

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ



Mgr inż. Michał Szaroleta

Rozprawa doktorska

**Wpływ konstrukcji i działania zespołu sadzącego na proces
sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym**

Promotor: Prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, dr h.c., prof. h.c.
Promotor pomocniczy: Dr inż. Justyna Trojanowska

Poznań 2025

Oświadczenie o finansowaniu badań

Badania zostały przeprowadzone w ramach Programu Doktorat Wdrożeniowy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego realizowanego w latach 2020–2024 w ramach umowy nr DWD/5/0354/2021.

Podziękowania

Serdeczne podziękowania składam na ręce Promotorów, których wsparcie i merytoryczna pomoc przyczyniły się do powstania tej pracy.

Pragnę wyrazić także podziękowania dla koleżanek i kolegów z pracy. Zawsze byli chętni do pomocy podczas wykonywania mojej pracy doktorskiej. Ich wiedza i doświadczenie były nieocenione na każdym etapie pracy.

Najserdeczniejsze podziękowania składam mojej żonie, która z pełnym zrozumieniem akceptowała moją nieobecność przy niej przez cały okres pisania pracy oraz wierzyła w powodzenie moich działań.

Spis treści

STRESZCZENIE	5
SUMMARY	5
Słowa kluczowe	6
1. WSTĘP	7
1.1. Wprowadzenie do tematu	7
1.2. Geneza tematu	8
2. OBECNY STAN WIEDZY	10
2.1. Analiza literatury	10
2.2. Przegląd rynku narzędzi sadzących; porównanie konstrukcji i funkcjonalności	22
3. CEL PRACY, PROBLEM NAUKOWY I TEZA PRACY	39
4. METODYKA BADAWCZA	41
4.1. Analiza wytrzymałościowa MES	41
4.1.1. Szacowanie oporów roboczych	41
4.1.2. Budowa modeli obliczeniowych	42
4.2. Badania laboratoryjne	47
4.3. Badania polowe	52
4.4. Statystyczne opracowanie wyników	65
5. PROJEKT NOWEJ KONSTRUKCJI SADZĄCEJ	66
5.1. Koncepcje rozwiązań nowego narzędzia	66
5.2. Uzasadnienie wyboru i analiza wybranej koncepcji	69
5.3. Analiza wytrzymałościowa MES	71
6. PARAMETRY WPŁYWAJĄCE NA POPRAWNOŚĆ PROCESU SADZENIA	80
6.1. Geometria ostrza	80
6.2. Parametry pracy	80
7. BADANIA LABORATORYJNE I POLOWE	82
7.1. Badania laboratoryjne	82
7.2. Badania polowe w warunkach rzeczywistych	83
8. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA	99
8.1. Badania laboratoryjne	99

8.2.	Badania polowe	102
8.3.	Statystyczne opracowanie wyników badań polowych	115
9.	PRACE WDROŻENIOWE	118
9.1.	Istniejące rozwiązanie jako baza.....	118
9.2.	Modyfikacja służąca wdrożeniu.....	118
9.3.	Możliwości wdrożenia i przeznaczenie opracowanego narzędzia sadzącego	121
9.4.	Identyfikacja klientów.....	122
9.5.	Kryteria wyceny produktu.....	122
9.6.	Sposoby wdrożenia	123
10.	DOKUMENTACJA DOTYCZĄCA NARZĘDZIA.....	125
10.1.	Dokumentacja techniczna.....	125
10.2.	Schemat połączeń hydraulicznych	125
10.3.	Instrukcja obsługi.....	125
11.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	126
11.1.	Wnioski dotyczące tezy pracy	126
11.2.	Wnioski poznawcze	126
11.3.	Wnioski użytkowe i dotyczące wdrożenia	127
11.4.	Wnioski dotyczące dalszych badań.....	128
BIBLIOGRAFIA		126
SPIS RYSUNKÓW		138
SPIS TABEL		143
ZAŁĄCZNI.....		144

STRESZCZENIE

Problemem naukowym niniejszej dysertacji jest relacja między postacią konstrukcyjną zespołu sadzącego, w tym przede wszystkim narzędzia sadzącego, a poprawnością procesu sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym określaną za pomocą odpowiednich przyjętych parametrów.

Głównym celem praktycznym pracy było opracowanie nowej wersji narzędzia sadzącego przeznaczonego do sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym.

Pierwszym etapem prac było dokonanie analizy dostępnej literatury oraz aktualnego stanu rynku pod kątem dostępności różnych maszyn i urządzeń przeznaczonych do sadzenia drzewek. W wyniku realizacji tego etapu zidentyfikowano lukę badawczą, którą postanowiono wypełnić. Luka ta dotyczy poprawy kształtu pracującego w glebie narzędzia do sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym oraz sposobu zagłębiania narzędzia sadzącego w glebę.

W kolejnym kroku przygotowano koncepcje nowej wersji narzędzia wraz z opracowaniem metodyki badań doświadczalnych. Zasadniczymi częściami tej metodyki było przygotowanie analizy wytrzymałościowej MES, badań laboratoryjnych, badań polowych oraz analiza i interpretacja wyników wraz z ich analizą statystyczną.

W dalszym etapie wykonano badania laboratoryjne oraz polowe, które miały na celu porównanie dwóch wersji narzędzia sadzącego. Celem prowadzenia badań było uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy kształt i parametry geometryczne narzędzia sadzącego mają wpływ na jakość wykonywania tego procesu, a także za pomocą której wersji narzędzia wykonuje się pracę w sposób bardziej płynny. Wykonane w pierwszej kolejności badania laboratoryjne wskazały tendencję w pracy obu wersji narzędzia, a wyniki pozwoliły wstępnie określić przewagę jednej wersji nad drugą. Z kolei wykonane w drugiej kolejności badania polowe pozwoliły w pełni określić różnice między badanymi narzędziami poprzez możliwości penetracyjne gruntu, generowanie oporu od gruntu podczas pracy oraz poprawność przemieszczania się sadzonki przez narzędzie sadzące. Badania te prowadzono dwuetapowo. Etap pierwszy polegał na pozyskaniu danych mierzalnych zebranych z wykorzystanych czujników. Etap drugi wykonano z zastosowaniem zestawu kół dociskowych i polegał on na obserwacji poprawności procesu sadzenia z użyciem obu wersji ostrza sadzącego. Ostatnim krokiem badań było opracowanie wyników wykonanych badań wraz z przeprowadzeniem analizy statystycznej.

Podsumowując, należy stwierdzić, że oprócz porównania zgromadzonych mierzalnych wyników z prac doświadczalnych, wykonano także obserwacje poprawności pracy zespołu sadzącego z dwiema wersjami narzędzia w warunkach terenowych. Obserwacje te potwierdzają przewagę działania stożkowej wersji narzędzia nad wersją klinową. Poczynione obserwacje oraz najważniejsze informacje zebrane z analizy danych uwzględniono w końcowych wnioskach.

SUMMARY

The scientific problem of this dissertation is the relationship between the design of the planting assembly, primarily the planting tool, and the correctness of the planting process for covered-root trees, determined using appropriate parameters.

The main practical goal of this work was to develop a new version of the planting tool designed for planting covered-root trees.

The first stage of the work was to analyse the available literature and the current market status regarding the availability of various machines and devices intended for planting trees. As a result of this stage, a research gap was identified and the decision was made to fill it. This gap

concerns improving the shape of the planting tool for covered-root trees operating in the soil and the method of inserting the planting tool into the soil.

The next step was to prepare the concept for the new version of the tool, along with the development of an experimental research methodology. The essential elements of this methodology included preparing an FEM strength analysis, laboratory tests, field tests, and the analysis and interpretation of the results, along with their statistical analysis.

Next, laboratory and field tests were conducted to compare the two versions of the planting tool. The aim of the research was to determine whether the shape and geometric parameters of the planting tool affected the quality of the process, and which version of the tool performed the work more smoothly. The initial laboratory tests revealed trends in the operation of both versions of the tool, and the results allowed for a preliminary determination of the advantage of one version over the other. The second field tests, in turn, fully determined the differences between the tested tools in terms of soil penetration capabilities, ground resistance generated during operation, and the correct movement of the seedling through the planting tool. These tests were conducted in two stages. The first stage involved obtaining measurable data collected from the sensors. The second stage involved using a set of pressure wheels and observing the correctness of the planting process using both versions of the planting blade. The final stage of the research involved processing the test results and conducting a statistical analysis.

In summary, in addition to comparing the collected measurable results from the experimental work, field observations were also made of the correct operation of the planting unit with the two versions of the tool. These observations confirm the superiority of the conical version of the tool over the wedge version. These observations, along with the most important information gathered from the data analysis, were incorporated into the final conclusions.

Słowa kluczowe

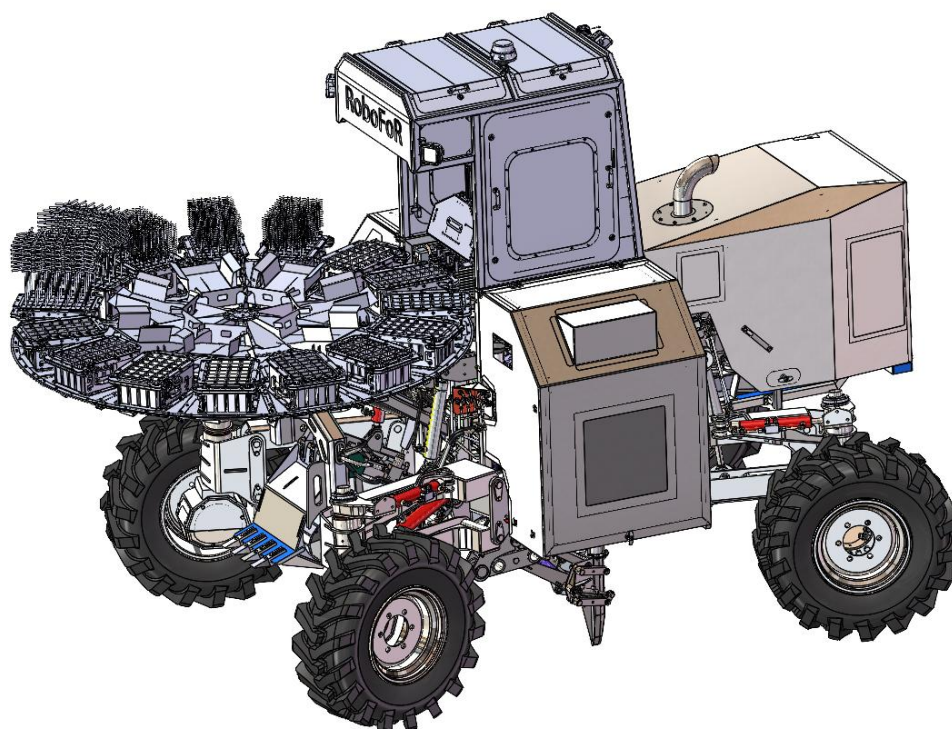
Sadzenie drzewek, zakryty system korzeniowy, sadzonka, szkółkarstwo leśne, kostur sadzący, obliczenia MES, badania polowe

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie do tematu

W obecnych czasach dość spora część prac w leśnictwie wykonywana jest z wykorzystaniem siły ludzkich mięśni. Stanowi to problem, ponieważ utrudnia i wydłuża czas potrzebny na wykonanie prac na coraz większych obszarach. Zasadnym wydaje się zatem stosowanie nowoczesnych systemów, które pozwolą przyspieszyć i przede wszystkim zautomatyzować wykonywanie podstawowych prac, jednocześnie odciążając w tym aspekcie ludzi [19] [28] [87].

