Średnia	35,56	11,58	4605,33

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 35,56 ± 0,99 mm Grubość śr. <i>h</i> : 11,58 ± 0,10 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 4605,33 ± 172,45 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 200,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 22,57 ± 0,04 °C Wilgotność wzgl. śr.: 53,97 ± 0,25%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

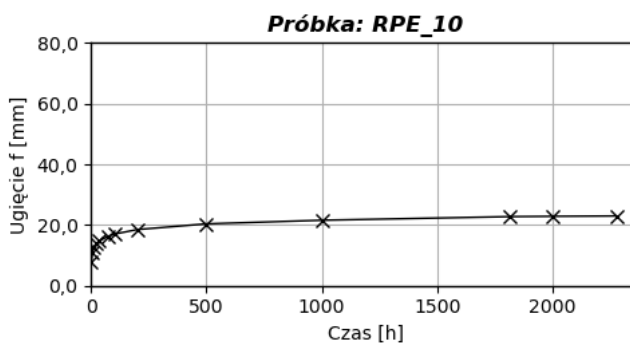
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-07-07	11,35	111,37	5568,31	7,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	7,67
6	11,09
12	12,50
24	13,93
36	14,76
72	16,23
100	16,99
200	18,50
500	20,38
1000	21,57
1500	22,76
2000	22,87
5000	
10000	
Max	22,98

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_11
Data rozpoczęcia badania	2023-07-07
Napężenie początkowe	7,00 MPa
Kanał zapisu	CH_1
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	22,57
Wilgotność względna średnia	53,97

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	36,83	15,06	10483,24
2	38,86	14,59	10057,44
3	38,04	14,56	9784,61
4	38,04	14,64	9946,78
5	38,80	14,96	10825,43
6	37,17	14,92	10287,69
Średnia	37,96	14,79	10229,74

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 37,96 ± 0,68 mm Grubość śr. <i>h</i> : 14,79 ± 0,18 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 10229,74 ± 412,26 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 22,57 ± 0,04 °C Wilgotność wzgl. śr.: 53,97 ± 0,25%
--	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

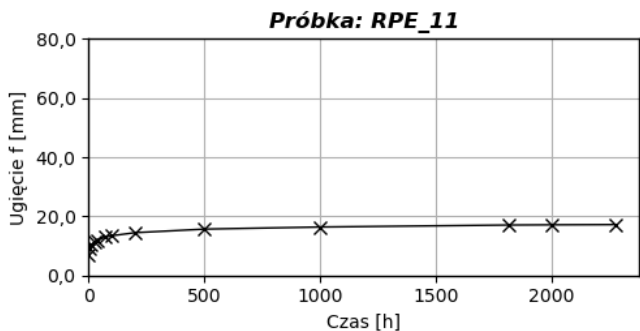
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-07-07	15,77	154,74	9670,95	6,99

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	6,77
6	9,29
12	10,30
24	11,33
36	11,93
72	12,96
100	13,44
200	14,47
500	15,68
1000	16,39
1500	17,07
2000	17,13
5000	
10000	
Max	17,21

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_12
Data rozpoczęcia badania	2023-12-20
Napężenie początkowe	9,00 MPa
Kanał zapisu	CH_1
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	19,40
Wilgotność względna średnia	34,94

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	35,46	14,72	9424,99
2	33,87	14,77	9094,43
3	37,80	14,67	9944,91
4	35,48	15,13	10240,45
5	34,83	15,39	10580,06
6	34,90	15,02	9854,94
Średnia	35,39	14,95	9854,23

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 35,39 ± 1,08 mm Grubość śr. <i>h</i> : 14,95 ± 0,23 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 9854,23 ± 545,57 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 19,40 ± 0,02 °C Wilgotność wzgl. śr.: 34,94 ± 0,20%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

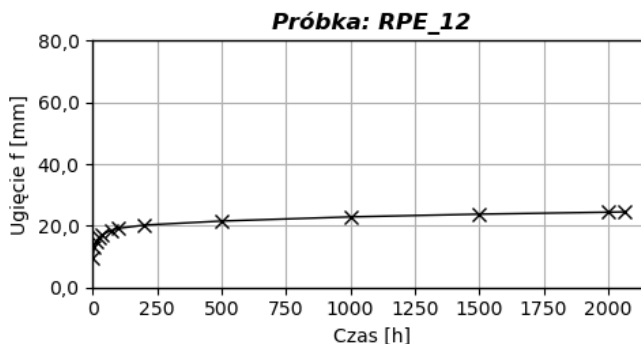
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-12-20	19,34	189,76	11860,26	8,99

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	9,69
6	13,25
12	14,69
24	16,18
36	17,07
72	18,55
100	19,16
200	20,23
500	21,53
1000	22,88
1500	23,76
2000	24,41
5000	
10000	
Max	24,50

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE 13
Data rozpoczęcia badania	2023-12-20
Napężenie początkowe	2,40 MPa
Kanał zapisu	CH 2
Rozpiętość	200,00
Temperatura średnia	19,06
Wilgotność względna średnia	33,22

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	38,04	11,84	5261,56
2	37,62	11,76	5098,70
3	37,01	11,87	5158,10
4	36,78	11,52	4685,84
5	36,75	11,73	4942,77
6	38,64	11,58	5000,13
Średnia	37,47	11,72	5022,89

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 37,47 ± 0,62 mm Grubość śr. <i>h</i> : 11,72 ± 0,12 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 5022,89 ± 171,86 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 200,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 19,06 ± 0,02 °C Wilgotność wzgl. śr.: 33,22 ± 0,26%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

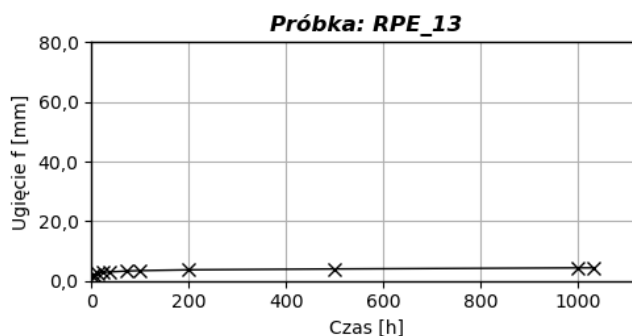
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-12-20	4,19	41,11	2055,61	2,40

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	1,58
6	2,24
12	2,53
24	2,82
36	3,00
72	3,30
100	3,44
200	3,71
500	4,00
1000	4,37
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	4,38

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....
.....
.....
.....
.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_14
Data rozpoczęcia badania	2024-04-19
Napężenie początkowe	9,00 MPa
Kanał zapisu	CH_2
Rozpiętość	200,00
Temperatura średnia	20,35
Wilgotność względna średnia	42,92

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	35,06	10,53	3411,27
2	34,47	10,54	3363,43
3	36,75	10,59	3637,17
4	36,43	10,22	3240,64
5	34,70	10,23	3095,82
6	34,91	10,37	3244,18
Średnia	35,39	10,41	3329,87

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 35,39 ± 0,78 mm Grubość śr. <i>h</i> : 10,41 ± 0,14 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 3329,87 ± 149,42 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 200,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 20,35 ± 0,03 °C Wilgotność wzgl. śr.: 42,92 ± 0,27%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

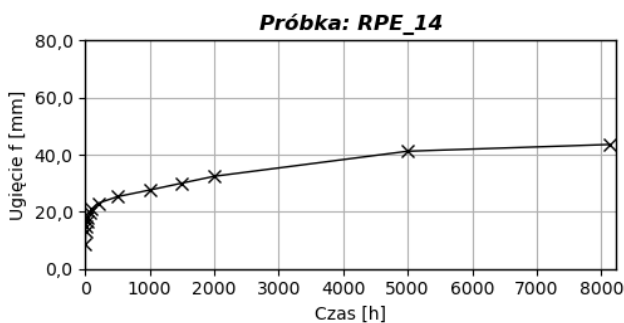
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-12-20	11,74	115,19	5759,64	9,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	8,71
6	12,95
12	14,76
24	16,67
36	17,84
72	19,89
100	20,92
200	23,00
500	25,31
1000	27,62
1500	30,04
2000	32,44
5000	41,21
10000	
Max	43,57