W ramach jednego z projektów, którego doktorant był współautorem, mającego na celu usprawnienie prac wykonywanych w leśnictwie, a dotyczącego konkretnie sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym, powstał autonomiczny robot sadzący. Jest to automatyczna jednostka samojezdna (wymagana jest jedna osoba do nadzorowania pracy pojazdu), która została wyposażona w komplet podukładów odpowiedzialnych za: magazynowanie sadzonek, następnie podawanie ich do magazynu buforowego i dalej do narzędzia sadzącego, by w końcowej fazie sadzenia sadzonka mogła znaleźć się w glebie i być dognieciona zestawem odpowiednich kół [40] [104] [105]. Model automatycznego robota, który powstał w wyniku ukończenia wspomnianego projektu przedstawiono na rys. Rys. 1.1.



Rys. 1.1. Model CAD 3D robota przeznaczonego do sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym [105]

Robot ten w swej prototypowej wersji przeszedł pomyślnie szereg testów w rzeczywistych warunkach pracy, na przeznaczonych pod zalesienie powierzchniach leśnych. Posiada możliwość samodzielnego poruszania się wraz z pokonywaniem przeszkód, pobiera ze zintegrowanego magazynu sadzonki, przygotowuje placówkę do wysadzenia sadzonki, osadza sadzonkę w ziemi i ją przygniata [2] [4] [109] [114].

W efekcie powstała konstrukcja, która w swej prototypowej postaci ma możliwość wykonywania pracy, która w wielu przypadkach była dotychczas wykonywana siłą ludzkich mięśni. Niemniej, jakość wykonywanej przez maszynę pracy może ulec poprawie, np. poprzez

poprawę wydajności, szybkości, wyeliminowanie powstających błędów systemów sterująco-kontrolnych czy optymalizację pewnych parametrów w celu zwiększenia ekonomiczności pracy [102].

Parametry fizyczne powstałej maszyny oraz parametry jej pracy kształtują się następująco:

- szerokość: 2500 mm,
- długość: 4500 mm,
- wysokość robocza: 2600÷3400 mm,
- wysokość transportowa: 2600 mm,
- masa własna: 4500 kg,
- prędkość robocza: 0,1÷2 km/h,
- prędkość transportowa: 0,1÷4 km/h [110][114].

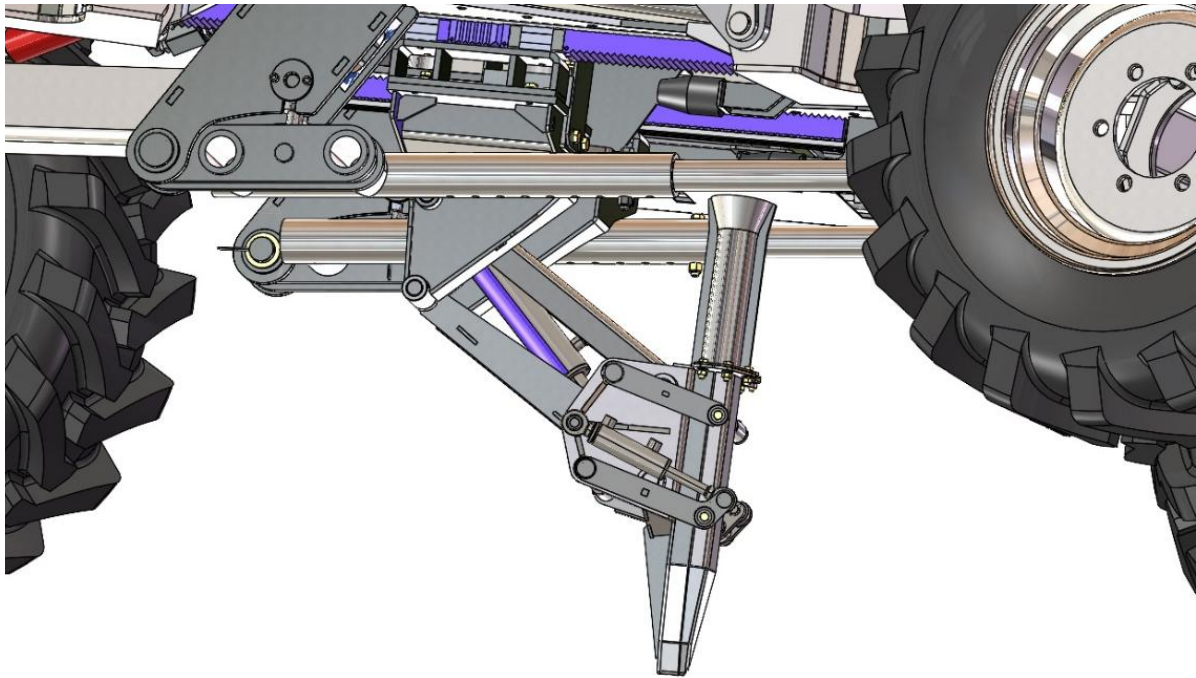
1.2. Geneza tematu

Prototyp robota do sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym podczas prób polowych w warunkach rzeczywistych zasadniczo prawidłowo wykonywał proces technologiczny sadzenia, tzn. w sposób powtarzalny wykonywane były wszystkie elementarne czynności, które są składową kompletnej operacji od pobrania sadzonki z magazynu, aż po końcowy krok przygnięcia sadzonki w glebie.

Podczas sadzenia drzewek zaobserwowano jednak pewne, negatywnie wpływające na jakość pracy aspekty, które mogłyby zostać wyeliminowane. Mają one istotny wpływ na jakość pracy narzędzia i realizację jego podstawowej funkcji, jaką jest sadzenie w ziemi drzewek z zakrytym systemem korzeniowym. Mowa jest o takich zjawiskach, jak:

- zakleszczanie się sadzonek wewnątrz narzędzia sadzącego,
- unoszenie sadzonki przez narzędzie sadzące zanim zostanie ona dognieciona, co skutkuje dognieceniem sadzonki w pozycji różnej od pionowej lub nawet leżącej,
- brak możliwości zagłębienia narzędzia sadzącego, kiedy na drodze penetracji wystąpi obiekt trudny do pokonania lub, być może, zbyt mocno zbита warstwa gleby.

Poznawszy konstrukcję narzędzia sadzącego podczas prób w warunkach polowych oraz znając charakter jej pracy, postanowiono podjąć próbę rozwiązania wspomnianych problemów. Nawiązując również do obecnej sytuacji, która ma miejsce w pracach odnowieniowych prowadzonych w leśnictwie uznano, iż istnieje wręcz potrzeba wprowadzenia modyfikacji narzędzia sadzącego w celu eliminacji błędów i usprawnienia pracy zespołu pierwotnie zastosowanego w robocie do sadzenia drzewek, by praca ta była wykonywana w sposób maksymalnie efektywny i najmniej energochłonny [31] [33] [105] [111]. Postanowiono więc dokonać próby usprawnienia pracy narzędzia sadzącego. Na Rys. 1.2 przedstawiono widok wężła z narzędziem sadzącym.



Rys. 1.2. Model CAD 3D narzędzia sadzącego będącego składową (stanowiącego jeden z podzespołów) robota do sadzenia drzewek [105]

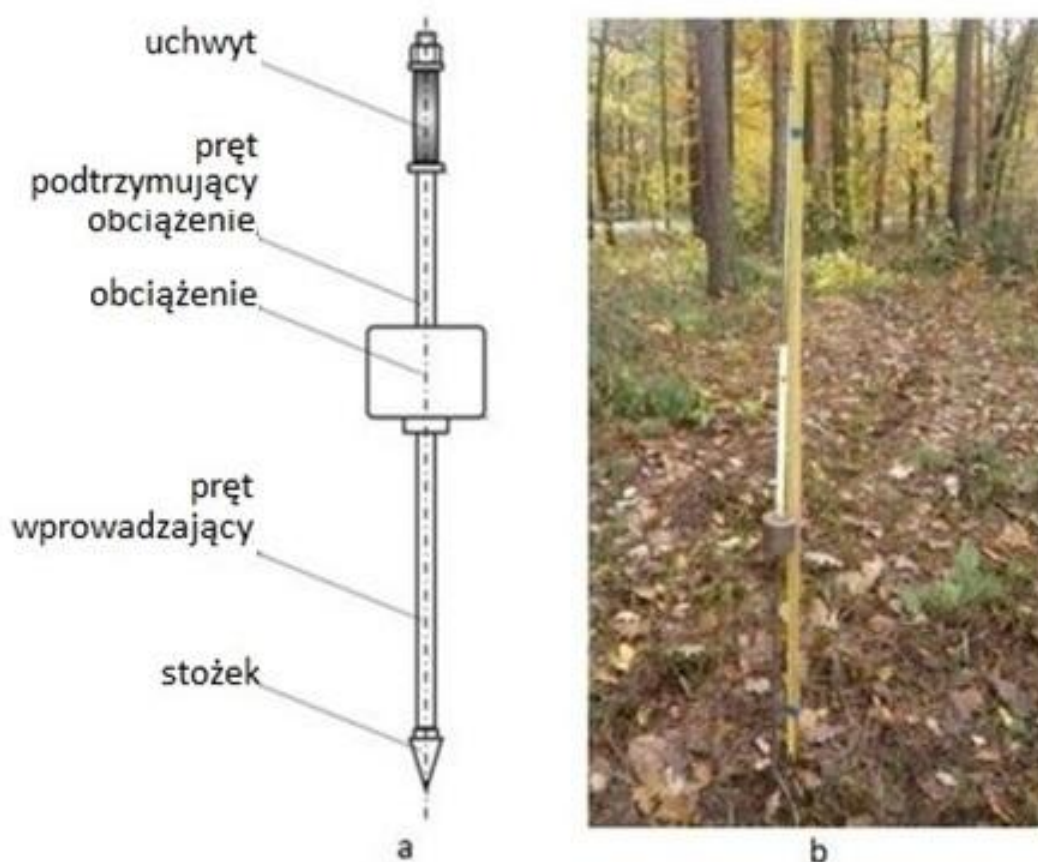
Podczas analizy ewentualnych potrzeb rynkowych oraz uwzględniając możliwości kadrowe i sprzętowe postanowiono podjąć próbę przebadania wpływu kształtu i geometrii narzędzia sadzącego na przebieg kompletnego procesu sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym.

2. OBECNY STAN WIEDZY

2.1. Analiza literatury

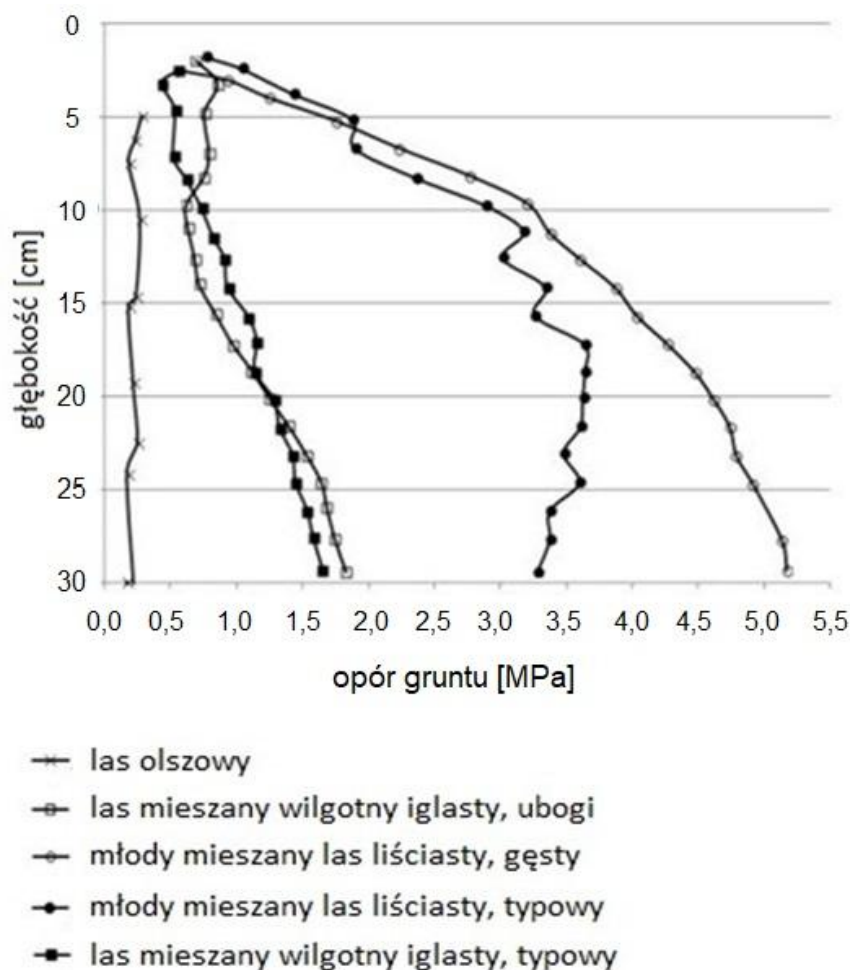
W odniesieniu do zagadnienia sadzenia drzewek, głównie z zakrytym systemem korzeniowym dokonano przeglądu literatury, w aspekcie analizowanej tematyki oraz zagadnień zbliżonych w jakikolwiek sposób do tematu penetracji gleby w ramach prowadzenia różnorodnych prac leśnych. Pozycje literaturowe omawiają tematykę, m.in. wydatku energetycznego związanego z pracą wykonywaną ręcznie, zużycia narzędzi, czy tempa wzrostu sadzonek w zależności od warunków zewnętrznych.

W publikacjach [26] [41] [42] [55] [107] autorzy opisują wyniki pomiarów oporów gleby wykonanych prostym, ekonomicznym penetrometrem na różnych podłożach. Z tych publikacji można wnioskować, iż średni opór penetracji gleby jest zależny od jej wilgotności i rośnie wraz ze wzrostem tego parametru w sposób wykładniczy. Najmniejsze wartości oporu gleby zmierzono na leśnym typie siedliskowym (ASF - ang. *Alder Swamp Forest*), natomiast największe na typie oznaczanym jako MBFf (ang. *Fresh Mixed Broadleaf Forest*). W pierwszym przypadku opory wynosiły około 0,35 MPa, natomiast w drugim była to wartość około 5 MPa. Na Rys. 2.1 przedstawiono narzędzie, którym wykonywane były pomiary, natomiast na **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** przedstawiono wartości oporu gleby otrzymane na różnych typach podłoża.



Rys. 2.1. Narzędzie do oceny zwięzłości gleby wraz z elementami składowymi (po lewej), przykładowe miejsce zastosowania narzędzia (po prawej) [56]

Widok (Rys. 2.1) po stronie lewej a) przedstawia schemat narzędzia wraz z opisem jego części składowych, natomiast po stronie prawej b) przedstawiono zastosowanie narzędzia w czasie pomiaru w przykładowym miejscu.



Rys. 2.2. Opór gleby na różnym podłożu podczas penetracji narzędziem [54]

W treści sprawozdań powstałych w Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznańskim Instytucie Technologicznym, dalej Łukasiewicz-PIT (wcześniej: w Sieć Badawcza Łukasiewicz - Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych) na podstawie prowadzonych prac znaleźć można informacje dotyczące przyjętej metodyki prowadzonych badań i założeń, które korelują z zakresem merytorycznym niniejszej pracy. Robot sadzący, opracowany w Łukasiewicz-PIT przygotowywał placówkę do wysadzenia sadzonki drzew leśnych z zakrytym systemem korzeniowym w zakresie odległości 1-1,5 m w rzędzie. Wymiary placówki wynosiły ok. 0,5 m szerokości i średnio 0,5 m długości, natomiast jej głębokość mieściła się w przedziale od 5 do 25 cm [9] [10] [15] [103].

W kolejnych sprawozdaniach powstałych w Łukasiewicz-PIT [1], [3] zamieszczono informacje na temat założeń pracy robota sadzącego, i tak m.in.:

- maszyna powinna pracować w terenie niekarczowanym, lecz uporządkowanym,
- rozstaw rzędów sadzenia sadzonek powinien mieścić się w przedziale 1,5 do 2 m (zgodnie z zasadami hodowli lasów),
- rozstaw sadzonek w rzędzie powinien być nie mniejszy niż 0,5 m,
- prędkość jazdy automatu podczas pracy powinna wynosić ok. 1 km/h, jednak nie więcej niż 2 km/h,
- głębokość sadzenia powinna być nie większa niż 20 cm,

- wysokość sadzonki powinna wynosić maksymalnie 50 cm, preferowana wysokość to 30 cm,
- sadzonka powinna zostać posadzona w glebie pionowo, niezależnie od ukształtowania terenu,
- sadzonki pochodzą z uprawy w szkółce kontenerowej. Bryłka korzeniowa ma średnicę ok. 50 mm oraz 150-165 mm wysokości [81].

Prace ręczne w zagospodarowaniu lasów oraz rolnictwie charakteryzuje wysoki poziom energochłonności. W dobie rywalizacji na rynku, potrzeby utrzymania się danego podmiotu oraz jednocześnie zwiększania obszaru do zagospodarowania przez pojedynczy podmiot, np. firmę usługową (małe podmioty są wypierane) pojawia się potrzeba mechanizacji, automatyzacji oraz, coraz częściej, optymalizacji już prowadzonych prac i procesów [5] [12]. Wielkość wydatku energetycznego plasuje sadzenie ręczne w zakresie prac ciężkich lub bardzo ciężkich [30] [32] [34] [35]. Tym samym wymuszone jest stosowanie przerw w pracy ludzi wykonujących te zabiegi, co oczywiście powoduje skrócenie czasu operacyjnego zmiany. Sadzenie ręczne sadzonek w leśnictwie bardzo często bazuje na zastosowaniu urządzenia ręcznego nazywanego kosturem, którego przykład zaprezentowano na Rys. 2.3. [17] [18] [46].



Rys. 2.3. Przykład ręcznego kostura stosowanego do sadzenia drzewek **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**

Ręczne umieszczanie sadzonek w glebie z wykorzystaniem takiej metody, jak już wspomniano wymaga sporych nakładów czasowych i tym samym energetycznych. Stosowane kostury mają różne konstrukcje, natomiast każdorazowo operator zmuszony jest również dźwigać zasób sadzonek, które ręcznie umieszcza w urządzeniu, zanim zostaną one osadzone w glebie [43] [58] [65].

Istnieją sadzarki półautomatyczne, które są np. konstrukcjami zagregowanymi z ciągnikami rolniczymi. W tym przypadku część pracy wykonywana jest bezpośrednio przez ciągnik,

a pośrednio przez operatora ciągnika. Inny typ sadzarek to urządzenia montowane na ramieniu koparki gaśnicowej. Zaletą tego typu urządzeń jest niewątpliwie możliwość pracy na każdym podłożu i pokonywanie wszelkich nierówności terenowych. Nie zawsze jednak takie rozwiązanie jest niezbędne, a negatywnym aspektem jest stosowanie dużego źródła mocy, jakim jest silnik koparki, co powoduje wzrost kosztów eksploatacji [90] [91] [92].