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_15
Data rozpoczęcia badania	2024-04-19
Napężenie początkowe	11,00 MPa
Kanał zapisu	CH_3
Rozpiętość	200,00
Temperatura średnia	19,91
Wilgotność względną średnia	46,04

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	35,42	10,56	3475,83
2	35,99	10,44	3412,73
3	35,72	10,35	3300,28
4	35,43	10,24	3170,22
5	36,09	10,27	3257,74
6	34,99	10,23	3121,69
Średnia	35,61	10,35	3288,22

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 35,61 ± 0,34 mm Grubość śr. <i>h</i> : 10,35 ± 0,11 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 3288,22 ± 108,41 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 200,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 19,91 ± 0,04 °C Wilgotność wzgl. śr.: 46,04 ± 0,51%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

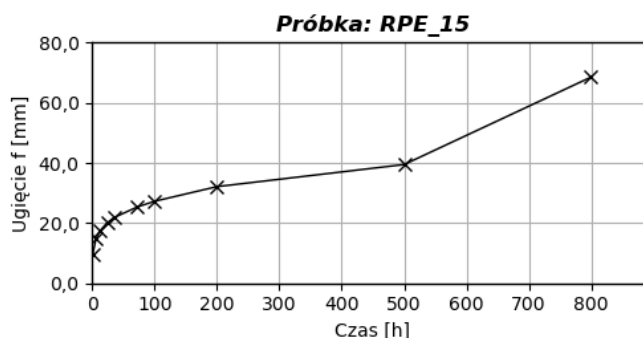
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-12-20	14,27	140,02	7000,86	11,01

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	9,71
6	14,82
12	17,31
24	20,13
36	21,93
72	25,35
100	27,26
200	32,13
500	39,47
1000	
1500	
2000	
5000	
10000	
Max	68,47

5. UWAGI I OBSERWACJE

Próbka uległa załamaniu (pełzanie III-go rzędu)



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	RPE_16
Data rozpoczęcia badania	2024-04-19
Napężenie początkowe	7,00 MPa
Kanał zapisu	CH_1
Rozpiętość	250,00
Temperatura średnia	20,35
Wilgotność względna średnia	42,92

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Moment bezwładności
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>I</i>
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]
1	38,02	10,75	3936,01
2	38,09	10,47	3643,09
3	37,11	10,43	3508,83
4	37,81	10,29	3432,98
5	38,73	10,39	3620,04
6	38,53	10,30	3508,56
Średnia	38,05	10,44	3606,18

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : 38,05 ± 0,47 mm Grubość śr. <i>h</i> : 10,44 ± 0,14 mm Moment bezwładności śr. <i>I</i> : 3606,18 ± 151,10 mm ⁴ Rozpiętość <i>l</i> : 250,00 ± 0,58 mm	Temperatura śr. <i>T</i> : 20,35 ± 0,03 °C Wilgotność wzgl. śr.: 42,92 ± 0,27%
---	---

* Niepewność rozszerzona (*k*=2) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm, miarki 0,1 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

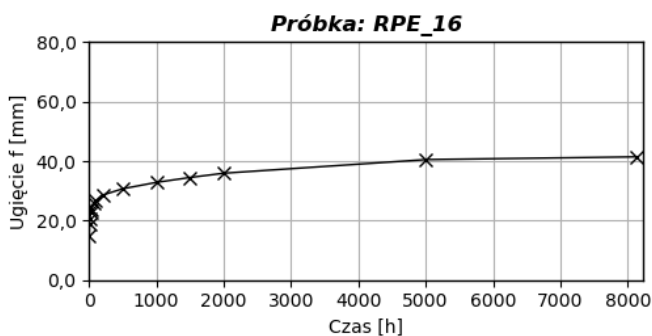
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>M_g</i>	<i>σ_g</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[Nmm]	[MPa]
1	2023-12-20	7,89	77,42	4838,54	7,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Ugięcie <i>f</i> [mm]
1	14,77
6	18,97
12	20,76
24	22,64
36	23,75
72	25,74
100	26,65
200	28,57
500	30,71
1000	32,85
1500	34,50
2000	35,93
5000	40,50
10000	
Max	41,43

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....

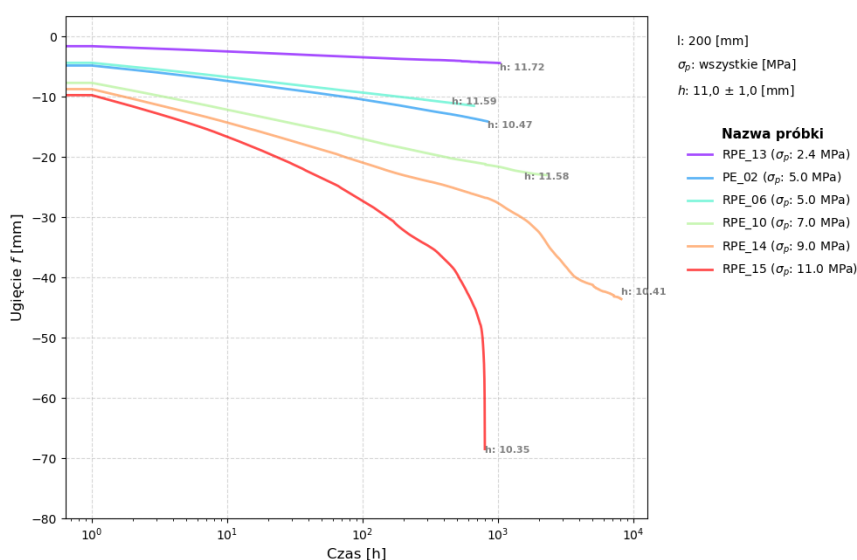


Załącznik 3

Zestawienie wyników pomiarów pełzania HDPE przy zginaniu

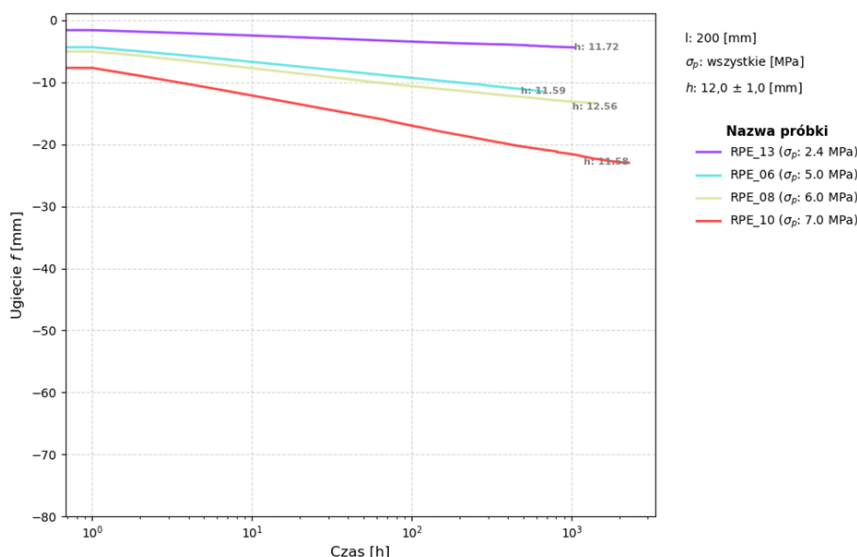
Dodatkowe informacje do rozdziału 5.4.2.4

Dalsza analiza obejmuje porównanie krzywych pełzania dla próbek o różnych grubościach. Na Rys. 5.27, Rys. 5.28 i Rys. 5.29 przedstawiono ugięcie w funkcji czasu dla próbek o grubości odpowiednio $11,0 \pm 1,0\text{mm}$ (liczba próbek), $13,0 \pm 1,0\text{mm}$ (liczba próbek) i $15,0 \pm 1,0\text{mm}$ (liczba próbek), z rozstawem podpór 200 mm i 250 mm.