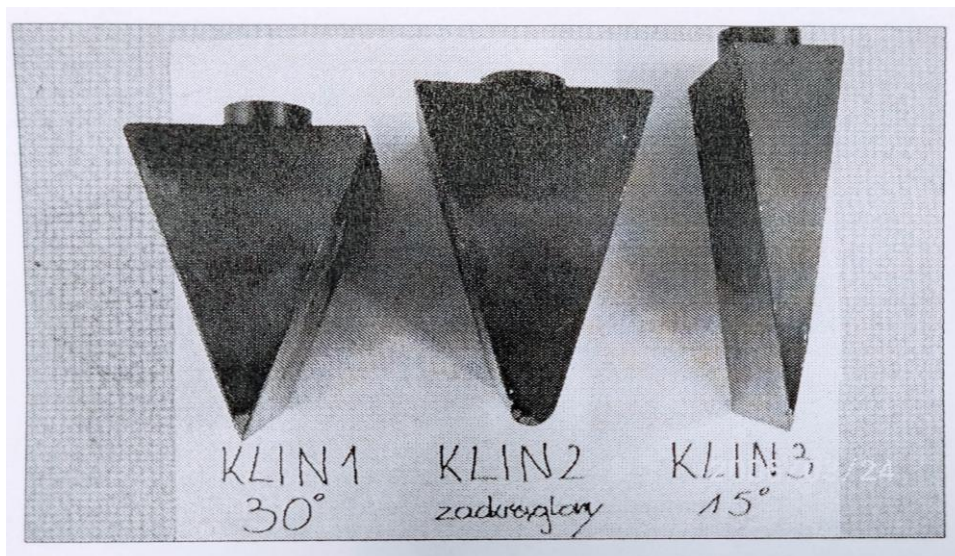
Podczas zalesiania lub odnowienia lasu jednym z bardziej istotnych okresów jest faza doprowadzenia uprawy do fazy młodnika, czyli pierwszy etap od wysadzenia przez pierwsze lata wzrostu. Sadzonki z bryłką korzeniową wykazują znacząco wyższą udatność uprawy w trudnym warunkach ekologicznych, aniżeli sadzonki z odkrytym korzeniem [51] [100]. Te drugie są też bardziej narażone na tzw. szok przesadzeniowy [9] [26] [112].

W literaturze spotkać można również badania dotyczące obciążenia fizycznego na stanowiskach leśniczego i podleśniczego. W jednej z prac podjęto próbę oszacowania wydatku energetycznego dla prac leśnych [34]. Osoby wykonujące czynności na stanowisku leśniczego i podleśniczego poddano badaniom. W przypadku pierwszym, w zależności od pory roku przedział wydatku energetycznego dla 8-godzinnego dnia pracy wynosił od około 3400 do 4500 kJ (średnio 4000 kJ, tj. 955 kcal), natomiast w przypadku podleśniczego był to zakres 4600-5800 kJ (średnio 5500 kJ, tj. 1313 kcal). Zasadniczo ogólny, dopuszczalny poziom wydatku energetycznego podczas dziennego wysiłku fizycznego nie powinien przekraczać 8400 kJ [36] [37] [80] [113].

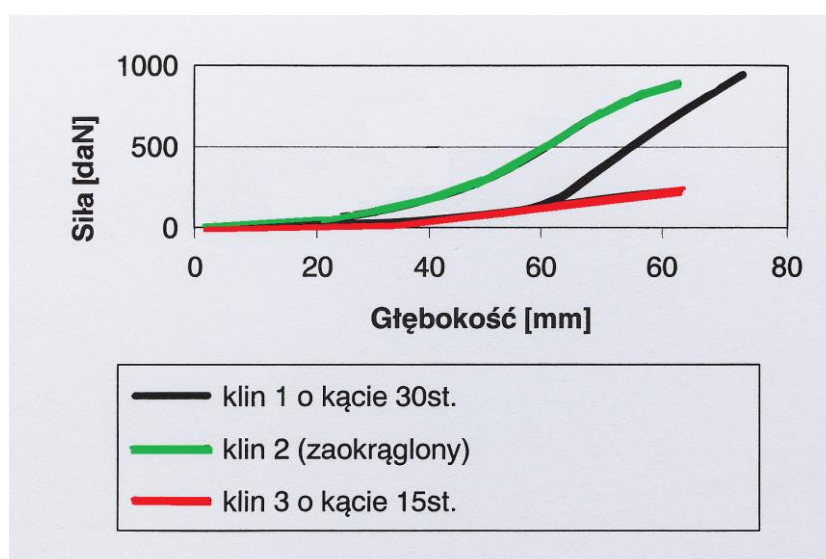
W jednej z prac [70] omówiono badania tempa zużycia narzędzi podczas ich pracy w glebie. Szczególny nacisk położono na zależność tempa zużycia narzędzi od poziomu wilgotności ziemi. W przypadku zastosowanych podczas prowadzenia badań narzędzi, które wykonane zostały ze stali węglowej o twardości 17 HRC ubytek masy ścieranej wzrastał wraz ze wzrostem wilgotności od 0 do około 7%, po czym spadał do momentu, gdy wilgotność ziemi osiągnęła około 21%. W przypadku narzędzi wykonanych ze stali o twardości 51 HRC wraz ze wzrostem wilgotności do poziomu około 7% wzrost ubytku masy był widoczny, jednak w nieco mniejszym stopniu, po czym również spadał do momentu, kiedy to wilgotność gleby osiągnęła wartość około 23%.

W kolejnych analizowanych pracach [39] [66] omawiana są badania i przedstawiona analiza zwięzłości gleby oraz wykorzystywane do tego celu narzędzie zakończone stożkiem wgłębnym występującym w wersjach z różnymi kątami rozwarcia o wartościach 15°, 30° oraz około 25°. Przed wykonaniem prac badaną glebę spulchniono. Otrzymano sześć różnych poziomów zagęszczenia przy trzech poziomach wilgotności; zwięzłość mierzono na głębokości 10 cm. Wnioski, jakie płyną z badań autorów pracy są następujące: wzrost kąta wierzchołkowego zagłębianego stożka (kąt rozwarcia stożka) lub zmniejszenie pola powierzchni podstawy stożka prowadzi do zwiększenia oporu jednostkowego penetracji gleby, bez wpływu na stopień zagęszczenia gleby. Drugi wniosek, jaki wyciągnęli autorzy publikacji mówi o wilgotności gleby, która to wilgotność nie wpływa na zmianę oporów w glebie dla stożków o różnych polach powierzchni ich podstawy.

W pracach [49] [71] przedstawione zostały wyniki pomiarów przebiegu siły oporu penetracji gleby w funkcji głębokości. Skonstruowano w tym celu maszynę, której elementem wykonawczym, zagłębianym w glebie był klin w trzech wariantach: o kątach wierzchołkowym 30° i 15° oraz klin zakończony zaokrągleniem – wartości kąta jego rozwarcia nie podano w publikacji. W przybliżeniu jest to około 25° (Rys. 2.4). Pomiarów dokonano przez aplikację obciążenia na podstawę wgłębnika, by ten zagłębiał się stopniowo w glebie.



Rys. 2.4. Rodzaje klinów zastosowanych w prowadzonym badaniu [71]



Rys. 2.5. Wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań – przebieg siły oporu penetracji w funkcji głębokości penetracji [71]

Wnioski płynące z tych badań są następujące: największe wartości oporów przy jednocześnie najszybszym przyroście oporu charakteryzował się klin zakończony zaokrągleniem. Klin o kącie wierzchołkowym 30° przy zagłębianiu do głębokości około 50 mm wywiera zbliżony opór na głębę, jak klin o kącie 15° . Od głębokości 45 mm opór generowany przez klin o kącie 30° zbliża się do wartości generowanych przez klin zaokrąglony, by na głębokości około 65 mm osiągnąć tę samą wartość oporów. Formę graficzną opisanych powyżej wyników przedstawiono na Rys. 2.5 [71].

W pracach [16] [73] [77] omawiana jest zależność zużycia ściernego narzędzia roboczego od prędkości zagłębiania tego narzędzia w glebie oraz prędkości obrotowej narzędzia. Narzędzie testowane podczas prowadzenia badań opisanych w publikacji wyposażono w piny ściernie osadzone na różnej długości promieniach narzędzia obrotowego. Wnioski, jakie autorzy wysunęli z przeprowadzonych badań są następujące: im prędkość obrotowa narzędzia większa (niezależnie od głębokości jego pracy w glebie), tym zużycie ściernie jest mniejsze (w przebadanym zakresie prędkości obrotowej, tj. od 45 do 140 obrotów na minutę). Zużycie ściernie było również tym mniejsze, im większa była prędkość zagłębiania narzędzia w glebie.

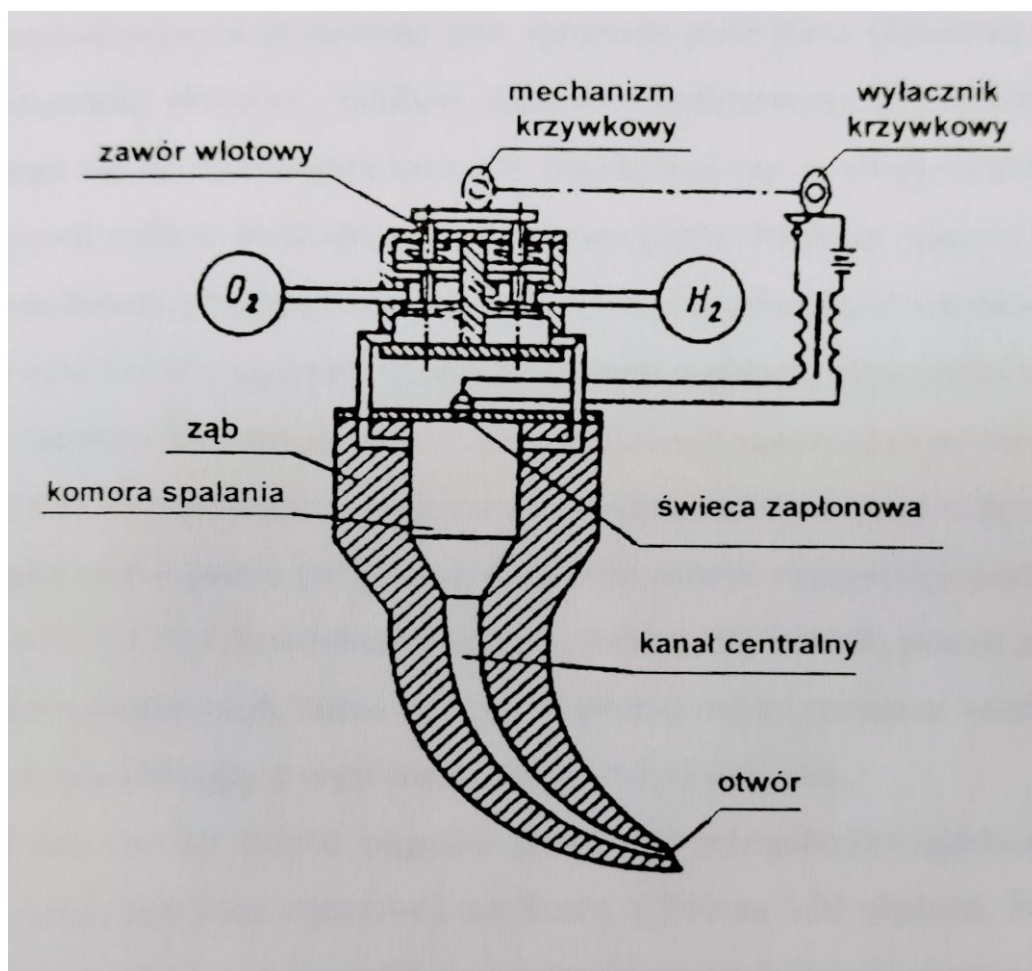
Kolejna publikacja [7], która traktuje o tematyce sadzenia drzew jest pracą przeglądową, która omawia przykłady sadzarek dostępnych na rynku. Na Rys. 2.6 zaprezentowano przykład sadzarki od przesadzania dużych, wieloletnich drzew.



Rys. 2.6. Przykład sadzarki przeznaczonej do przesadzania dużych, wieloletnich drzew, zamontowanej na samochodzie ciężarowym [7]

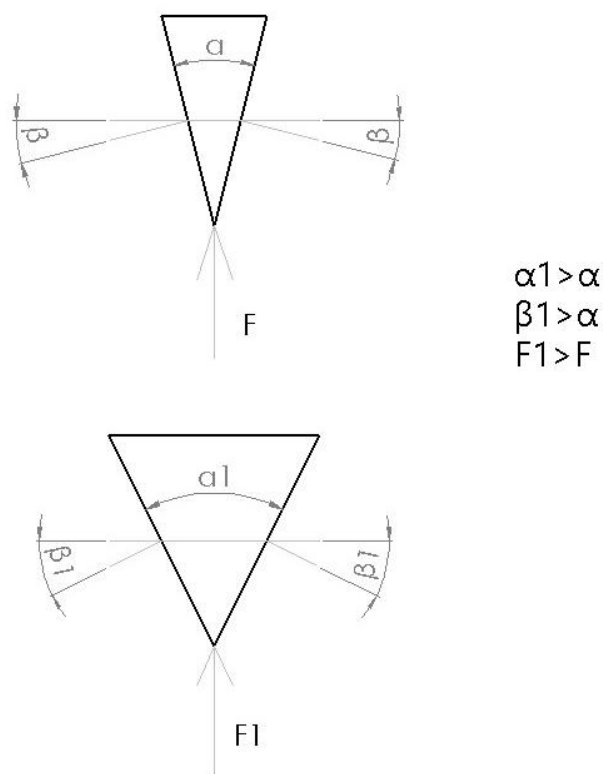
W publikacji powstałej w byłym Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych dokonano przeglądu literatury i opracowano założenia techniczne dla stanowiska badawczego. Prace te przyczyniły się w latach 80-tych, przy współpracy z firmą Agromet-Unia z Grudziądza, do opracowania i wdrożenia metody zmniejszającej energochłonność spulchniania gleby. Poprawa ta nastąpiła przez wprowadzenie części roboczych w drgania. Częstotliwość drgań dziobu lemiesza oscylowała między 284, a 568 drgań/min przy skoku od 15 do 70 mm [48] [116].

Innym rozwiązaniem wzmiankowanym w literaturze, a wspomagającym spulchnianie gleby, co w efekcie zmniejsza zapotrzebowanie na moc do wykonania pracy, jest wprowadzenie sprężonego powietrza w rdzeń elementu roboczego. Zostało to przedstawione zostało na Rys. 2.7 [75].



Rys. 2.7. Element roboczy pracujący w glebie wyposażony w kanał doprowadzający pod ciśnieniem powietrze do gleby [75]

Gach, Kuczewski i Waszkiewicz w publikacji [27] wspominają, że na klin działający w glebie działają siły reakcji, które są tym większe, im kąt wierzchołkowy jest większy. Mniejszy kąt wierzchołkowy jest zaletą zarówno podczas zagłębiania klina, jak i podczas otwarcia jego ewentualnych ramion w glebie. Powyższe zilustrowano na Rys. 2.8.



Rys. 2.8. Zobrazowanie zależności siły reakcji pochodzącej od ziemi od kąta rozwarcia zagłębianego stożka [opracowanie własne]

W kolejnych publikacjach [53], [54], [59] jest wzmianka o tym, iż przeprowadzono badania z zastosowaniem harwestera leśnego. Wykazano, iż długość, na jaką wysuwane jest ramię żurawia oraz masa procesowanego drzewa mają istotny wpływ na naciski wywierane na podłoże leśne. Praca harwestera z żurawiem wysuniętym maksymalnie do przodu może powodować wzrost nacisków na podłoże o 220% w stosunku do żurawia złożonego, co przekłada się na zwięźłość gleby na danej powierzchni ściółki leśnej.

W innych publikacjach autorzy opisali urządzenia sadzące, mając za główny cel próbę ustalenia, czy sposób sadzenia wpływa na udatność i wzrost uprawy [44] [99].

Pierwszą omówioną w publikacji maszyną jest sadzarka L76, która nadaje się do sadzenia na glebach porolnych i na powierzchniach pozrębowych. Do obsługi wymaga kierowcy oraz operatora maszyny, który wkłada sadzonki w obracające się zaciski chwytaków. Koło chwytakowe obraca się i sadzonki zostają umieszczone w wykonanej przez redlicę szczelinie w glebie. Na końcu dwa koła zamykają szczelinę i dociskają glebę po obu stronach sadzonki.

Drugim urządzeniem jest sadzarka GNKp (Rys. 2.9) która jest przeznaczona do sadzenia wszystkich gatunków drzew o wysokości do 60 cm, również na zrębach niekarczowanych. Konstrukcja wyposażona jest w dwa gumowe koła, między którymi operator umieszcza sadzonkę. W momencie obrotu koła zaciskają się i aplikują sadzonkę do szczeliny w glebie. Następnie metalowe koła dociskowe dogniatają glebę wokół umieszczonej sadzonki **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** [47] [50].



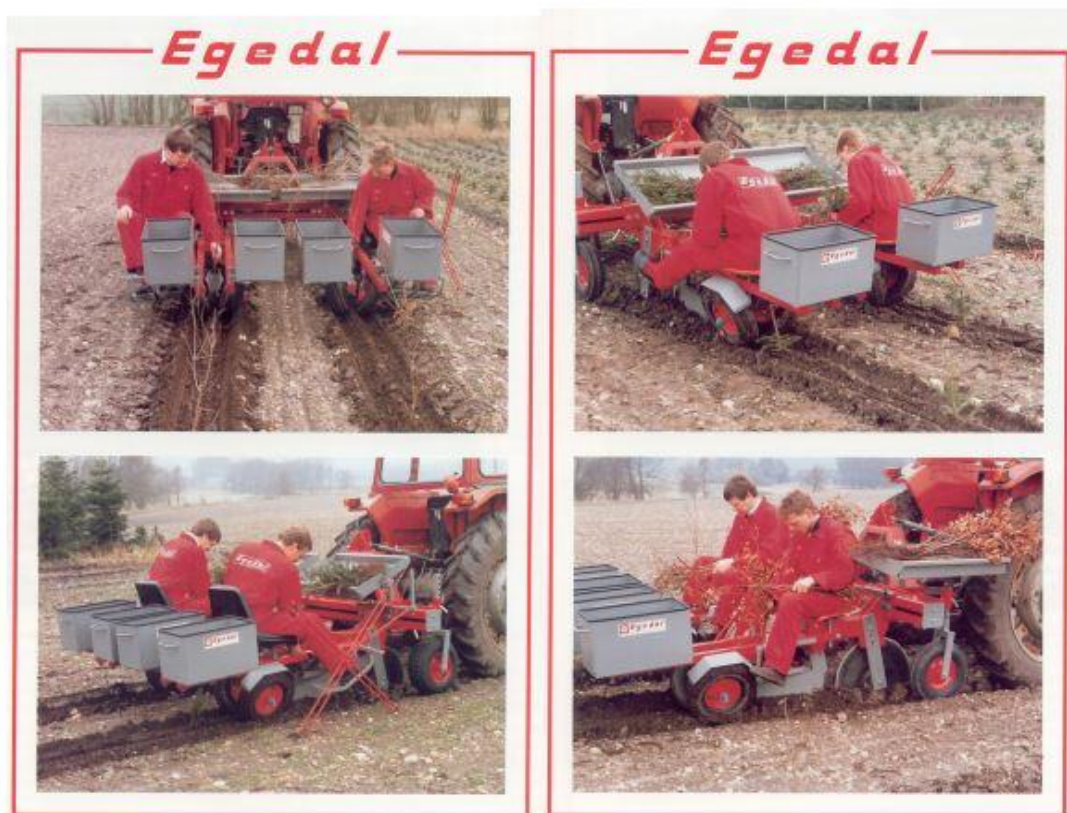
Rys. 2.9. Sadzarka GNKp **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**

W Tabeli 2.1 zestawiono podstawowe parametry techniczne oraz parametry pracy wspomnianej sadzarki.