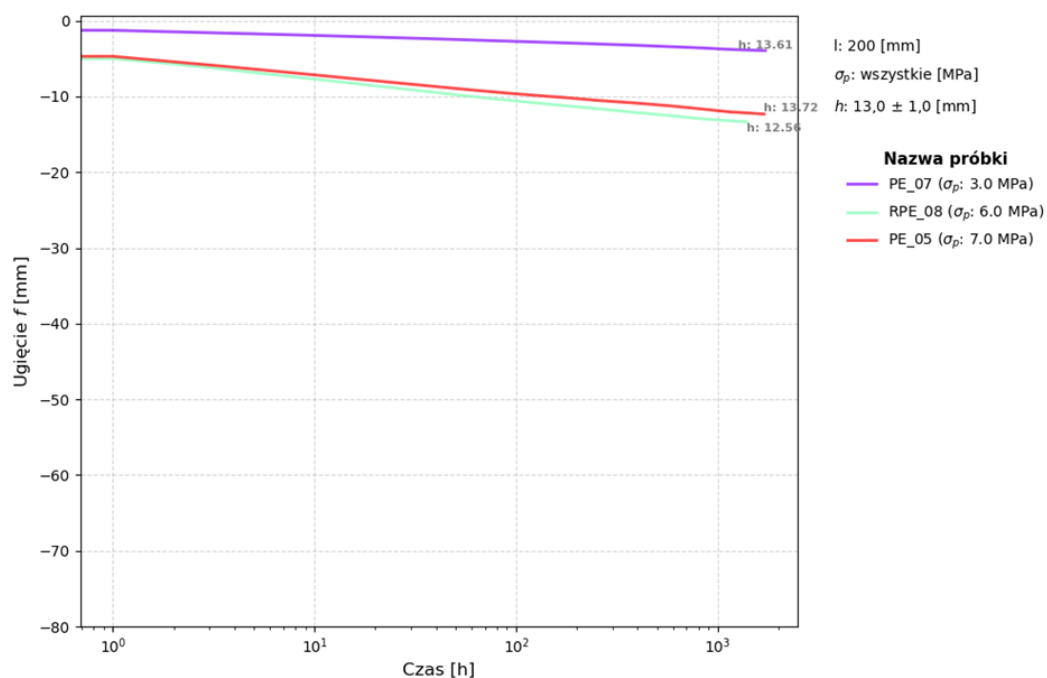
Rys. Z3-1 Wykres zależności ugięcia belek zginanych do czasu:
rozstaw $l = 200\text{mm}$, grubość $h = 11,0 \pm 1,0\text{ mm}$

Fig. Z3- Beam deflection vs. time: span length $l = 200\text{mm}$, thickness $h = 11,0 \pm 1,0\text{ mm}$



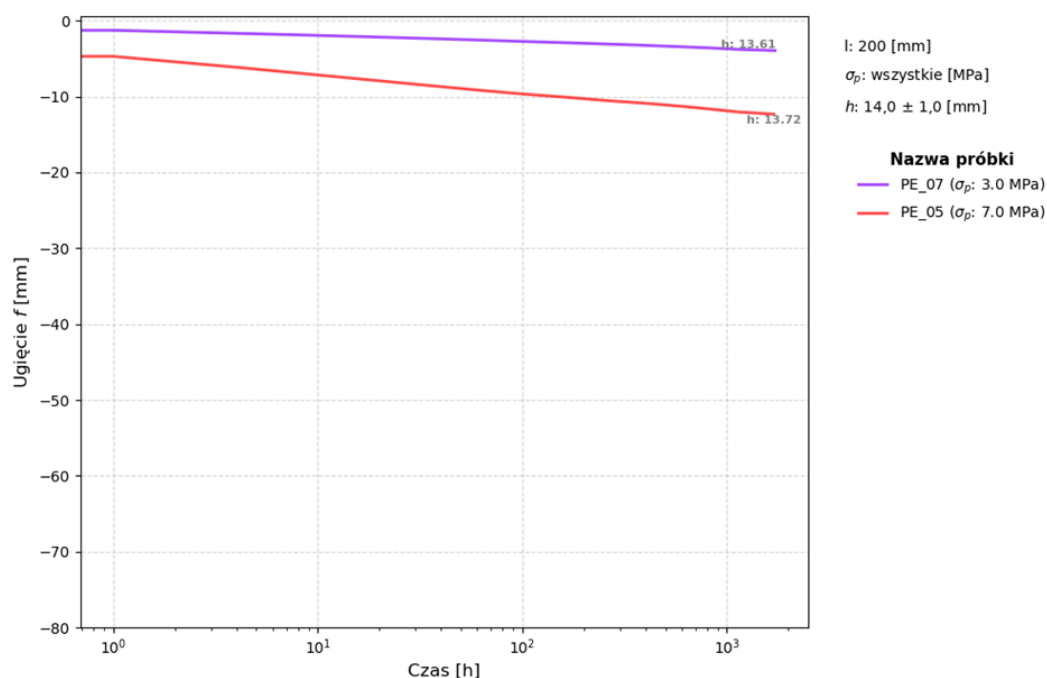
Rys. Z3-2 Wykres zależności ugięcia belek zginanych do czasu:
rozstaw $l = 200\text{mm}$, grubość $h = 12,0 \pm 1,0\text{ mm}$

Fig. Z3-2 Beam deflection vs. time: span length $l = 200\text{mm}$, thickness $h = 12,0 \pm 1,0\text{ mm}$



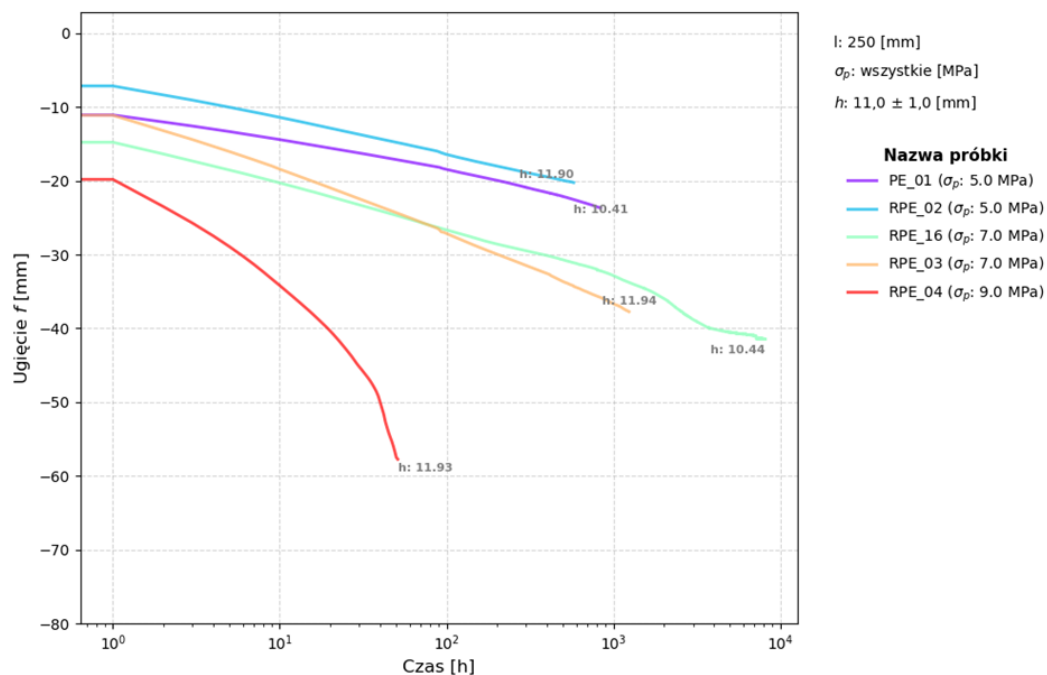
Rys. Z3-3 Wykres zależności ugięcia belek zginanych do czasu:
rozstaw $l = 200\text{mm}$, grubość $h = 13,0 \pm 1,0\text{ mm}$

Fig. Z3-3 Beam deflection vs. time: span length $l = 200\text{mm}$, thickness $h = 13,0 \pm 1,0\text{ mm}$



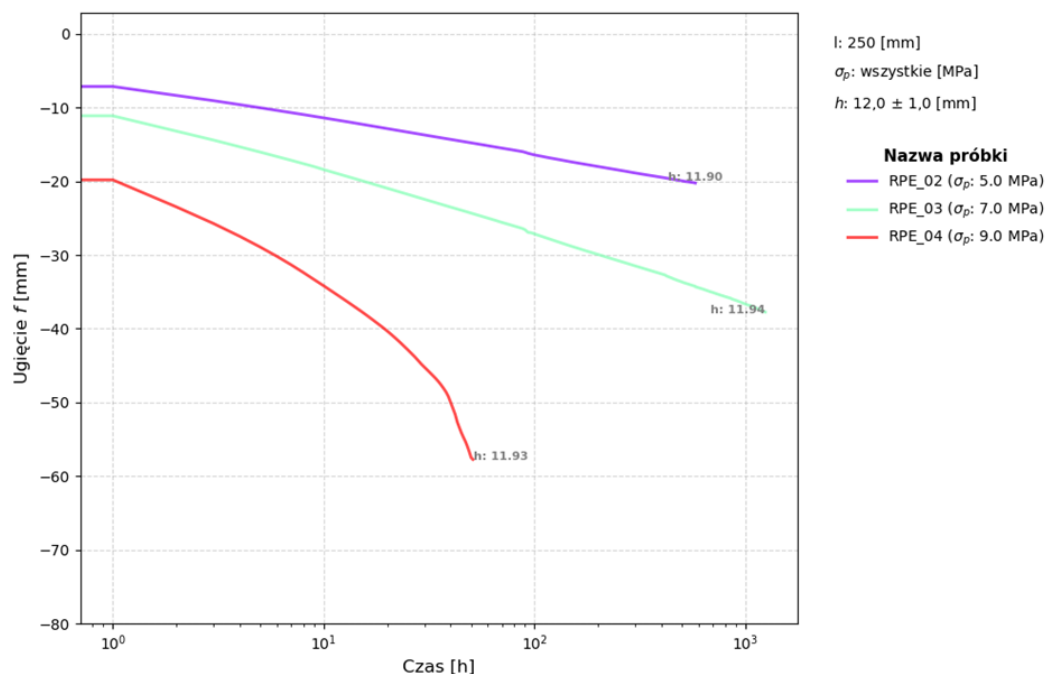
Rys. Z3-4 Wykres zależności ugięcia belek zginanych do czasu:
rozstaw $l = 200\text{mm}$, grubość $h = 14,0 \pm 1,0\text{ mm}$

Fig. Z3-4 Beam deflection vs. time: span length $l = 200\text{mm}$, thickness $h = 14,0 \pm 1,0\text{ mm}$



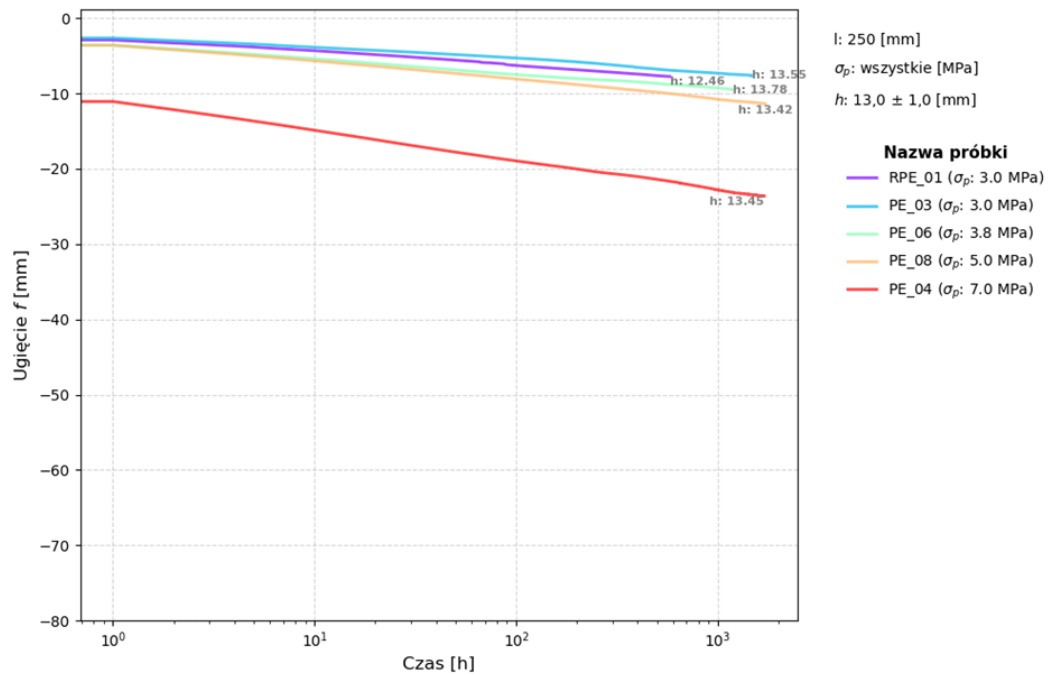
Rys. Z3-5 Wykres zależności ugięcia belek zginanych do czasu:
rozstaw $l = 250\text{mm}$, grubość $h = 11,0 \pm 1,0 \text{ mm}$

Fig. Z3-5 Beam deflection vs. time: span length $l = 250\text{mm}$, thickness $h = 11,0 \pm 1,0 \text{ mm}$



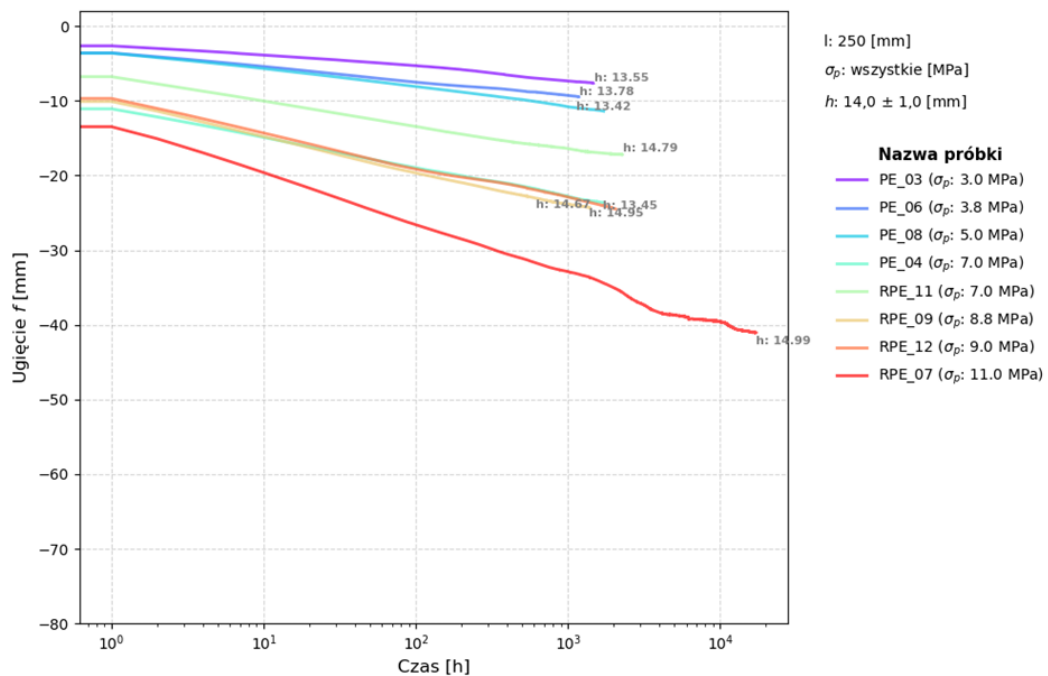
Rys. Z3-6 Wykres zależności ugięcia belek zginanych do czasu:
rozstaw $l = 200\text{mm}$, grubość $h = 12,0 \pm 1,0 \text{ mm}$