Tabela 2.1. Parametry techniczne sadzarki GNKp [44]

Parametr	Wielkość
Długość	2350 mm
Szerokość robocza/transportowa	2150/1700 mm
Wysokość z/bez daszka	2230/1800 mm
Masa (bez skrzynek z sadzonkami)	850 kg
Średnica tarczy sadzącej	1200 mm
Ilość rzędów	1
Głębokość sadzenia	do 250 mm
Obsługa sadzarki	2 lub 1 osoba + operator ciągnika
Ciągnik współpracujący	min. 53 kW (70 KM)
Prędkość robocza	1000÷3000 m/h
Średnia wydajność	ok. 1000 sztuk sadzonek na godzinę

Kolejnym urządzeniem jest dwurzędowa sadzarka Egedal (Rys. 2.10) o regulowanym rozstawie sadzenia, która najlepiej sprawdza się przy zalesianiu gleb porolnych, na powierzchniach, na których nie występują pniaki. Operator tej sadzarki umieszcza sadzonki bezpośrednio w szczelinie wykonanej w glebie za pomocą redlic. Metalowe koła dogniatają glebę wokół sadzonek.



Rys. 2.10. Sadzarka Egedal podczas pracy z udziałem dwóch operatorów. Zilustrowano różne sposoby zainstalowania stanowisk roboczych [8]

Tabela 2.2. Parametry techniczne sadzarki Egedal [10]

Parametr	Wielkość
Maksymalna głębokość bruzdy [cm]	30
Odległość między rzędami [cm]	60
Odległość między sadzonkami [cm]	100
Szerokość maszyny [mm]	2000
Długość maszyny [mm]	2300
Wysokość maszyny [mm]	1450
Ciężar [kg]	440 (1-rzędowa), 620 (2-rzędowa)

W badaniu wykorzystano także narzędzia ręczne, przeznaczone do sadzenia roślin rocznych. Użyto tradycyjnego kostura leśnego o klinowatym ostrzu oraz kostura Huffa (Rys. 2.11), o ostrzu jednostronnie wygiętym, przeznaczonym do sadzenia na ukos. Jak ocenili autorzy publikacji praca wykonywana przy użyciu kostura Huffa jest lżejsza od pracy tradycyjnym kosturem, a jej wydajność jest większa o około 25% [30] [56].



Rys. 2.11. Kostur Huffa z wygiętym ostrzem [30]

Wnioski, jakie autorzy publikacji wyciągnęli na podstawie przeprowadzonych badań są następujące: jakość pracy testowanych sadzarek jest lepsza od jakości pracy ręcznej zarówno w wypadku sadzonek dwuletnich, jak i rocznych. Objawia się to większą przeżywalnością drzewek, ich szybszym wzrostem na wysokość, a w młodniku większymi pierśnicami. Zaobserwowane różnice są znaczne i na tyle trwałe, że po 9 latach od posadzenia nie mają tendencji do zanikania. Dlatego decyzja o przyjęciu technologii założenia uprawy lasu i jakość pracy przy jej zakładaniu mają duże znaczenie ekonomiczne i hodowlano-leśne [57].

Tiina Laine [24] [61] [62] w swoich pracach omawia zmechanizowane procesy sadzenia w Finlandii wraz z propozycją dalszego rozwoju w tym kierunku. Skupia się na produktywności, kosztochłonności, automatyzacji i jakości pracy. Prace koncentrują się na jednostanowiskowych maszynach do sadzenia w terenie leśnym. Tego rodzaju maszyny do sadzenia zostały opracowane w Finlandii oraz Szwecji, i od lat 70-tych próbują konkurować ekonomicznie z sadzeniem ręcznym. Od tamtego okresu nieustannie prowadzone były prace nad rozwojem maszyn, w efekcie czego maszyny przenosiły jednostki sadzące, zamiast ciągnąć je za sobą, aby uniknąć przeszkód, takich jak pniaki i kamienie. We wczesnych latach 80. XX wieku badania i rozwój zmechanizowanego sadzenia drzew osiągnęły szczyt w krajach skandynawskich [21] [22]. Wówczas opracowywano i testowano kilka różnych koncepcji tego typu rozwiązań maszyn, urządzeń do sadzenia sadzonek drzew leśnych. Spośród urządzeń do sadzenia, ówczesny Öje Planter, obecnie znany jako Bracke P11.a, jest nadal w użyciu komercyjnym. Obecnie sadzenie drzew za pomocą maszyn opartych na koparkach jest bardziej powszechne w Finlandii niż w innych krajach [23]. W tym kraju do sadzenia są wykorzystywane urządzenia: Bracke, M-Planter i Risutec (Rys. 2.12) [25] [69].



Rys. 2.12. Sadzarki stosowane w Finlandii, od lewej: Bracke P11.a, M-Planter, Risutec TK-200 [62]

Prace kolejne dotyczą rozwoju maszyn sadzących w Finlandii. Autorzy skupiają się, m.in. na maszynach podstawowych do sadzenia, urządzeniach do sadzenia oraz karuzelach sadzonek. Autorzy opisują prowadzone badania porównawcze procesu sadzenia wykonywane przez różne urządzenia montowane na wysięgniku koparki gąsienicowej. Porównywane urządzenia to wspomniane wcześniej M-Planter oraz Bracke Planter [13] [60] [78].

Badania oraz analizy symulacyjne opisane w publikacji, skupiają się na wykonywanych przez urządzenia ruchach roboczych. Podczas prowadzenia analiz symulacyjnych zastosowano wirtualne modele koparek gąsienicowych wyposażonych w podwójne ramie robocze, do którego zamocowano jedną lub dwie głowice sadzące. Na opracowanych w ten sposób modelach dokonano porównania ich pracy pod kątem wydajności w roboczogodzinach na rok oraz liczby sadzonek na roboczogodzinę [6][11].

W analizie kosztów porównano opłacalność zmechanizowanego sadzenia drzew z zamontowanymi na ramieniu roboczym koparki jednogłowicowymi urządzeniami do sadzenia Bracke Planter i dwugłowicowymi urządzeniami do sadzenia M-Planter. Dla sadzarki Bracke Planter zakładany roczny poziom produktywności i całkowity koszt godzinowy wynosił odpowiednio 1000 rbh/rok, 200 sadzonek na roboczogodzinę [76] i 78,5 Euro/rbh. Dla sadzarki M-Planter było to odpowiednio 984 rbh/rok, 236 sadzonek na roboczogodzinę i 81,8 Euro/rbh [20] [25]. Z wymienionych prac wyciągnięto następujące wnioski:

- sadzarki montowane na taśmach będą prawdopodobnie najbardziej elastycznym i opłacalnym systemem ogólnie, ponieważ zmechanizowane sadzenie drzew staje się coraz bardziej powszechne.
- Większa liczba głowic w miejsce większej liczby ramion jest korzystniejsza dla zwiększenia produktywności maszyn do sadzenia na bazie koparki na zrębach zupełnych.
- Zwiększenie liczby głowic na urządzeniach do sadzenia montowanych na dźwigu zwiększa produktywność urządzeń (wzrost do 118% przy przechodzeniu od jednej do czterech głowic w terenie o rzadkich przeszkodach), chociaż trójgłowicowe urządzenia do sadzenia są najbardziej obiecujące, gdy łączą wymóg wysokiej produktywności z akceptowalnymi wynikami hodowli.
- Karuzele ładowane na tackach umożliwiają szybsze przeładowanie sadzonek do urządzeń montowanych na dźwigu, niż karuzele ręcznie ładowane sadzonkami.

Przeglądu literatury dokonano na podstawie pozycji dostępnych w bazach literaturowych zawierających liczne czasopisma i artykuły naukowe. Wyszukiwanie prowadzono w takich bazach

jak: Elsevier, Google Scholar, Scopus, IEEE Xplore czy Baztech. Dokonano także przeglądu opracowań dostępnych w bibliotece Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznańskiego Instytutu Technologicznego (wcześniej: Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych w Poznaniu). Wyszukane pozycje, które wymieniono w rozdziale traktują, m.in. o tematyce oporów gleby w zależności od jej typu i naciskach wywieranych na glebę przez urządzenia i maszyny wykorzystywane do prowadzenia prac leśnych. Inne pozycje dotyczą energochłonności prac leśnych, które to prace są wykonywane przez personel zatrudniony na różnych stanowiskach. Przeanalizowano także pozycje naukowe, w których scharakteryzowano zużycie narzędzia wykonanego z określonego materiału w zależności od poziomu wilgotności ziemi, w którym narzędzie to pracowało. Prowadzono również badania nad zależnością kształtu narzędzia i działających na niego oporów pochodzących od gleby.

Luka naukowa, jaką można dostrzec na podstawie przeprowadzonego studium literaturowego dotyczy poprawy kształtu pracującego w glebie narzędzia do sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym, bądź też sposobu zagłębiania narzędzia sadzącego w glebę. W niniejszej pracy autor postara się odpowiedzieć na następujące pytania badawcze:

- w jaki sposób kształt narzędzia wpływa na jakość zagłębiania narzędzia lub energochłonność takiego ruchu?
- w jaki sposób kształt narzędzia wpływa bezpośrednio na przebieg procesu sadzenia?

2.2. Przegląd rynku narzędzi sadzących; porównanie konstrukcji i funkcjonalności

Dokonano przeglądu rynku maszyn i urządzeń pod kątem dostępności takich konstrukcji, które przeznaczone są do sadzenia roślin w szeroko rozumianym zakresie tych żywych organizmów. Zakres dysertacji skupia się na dość szczególnym przypadku narzędzia sadzącego, w związku z czym bardzo prawdopodobnym, a wręcz graniczącym z pewnością jest założenie, że analogiczne rozwiązanie techniczne będzie dość trudne do spotkania, a więc i do porównania. W efekcie czego dokonano rozeznania rynku pod kątem szerszej gamy podobnych narzędzi i urządzeń, by poznać możliwości techniczne i technologiczne budowy oraz pracy takich konstrukcji. Celem było podjęcie próby uzyskania punktu bazowego, czyli odpowiedzi na pytanie czy dalsze prace nad analizowaną i opracowywaną konstrukcją zespołu roboczego do sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym wykazują potencjał wdrożeniowy [93].