Fig. Z3-6 Beam deflection vs. time: span length $l = 250\text{mm}$, thickness $h = 12,0 \pm 1,0 \text{ mm}$



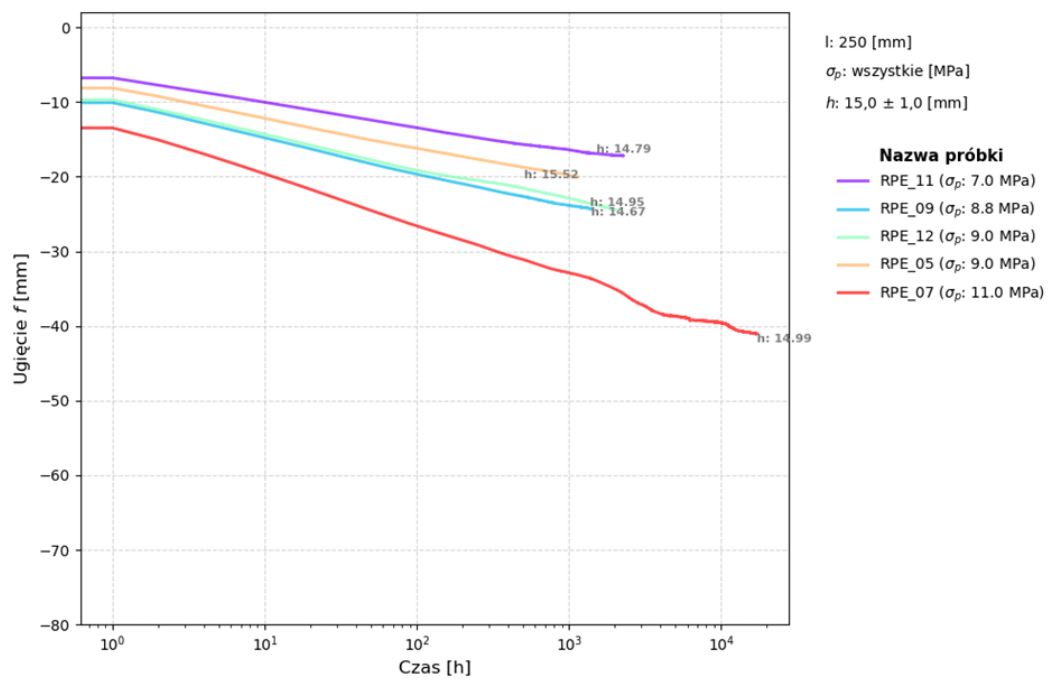
Rys. Z3-7 Wykres zależności ugięcia belek zginanych do czasu:
rozstaw $l = 250\text{mm}$, grubość $h = 13,0 \pm 1,0\text{ mm}$

Fig. Z3-7 Beam deflection vs. time: span length $l = 250\text{mm}$, thickness $h = 13,0 \pm 1,0\text{ mm}$



Rys. Z3-8 Wykres zależności ugięcia belek zginanych do czasu:
rozstaw $l = 250\text{mm}$, grubość $h = 14,0 \pm 1,0\text{ mm}$

Fig. Z3-8 Beam deflection vs. time: span length $l = 250\text{mm}$, thickness $h = 14,0 \pm 1,0\text{ mm}$



Rys. Z3-9 Wykres zależności ugięcia belek zginanych do czasu:
rozstaw $l = 250\text{mm}$, grubość $h = 15,0 \pm 1,0\text{ mm}$

Fig. Z3-9 Beam deflection vs. time: span length $l = 250\text{mm}$, thickness $h = 15,0 \pm 1,0\text{ mm}$

Załącznik 4

*Karty badawcze z pomiarów pełzania
HDPE przy rozciąganiu*

KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	2_e5_05
Data rozpoczęcia badania	08.04.2025
Napężenie początkowe	1,00
Kanał zapisu	CH_4
Baza pomiarowa	140,60
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>
	[mm]	[mm]	[mm ²]
1	11,39	11,04	125,75
2	11,42	11,03	125,96
3	11,45	10,92	125,03
Średnia	11,42	11,00	125,58

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b: $11,42 \pm 0,04$ mm Grubość śr. h: $11,00 \pm 0,08$ mm Pole przekroju śr. A: $125,58 \pm 0,97$ mm ⁴ Baza pomiarowa L ₀ : $140,60 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. T: $21,08 \pm 1,12$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $27,00 \pm 5,30\%$
--	--

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

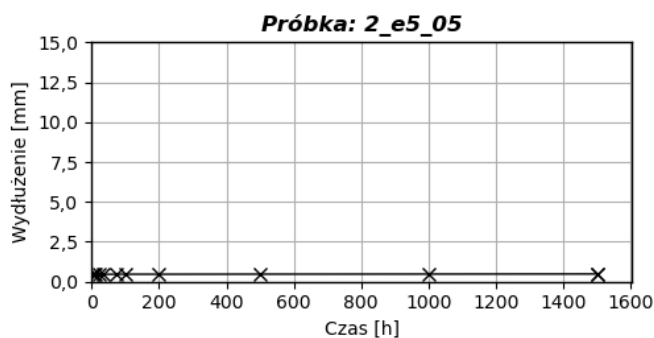
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>A</i>	σ_0
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2025-04-08	12,74	125,00	125,58	1,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t</i> (i) [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	0,43
6	0,44
12	0,44
24	0,45
36	0,46
72	0,47
100	0,47
200	0,47
500	0,47
1000	0,48
1500	0,48
2000	
5000	
Max	0,49

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	2_e6_05
Data rozpoczęcia badania	10.06.2025
Napężenie początkowe	1,00
Kanał zapisu	CH 4
Baza pomiarowa	140,65
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>
	[mm]	[mm]	[mm ²]
1	10,53	11,16	117,51
2	10,52	11,13	117,09
3	10,49	11,03	115,70
Średnia	10,51	11,11	116,77

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b: $10,51 \pm 0,03$ mm Grubość śr. h: $11,11 \pm 0,08$ mm Pole przekroju śr. A: $116,77 \pm 1,89$ mm ⁴ Baza pomiarowa L ₀ : $140,65 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. T: $20,52 \pm 1,05$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $55,00 \pm 5,03\%$
--	--

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

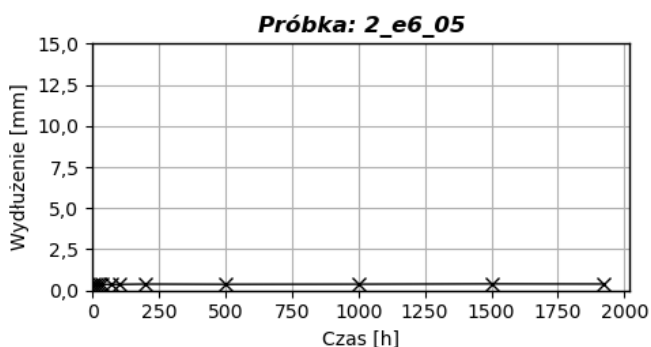
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>A</i>	<i>σ₀</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2025-06-10	11,92	117,00	116,77	1,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	0,35
6	0,35
12	0,36
24	0,36
36	0,36
72	0,37
100	0,37
200	0,39
500	0,38
1000	0,38
1500	0,40
2000	
5000	
Max	0,41

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	2_e5_06
Data rozpoczęcia badania	08.04.2025
Napężenie początkowe	2,00
Kanał zapisu	CH 5
Baza pomiarowa	136,27
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>
	[mm]	[mm]	[mm ²]
1	11,31	10,90	123,28
2	11,40	11,06	126,08
3	11,38	11,04	125,64
Średnia	11,36	11,00	125,00

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b: $11,36 \pm 0,06$ mm Grubość śr. h: $11,00 \pm 0,10$ mm Pole przekroju śr. A: $125,00 \pm 3,01$ mm ⁴ Baza pomiarowa L ₀ : $136,27 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. T: $21,08 \pm 1,12$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $27,00 \pm 5,30\%$
--	--

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

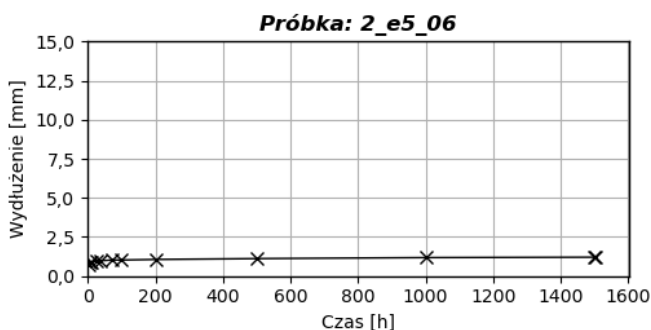
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>A</i>	<i>σ₀</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2025-04-08	25,48	250,00	125,00	2,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	0,75
6	0,86
12	0,91
24	0,96
36	0,98
72	1,03
100	1,03
200	1,06
500	1,12
1000	1,18
1500	1,21
2000	
5000	
Max	1,21

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	2_e6_06
Data rozpoczęcia badania	10.06.2025
Napężenie początkowe	2,00
Kanał zapisu	CH 5
Baza pomiarowa	140,25
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>
	[mm]	[mm]	[mm ²]
1	11,06	11,70	129,40
2	11,19	11,73	131,26
3	11,25	11,67	131,29
Średnia	11,17	11,70	130,65

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b: $11,17 \pm 0,11$ mm Grubość śr. h: $11,70 \pm 0,04$ mm Pole przekroju śr. A: $130,65 \pm 2,16$ mm ⁴ Baza pomiarowa L ₀ : $140,25 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. T: $20,52 \pm 1,05$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $55,00 \pm 5,03\%$
--	--

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>A</i>	σ_0
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2025-06-10	26,60	261,00	130,65	2,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	0,87
6	0,96
12	0,99
24	1,04
36	1,06
72	1,10
100	1,12
200	1,15
500	1,25
1000	1,27
1500	1,29
2000	
5000	
Max	1,35

5. UWAGI I OBSERWACJE

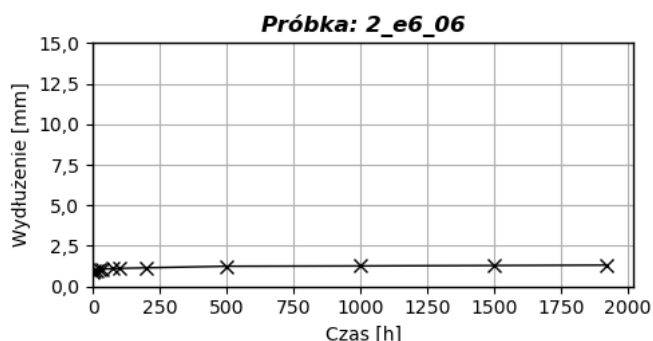
.....

.....

.....

.....

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	2_e4_06
Data rozpoczęcia badania	07.02.2024
Naprężenie początkowe	3,00
Kanał zapisu	CH 4
Baza pomiarowa	121,55
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
Lp.	b [mm]	h [mm]	A [mm ²]
1	10,27	9,73	99,93
2	10,34	9,49	98,13
3	10,25	9,59	98,30
Średnia	10,29	9,60	98,78

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b : $10,29 \pm 0,06$ mm Grubość śr. h : $9,60 \pm 0,14$ mm Pole przekroju śr. A : $98,78 \pm 1,99$ mm ⁴ Baza pomiarowa L_0 : $121,55 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. T : $19,77 \pm 0,42$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $38,66 \pm 5,04\%$
--	---

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

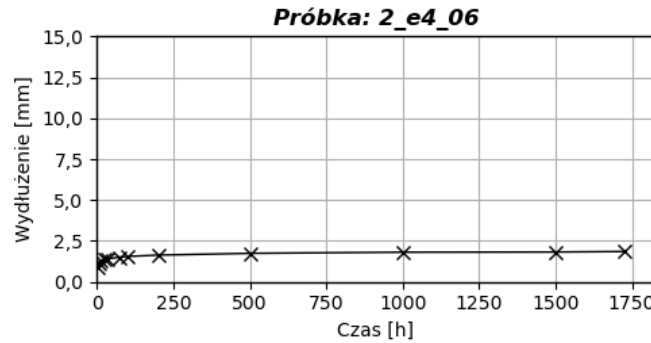
Lp.	Czas	Masa	F	A	σ_0
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2024-02-07	30,21	296,40	98,78	3,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas $t(i)$ [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	0,91
6	1,17
12	1,26
24	1,36
36	1,41
72	1,50
100	1,56
200	1,64
500	1,75
1000	1,81
1500	1,83
2000	
5000	
Max	1,86

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....
.....
.....
.....
.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	2_e6_04
Data rozpoczęcia badania	12.02.2025
Napężenie początkowe	4,00
Kanał zapisu	CH 4
Baza pomiarowa	120,60
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>
	[mm]	[mm]	[mm ²]
1	10,37	11,09	115,00
2	10,42	11,11	115,77
3	10,40	11,10	115,44
Średnia	10,40	11,10	115,40

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b: $10,40 \pm 0,04$ mm Grubość śr. h: $11,10 \pm 0,03$ mm Pole przekroju śr. A: $115,40 \pm 0,77$ mm ⁴ Baza pomiarowa L ₀ : $120,60 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. T: $19,54 \pm 0,50$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $49,93 \pm 7,21\%$
--	--

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

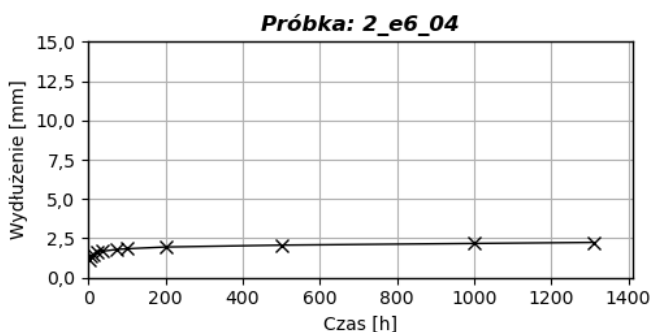
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>A</i>	<i>σ₀</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2025-02-12	47,09	462,00	115,40	4,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	1,10
6	1,36
12	1,47
24	1,60
36	1,68
72	1,79
100	1,84
200	1,95
500	2,07
1000	2,18
1500	
2000	
5000	
Max	2,24

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	D_e4_08
Data rozpoczęcia badania	07.02.2024
Napężenie początkowe	5,00
Kanał zapisu	CH_5
Baza pomiarowa	121,83
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
Lp.	b [mm]	h [mm]	A [mm ²]
1	10,37	11,73	121,64
2	10,32	11,69	120,64
3	10,35	11,67	120,78
Średnia	10,35	11,70	121,02

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b : $10,35 \pm 0,04$ mm Grubość śr. h : $11,70 \pm 0,04$ mm Pole przekroju śr. A : $121,02 \pm 1,08$ mm ⁴ Baza pomiarowa L_0 : $121,83 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. T : $19,77 \pm 0,42$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $38,66 \pm 5,04\%$
--	---

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.
Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