Pierwszą konstrukcją, którą analizowano jest rowkowa sadzarka leśna RZS-1 / RZS-2 (Rys. 2.13). Jest to sadzarka typu zawieszanego, agregowana do ciągnika na górnym lub trzypunktowym układzie zawieszenia (TUZ) ciągnika rolniczego. Urządzenie zbudowano na bazie platformy, która obejmuje miejsce dla operatora oraz miejsce na zasób sadzonek. Sadzenie sadzonek odbywa się ręcznie na wcześniej przygotowanej placówce z wykonaną redliną. Proces rozpoczyna się od podebrania sadzonki z zasobnika i ręcznego włożenia jej przez operatora do redliny przed kołami dogniatającymi. Wokół miejsca wysadzenia sadzonki koła dogniatające, osadzone względem siebie kątowno, zbieżnie do podłoża dogniatają miejsce sadzenia dociskając glebę wokół bryłki korzeniowej. Sadzarka przeznaczona jest do sadzenia drzewek zarówno z odkrytym, jak i zakrytym systemem korzeniowym. Bryłka korzeniowa, wg producenta nie powinna przekraczać średnicy 8 cm. Sadzenie odbywa się na terenach pozrębowych, gdzie wysokość pozostałych pniaków nie może przekraczać wysokości prześwitu pod podwoziem ciągnika, do którego maszyna jest zamocowana. Ciągnik wymagany do pracy z sadzarką tego typu powinien dysponować mocą co najmniej 50 kW i napędem na przednie koła oraz zewnętrznym układem hydraulicznym. Według zapewnień producenta wydajność dzienna sadzarki wynosi 8000÷12000 sztuk dla sadzenia sosny jednoletniej oraz 6000÷10000 sztuk dla sosny dwuletniej. Producent

podaje również wydajność określając obszar możliwy do pokrycia sadzonkami na poziomie 0,6 - 1 ha na dzień pracy (zależnie od charakterystyki terenu).

Sadzarka RZS-1 jest obsługiwana przez jednego operatora, natomiast wersja RZS-2 (Rys. 2.13) przez dwóch operatorów. Operator steruje jednocześnie podnoszeniem/opuszczaniem platformy oraz reguluje głębokość sadzenia. Konstrukcja została opracowana i wyprodukowana w Polsce [107] [117].



Rys. 2.13. Sadzarka dwurzędowa o oznaczeniu RZS-2 zawieszona na ciągniku podczas przygotowania do pracy [117]

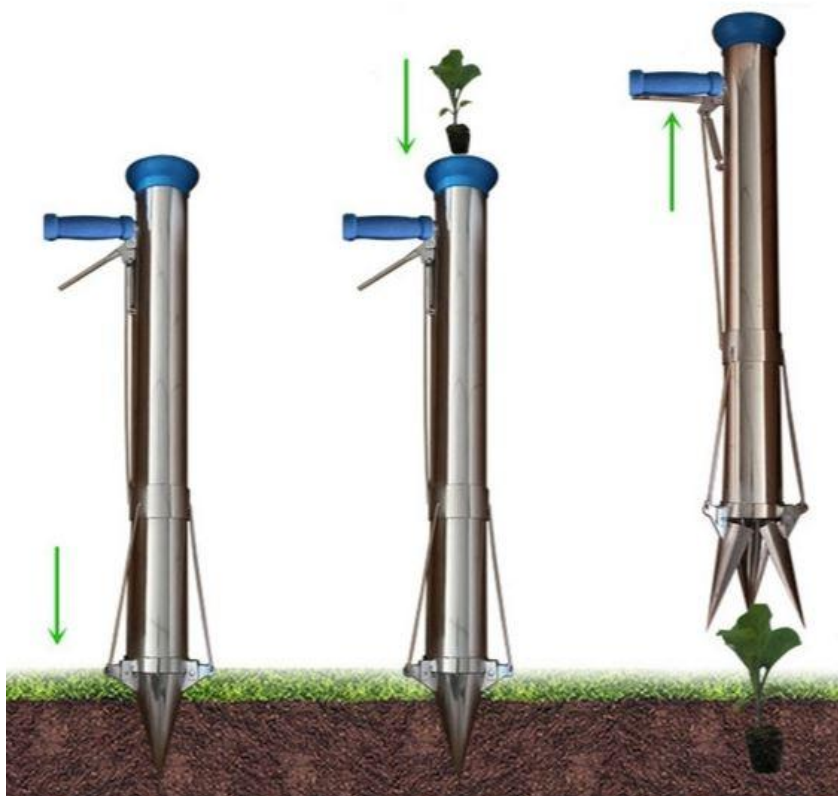
Inną sadzarką, którą znaleziono podczas dokonywania przeglądu materiałów źródłowych jest urządzenie polskiej produkcji przeznaczone do sadzenia sadzonek sosny (rocznych lub dwuletnich) oraz drzew liściastych (wieloletnich) (Rys. 2.14). Wydajność maszyny wynosi do 10000 sztuk na 8 godzin dla sadzonek rocznych (obsługa dwuosobowa) lub 7000 - 8000 sztuk dla sadzonek wieloletnich (również obsługa dwuosobowa) [74].

Maszyna jest mocowana na trójpunktowym układzie zawieszenia ciągnika rolniczego. Na konstrukcję składa się przestrzeń z krzesłami przeznaczona dla dwóch operatorów w kabinie maszyny oraz układ wspierający sam proces sadzenia. Po ręcznym umieszczeniu sadzonki między dwiema obracającymi się tarczami, sadzonka zostaje przeniesiona i umieszczona w placówce, po czym miejsce sadzenia jest dogniatane dwoma stożkowymi, ustawionymi zbieżnie względem siebie, kołami dogniatającymi [118].



Rys. 2.14. Sadzarka leśna jednorzędowa [118]

Kolejnym przykładem konstrukcji mającej związek z analizowanym tematem jest ręczne urządzenie do sadzenia sadzonek. Zaprezentowane na stronie źródłowej [115] fotografie pozwalają sądzić, iż jest to konstrukcja lekka i kompaktowa, która służy do w pełni ręcznego operowania podczas procesu sadzenia (Rys. 2.15). Urządzenie wykonane jest ze stali, wymaga wstępnie przygotowanej placówki, bądź jest przeznaczone do sadzenia sadzonek w miękkiej ziemi. Konstrukcja składa się z korpusu w formie rury cylindrycznej, która u dołu zakończona jest trzema ramionami. Ramiona po złożeniu formują stożek, który ułatwić ma wbicie urządzenia w glebę. Po wbiciu urządzenia, w jego rurze umieszczana jest sadzonka, po czym operator ma za zadanie, poprzez układ dźwigni, otworzyć wspomniane trzy ramiona. Umożliwia to wylot sadzonki z rury i osadzenie jej w przygotowanej placówce. W tym przypadku po wysadzeniu sadzonki operator dokonuje dogniatania placówki nogą (Rys. 2.16) [122].



Rys. 2.15. Ręczne urządzenie sadzące przedstawione w trzech fazach: faza zagłębiania zamkniętego narzędzia, faza zaopatrzenia narzędzia w sadzonkę, faza otwarcia szczęk i pozostawienia sadzonki w ziemi [115]



Rys. 2.16. Stożkowa końcówka ręcznego urządzenia sadzącego z otwartymi za pomocą cięgieł trzema szczękami [115]

W Finlandii, w obecnych czasach, choć technologia maszyn leśnych jest zaawansowana i możliwości sprzętu znaczące, sporą przewagę ma sadzenie ręczne sadzonek z wykorzystaniem ręcznych kosturów [52] [85]. Być może zasadniczym problemem, z którym trzeba się zmierzyć podczas sadzenia drzewek jest rzeźba terenu, która może być bardzo różna, ale również trudna do pokonania przez jakikolwiek sprzęt ciężki. Wydajność sadzenia z zastosowaniem ww. urządzenia wynosi około 150 sadzonek na godzinę [14].

Kolejnym przykładem jest eksperymentalna sadzarka amerykańskiej produkcji zbudowana z ramy zawieszanej na ciągniku rolniczym (Rys. 2.17) [119]. Rama wyposażona jest w dwa niezależne stanowiska dla dwóch operatorów. Każdy z nich ma przed sobą zasobnik z sadzonkami podobny do używanych w polskich warunkach, jak pokazano na Rys. 2.18. Pobranie sadzonki z zasobnika i umiejscowienie jej w placówce odbywa się ręcznie, natomiast koła dociskowe, w które wyposażone jest urządzenie samoczynnie dogniatają placówkę podczas przejazdu. Z uwagi na zasadniczą pracę wykonywaną ręcznie można przypuszczać, że wydajność procesu sadzenia tego urządzenia jest na podobnym poziomie jak w przypadkach wcześniej opisanych, zawieszanych na ciągniku konstrukcji sadzarek [51].



Rys. 2.17. Eksperymentalna sadzarka dwustanowiskowa podczas próby polowej [119]



Rys. 2.18. Stanowisko pracy operatora dwustanowiskowej eksperymentalnej sadzarki [119]

Inna konstrukcja, marki Damcon występuje w wielu wariantach. Różnią się one tym, że mogą być obsługiwane przez jednego, dwóch, trzech lub czterech operatorów. Odpowiednio jest to wersja do wysadzania sadzonek jednocześnie w jednym, dwóch, trzech lub czterech rzędach. Każdy z operatorów posiada w swoim zasięgu zasobnik na sadzonki. Sadzonka podczas procesu sadzenia zostaje pobrana przez operatora i ręcznie osadzona w placówce, natomiast dwie tarcze dociskają miejsce sadzenia. Jest to konstrukcja dość prosta i kompaktowa, wykonana z profili stalowych o przekroju prostokątnym (Rys. 2.19 ÷ Rys. 2.20) [120]. Jej wydajność zależy w dużej mierze od szybkości pracy operatora oraz gatunku wysadzanych drzewek. Producent podaje ogólnie, że dla wersji jednorzędowej wydajność wynosi od 4000 do 5000 drzewek na dzień, natomiast dla wersji czterorzędowej (Rys. 2.21) wydajność to 16 000 do 20 000 drzewek na dzień. Konstrukcja wymaga ciągnika rolniczego o mocy przynajmniej 15 kW (wersja jednorzędowa) lub powyżej 62 kW (wersja czterorzędowa).