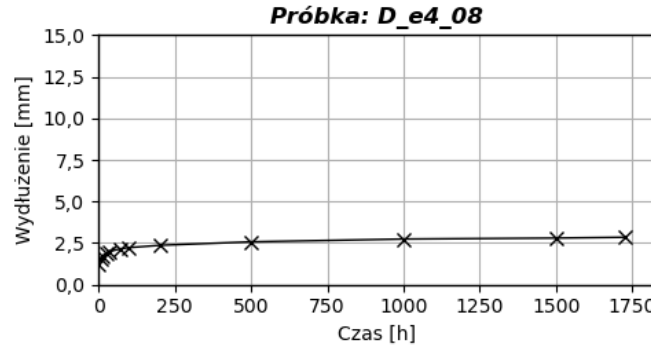
Lp.	Czas	Masa	F	A	σ_0
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2024-02-07	61,66	605,00	121,02	5,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas $t(i)$ [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	1,22
6	1,58
12	1,73
24	1,90
36	2,00
72	2,16
100	2,23
200	2,37
500	2,58
1000	2,74
1500	2,80
2000	
5000	
Max	2,86

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	2_e4_05
Data rozpoczęcia badania	12.02.2025
Napężenie początkowe	6,00
Kanał zapisu	CH_5
Baza pomiarowa	148,30
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>
	[mm]	[mm]	[mm ²]
1	10,25	9,74	99,84
2	10,33	9,49	98,03
3	10,28	9,57	98,38
Średnia	10,29	9,60	98,75

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. <i>b</i> : $10,29 \pm 0,05$ mm Grubość śr. <i>h</i> : $9,60 \pm 0,15$ mm Pole przekroju śr. <i>A</i> : $98,75 \pm 1,91$ mm ⁴ Baza pomiarowa <i>L₀</i> : $148,30 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. <i>T</i> : $19,54 \pm 0,52$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $49,93 \pm 7,21\%$
--	--

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

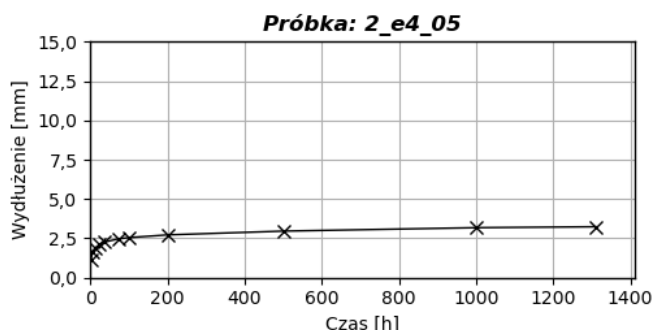
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>A</i>	σ_0
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2025-02-12	60,44	593,00	98,75	6,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	1,11
6	1,66
12	1,89
24	2,12
36	2,26
72	2,47
100	2,55
200	2,72
500	2,96
1000	3,18
1500	
2000	
5000	
Max	3,27

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	D_e4_07
Data rozpoczęcia badania	07.02.2024
Naprężenie początkowe	7,00
Kanał zapisu	CH 6
Baza pomiarowa	127,20
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
Lp.	b [mm]	h [mm]	A [mm ²]
1	10,73	11,92	127,90
2	10,69	11,91	127,32
3	10,61	11,95	126,79
Średnia	10,68	11,93	127,34

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b : $10,68 \pm 0,07$ mm Grubość śr. h : $11,93 \pm 0,03$ mm Pole przekroju śr. A : $127,34 \pm 1,11$ mm ⁴ Baza pomiarowa L_0 : $127,20 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. T : $19,77 \pm 0,42$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $38,66 \pm 5,04\%$
--	---

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

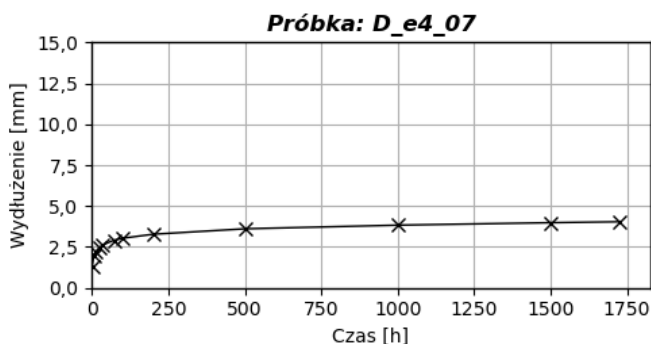
Lp.	Czas	Masa	F	A	σ_0
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2024-02-07	90,82	891,10	127,34	7,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas $t(i)$ [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	1,34
6	1,94
12	2,20
24	2,47
36	2,63
72	2,91
100	3,03
200	3,28
500	3,61
1000	3,83
1500	3,98
2000	
5000	
Max	4,06

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	2_e4_07
Data rozpoczęcia badania	12.02.2025
Naprężenie początkowe	8,00
Kanał zapisu	CH 6
Baza pomiarowa	148,15
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>
	[mm]	[mm]	[mm ²]
1	10,17	9,58	97,43
2	10,14	9,51	96,43
3	10,12	9,58	96,95
Średnia	10,14	9,56	96,94

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b: 10,14 ± 0,04 mm Grubość śr. h: 9,56 ± 0,05 mm Pole przekroju śr. A: 96,94 ± 1,00 mm ² Baza pomiarowa L ₀ : 148,15 ± 0,024 mm	Temperatura śr. T: 19,54 ± 0,50 °C Wilgotność wzgl. śr.: 49,93 ± 7,21%
--	---

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

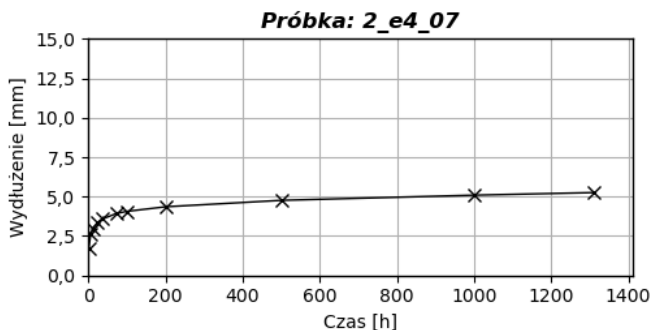
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>A</i>	<i>σ₀</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2025-02-12	78,98	775,00	96,94	8,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	1,72
6	2,61
12	2,99
24	3,37
36	3,57
72	3,93
100	4,07
200	4,36
500	4,76
1000	5,09
1500	
2000	
5000	
Max	5,26

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	2_e5_07
Data rozpoczęcia badania	08.04.2025
Naprężenie początkowe	9,00
Kanał zapisu	CH 6
Baza pomiarowa	140,15
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKİ

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>
	[mm]	[mm]	[mm ²]
1	10,38	11,58	120,20
2	10,32	11,59	119,61
3	10,27	11,51	118,21
Średnia	10,32	11,56	119,34

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b: $10,32 \pm 0,07$ mm	Temperatura śr. T: $21,08 \pm 1,12$ °C
Grubość śr. h: $11,56 \pm 0,06$ mm	Wilgotność wzgl. śr.: $27,00 \pm 5,30\%$
Pole przekroju śr. A: $119,34 \pm 2,05$ mm ⁴	
Baza pomiarowa L ₀ : $140,15 \pm 0,024$ mm	

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

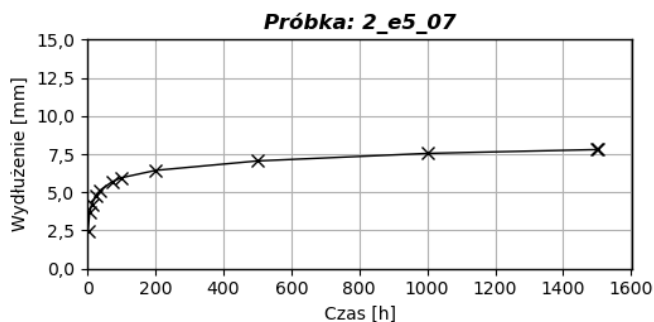
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>A</i>	σ_0
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2025-04-08	109,56	1075,00	119,34	9,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	2,45
6	3,68
12	4,21
24	4,78
36	5,12
72	5,69
100	5,96
200	6,44
500	7,06
1000	7,55
1500	7,80
2000	
5000	
Max	7,83

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	2_e6_07
Data rozpoczęcia badania	10.06.2025
Napężenie początkowe	9,00
Kanał zapisu	CH 6
Baza pomiarowa	140,95
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKI

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>
	[mm]	[mm]	[mm ²]
1	10,54	11,13	117,31
2	10,65	11,21	119,39
3	10,67	11,13	118,76
Średnia	10,62	11,16	118,48

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b: $10,62 \pm 0,08$ mm Grubość śr. h: $11,16 \pm 0,06$ mm Pole przekroju śr. A: $118,48 \pm 2,13$ mm ⁴ Baza pomiarowa L ₀ : $140,95 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. T: $20,52 \pm 1,05$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $55,00 \pm 5,03\%$
--	--

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

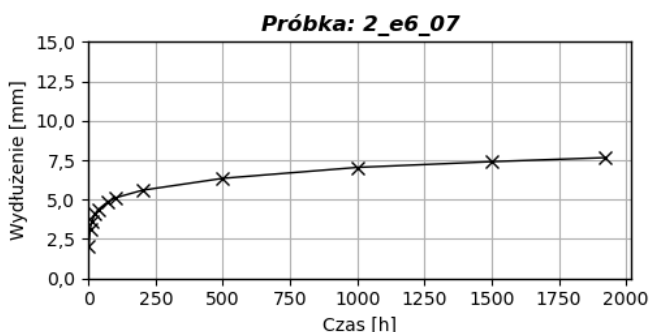
<i>Lp.</i>	Czas	Masa	<i>F</i>	<i>A</i>	σ_0
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2025-06-10	108,64	1066,00	118,48	9,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	2,02
6	3,10
12	3,58
24	4,08
36	4,37
72	4,86
100	5,11
200	5,59
500	6,35
1000	7,04
1500	7,41
2000	
5000	
Max	7,67

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



KARTA BADAWCZA

1. INFORMACJE PODSTAWOWE

Nazwa próbki	3_e6_08
Data rozpoczęcia badania	11.01.2024
Napężenie początkowe	10,00
Kanał zapisu	CH 5
Baza pomiarowa	131,52
Temperatura średnia	20,91
Wilgotność względna średnia	41,95

2. WYMIARY PRÓBKII

Wymiary	Szerokość	Grubość	Pole przekroju
<i>Lp.</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>
	[mm]	[mm]	[mm ²]
1	11,21	10,33	115,80
2	11,20	10,23	114,58
3	11,24	10,17	114,31
Średnia	11,22	10,24	114,90

WYNIKI Z NIEPEWNOŚCIAMI POMIAROWYMI:

Szerokość śr. b: $11,22 \pm 0,03$ mm Grubość śr. h: $10,24 \pm 0,10$ mm Pole przekroju śr. A: $114,90 \pm 1,59$ mm ⁴ Baza pomiarowa L ₀ : $131,52 \pm 0,024$ mm	Temperatura śr. T: $19,15 \pm 0,16$ °C Wilgotność wzgl. śr.: $35,04 \pm 3,29\%$
--	--

* Niepewność rozszerzona ($k=2$) – poziom ufności ok. 95%.

Przyjęto niepewność suwmiarki 0,02 mm.

3. PARAMETRY BADANIA

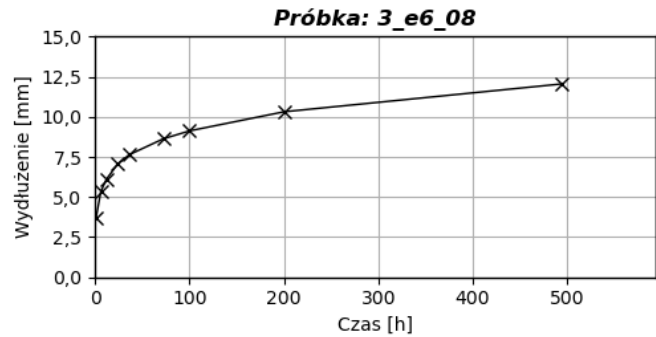
<i>Lp.</i>	<i>Czas</i>	<i>Masa</i>	<i>F</i>	<i>A</i>	<i>σ₀</i>
	[rrrr-mm-dd]	[kg]	[N]	[mm ²]	[MPa]
1	2024-01-11	117,20	1150,00	114,90	10,00

4. POMIARY GODZINOWE

Czas <i>t(i)</i> [h]	Wydłużenie ΔL [mm]
1	3,73
6	5,35
12	6,12
24	7,07
36	7,64
72	8,63
100	9,13
200	10,31
500	
1000	
1500	
2000	
5000	
Max	12,05

5. UWAGI I OBSERWACJE

.....



Załącznik 5

Zestawienie wyników pomiarów pełzania HDPE przy rozciąganiu

Tabela Z5-1 Wyznaczenie współczynnika korekcyjnego dla bazy pomiarowej $l_0 = 80\text{mm}$, model materiału idealnie sprężysty, $E=200\text{ MPa}$

Table Z5-1 Correction factor for gauge length $l_0 = 80\text{mm}$, elastic material model, $E=200\text{ MPa}$

Nazwa próbki	Rozstaw w osiach śrub L_0	Napężenie początkowe σ_0	Siła F	Wydłużenie ΔL_{obl}	Przemieszczenie dolna krawędź bazy pomiarowej u_d	Przemieszczenie górna krawędź bazy pomiarowej u_g	Wydłużenie bazy 80 mm Δl_{obl}	Współczynnik k (I/F)
	[mm]	[MPa]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
A	B	D	E	F	G	H	I	J
2_e5_05	140,60	1,00	125,00	0,61	0,51	0,11	0,40	0,66
2_e6_05	140,65	1,00	117,00	0,61	0,51	0,10	0,40	0,66
2_e5_06	136,27	2,00	250,00	1,22	1,02	0,20	0,81	0,67
2_e6_06	140,25	2,00	261,00	1,24	1,02	0,21	0,81	0,66
2_e4_06	121,55	3,00	296,40	1,68	1,46	0,23	1,23	0,73
2_e6_04	120,60	4,00	462,00	2,25	1,95	0,30	1,65	0,73
D_e4_08	121,83	5,00	605,00	2,85	2,46	0,39	2,07	0,73
2_e4_05	148,30	6,00	593,00	3,90	3,20	0,70	2,51	0,64
D_e4_07	127,20	7,00	891,10	4,17	3,56	0,62	2,94	0,70
2_e4_07	148,15	8,00	775,00	5,25	4,31	0,93	3,38	0,65
2_e5_07	140,15	9,00	1075,00	5,77	4,80	0,96	3,84	0,67
2_e6_07	140,95	9,00	1066,00	5,68	4,76	0,92	3,84	0,68
3_e6_08	131,52	10,00	1150,00	6,20	5,25	0,95	4,30	0,69

Tabela Z5-2 Zestawienie wartości parametrów modelu dla poszczególnych próbek (niezależna aproksymacja każdej próbki)

Table Z5-2 Summary of model parameter values for individual specimens (independent approximation of each specimen)

Oznaczenie	2_e5_05	2_e6_05	2_e6_06	2_e5_06	2_e4_06	2_e6_04	D_e4_08	2_e4_05	D_e4_07	2_e4_07	2_e6_07	2_e5_07	3_e6_08
$1/C_0 =$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$C_1 =$	0,0053	0,0046	0,0054	0,0048	0,0053	0,0051	0,0053	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0045
$C_2 =$	0,0199	0,0401	0,0291	0,0013	0,0990	0,0265	0,0277	0,0013	0,0043	0,0015	0,0020	0,0046	0,0028
$n =$	0,019	0,026	0,119	0,111	0,208	0,160	0,184	0,157	0,174	0,157	0,207	0,170	0,150
$\sigma_{max} =$	2,95	4,61	5,31	4,94	8,72	14,58	12,78	15,18	14,72	14,78	14,77	14,57	13,14
$\nu =$	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
$\sigma_0 =$	1	1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	9	10
błąd śr. kwadratowy ($\cdot 10^{-3}$)	0,038	0,057	0,134	0,103	0,088	0,105	0,117	0,204	0,211	0,294	0,354	0,528	1,987