Rys. 2.19. Sadzarka marki Damcon, wersja jednorzędowa [120]



Rys. 2.20. Sadzarka marki Damcon, wersja dwurzędowa [120]



Rys. 2.21. Sadzarka marki Damcon, wersja czterorzędowa [120]

Konstrukcja zaprojektowana przez Fothergills trees [121] jest dość prosta, minimalistyczna, jednocześnie lekka i zwarta. Jest to maszyna zawieszana na TUZ ciągnika rolniczego, obsługiwana przez jednego operatora, który ma swoje siedzisko i ręcznie pobiera sadzonki z zasobnika układając je w przygotowanej wcześniej placówce. Po wysadzeniu, analogicznie jak ma to miejsce w podobnych maszynach - dwa zbieżnie usytuowane koła dociskające dogniatają miejsce wysadzenia sadzonki (Rys. 2.22). Urządzenie według producenta jest przystosowane głównie do sadzenia drzewek choinkowych, świątecznych. Umożliwia wysadzenie około 750 sadzonek na godzinę, co dla 8-godzinnego dnia pracy daje 6000 sztuk. Niemniej, można ocenić, że sadzić z zastosowaniem opisywanej konstrukcji można każdy gatunek drzewek iglastych [38]. Producent umożliwia wypożyczenie sprzętu w cenie 350 GBP na tydzień (5 dni). Masa konstrukcji wynosi 200 kg, natomiast wymagany do obsługi urządzenia jest ciągnik o mocy przynajmniej 40 KM z napędem na 4 koła. Jeśli warunki są sprzyjające, tj. sucho, a teren równy, wtedy jest możliwość pracy z ciągnikiem na jedną oś lub nieco słabszym (przy czym producent nie podaje dokładnie innych parametrów).



Rys. 2.22. Sadzarka Fothergills trees z operatorem podczas pracy [121]

Jedną z bardziej zaawansowanych konstrukcji maszyn przeznaczonych do sadzenia drzewek jest sadzarka Risutec ASP-720 - urządzenie przeznaczone do montowania, np. na wysięgniku koparki gąsienicowej, zaprezentowane na Rys. 2.23. Stanowi kompletne urządzenie wyposażone w zasobnik na sadzonki, element przygotowujący placówkę, kostur sadzący oraz element dogniatający miejsce po wysadzeniu sadzonki. Maszyna charakteryzuje się tym, iż z uwagi na zastosowanie koparki jako źródła mocy i transportu jest w stanie dotrzeć w trudne miejsca, które dla innych sadzarek są nieosiągalne. Jednocześnie wymaga przestrzeni do pracy, a więc służy raczej do obsadzania obszarów w żadnym stopniu niezalesionych. Masa samej głowicy sadzącej wynosi 2600 kg, natomiast sugerowana masa koparki to 18 000 kg. Sugerując się nazwą, należy wspomnieć, że maszyna może pomieścić jednorazowo kasety z 720 sztukami sadzonek. Jest to konstrukcja fińska. W dalszej części pracy zostaną opisane konstrukcje o podobnej koncepcji budowy oraz działania. One również będą pochodzić ze Skandynawii [83] [84] [123] [124].



Rys. 2.23. Sadzarka Risutec ASP-720 zamontowana na koparce gąsienicowej, podczas pracy [83]

Innym przykładem urządzenia, które zaprojektowane zostało do sadzenia drzewek jest TreeRover. Jest to kompaktowe, małe, samojezdne urządzenie, które pracuje autonomicznie. Jest ono wyposażone w zasobnik na kilka sadzonek, kostur odpowiadający za wysadzenie sadzonki oraz stopkę, która dogniata miejsce po wysadzeniu. Na Rys. 2.24 zaprezentowano ogólny widok omawianego robota [125].



Rys. 2.24. Widok robota TreeRover [125]

Stopka dogniatająca sadzonkę jest zamocowana wahliwie na sworzniu, co pozwala dopasować się do terenu i umożliwia pracę na nierównościach (Rys. 2.25).



Rys. 2.25. Widok stopki dogniatającej miejsce sadzenia [125]

Dokonując rozeznania na rynku pod kątem wykorzystywanych narzędzi, natrafiono także na proste narzędzie w postaci świdra. Świder ten został wykonany w domowych warunkach i na prywatny użytek, niemniej narzędzia tego typu są dość powszechnie dostępne (Rys. 2.26). Narzędzie to jest proste w swej konstrukcji, w obsłudze i lekkie, jednak przeznaczone do jednostkowego sadzenia drzewek, z uwagi na znaczną czasochłonność wykonywanej operacji [126].



Rys. 2.26. Ręczny świder zamocowany do wkrętarki podczas wykonywania otworu w glebie [126]

Sadzarka Bracke Planter została opracowana ponad 20 lat temu w Szwecji [20] [24] i do magazynowania i podawania sadzonek wykorzystuje prostą konstrukcję karuzeli. Jest to konstrukcja montowana na wysięgniku koparki (podobnie jak wspomniana fińska sadzarka Risutec ASP-720). Masa urządzenia wynosi 1100 kg, natomiast zasobnik na sadzonki może pomieścić do 196 sztuk drzewek. Producent sugeruje agregowanie urządzenia wraz z koparką o masie od 14 do 20 ton [64] [82] [127] [128]. Na Rys. 2.27 przedstawiono widok sadzarki zamontowanej na wysięgniku koparki podczas wykonywania operacji sadzenia.



Rys. 2.27. Sadzarka Bracke P11.a zamontowana na wysięgniku koparki podczas wykonywania operacji sadzenia [127]

Sadzarka, jaką jest opisywany Bracke P11.a wymaga, by zasobnik na sadzonki był uzupełniony ręcznie przez operatora. Stąd, operator dysponując sadzonkami w kasetach, w jakich rozmnaża się sadzonki w szkółkach kontenerowych, musi dokonać ręcznego przeładunku sadzonek. Na Rys. 2.28 przedstawiono operatora dokonującego uzupełnienia zasobnika sadzarki.

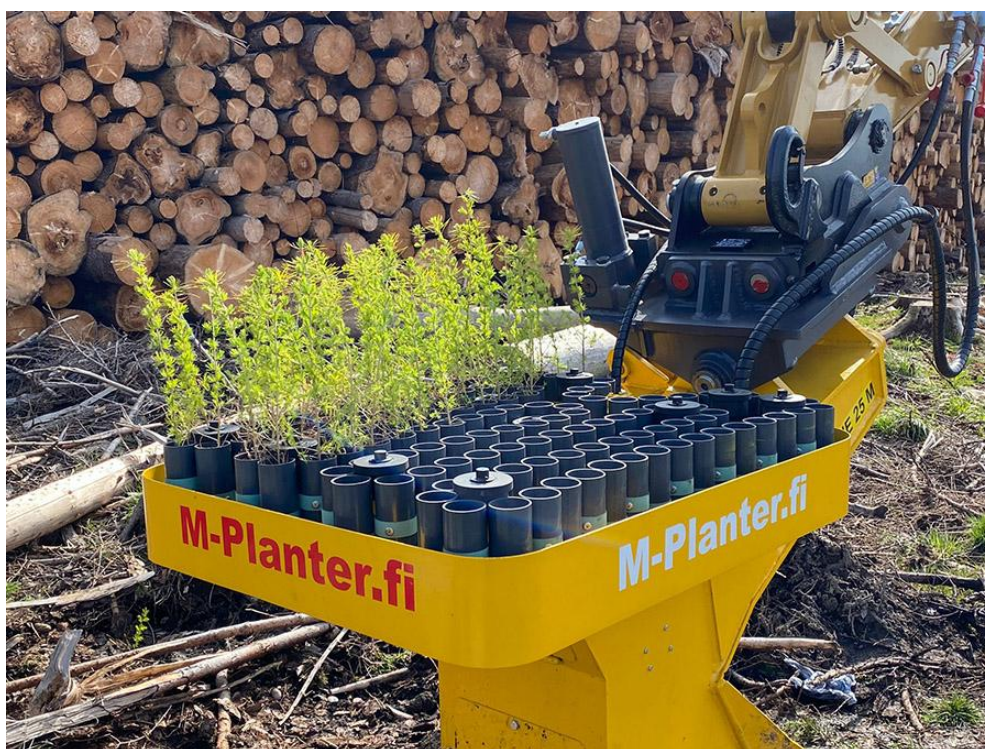


Rys. 2.28. Operator sadzarki Bracke P11.a podczas uzupełniania zasobnika sadzonkami [127]

Kolejnym przykładem sadzarki w postaci urządzenia montowanego na ramieniu koparki jest M-Planter, który również ma swoje korzenie w Finlandii. Jest to konstrukcja bardzo podobna do sadzarki Bracke P11.a – jest w formie głowicy z zasobnikiem sadzonek, montowanej na wyciągniku koparki. Jest to kolejny przykład sadzarki w tej formie konstrukcyjnej zaprojektowanej i zbudowanej w Skandynawii. Można zatem wnioskować, iż są miejsca, gdzie bardzo istotnym jest posiadanie dostępu do trudnodostępnych obszarów w celu obsadzenia ich drzewami [63] [129]. Na Rys. 2.29 przedstawiono ogólny widok sadzarki M-Planter zamocowanej na wyciągniku koparki podczas wykonywania operacji sadzenia drzewek. Z kolei na Rys. 2.30 zilustrowano, w przybliżeniu, zasobnik urządzenia z częściowo uzupełnionym zasobem sadzonek.



Rys. 2.29. Sadzarka M-Planter zamocowana na wysięgniku koparki w chwili sadzenia sadzonki w ziemi [129]



Rys. 2.30. Zasobnik sadzarki M-Planter z częściowo uzupełnionym zasobem sadzonek [129]

Znaleziono w sieci opis patentowy [130], w którym przedstawiono konstrukcję sadzarki karuzelowej do rozsady roślin z zakrytym systemem korzeniowym. Dostępne informacje nie pozwalają jednak na rzetelną ocenę tego rozwiązania z powodu braku szczegółowego opisu oraz chociażby rysunków tego rozwiązania.

W ramach analizy oferty rynkowej podjęto próbę porównania istniejących konstrukcji uwzględniając najważniejsze informacje, z punktu widzenia wydajności, czy zapotrzebowania energetycznego

W Tabeli 2.3 przedstawiono zestawienie opisywanych powyżej rozwiązań technicznych sadzarek wraz z uwzględnieniem (na podstawie uzyskanych oficjalnych informacji lub szacunków) wydajności danej maszyny oraz szacunkowego kosztu posadzenia jednej sadzonki i czasu potrzebnego na wysadzenie. W zestawieniu uwzględniono także subiektywną ocenę danego rozwiązania w aspekcie stopnia złożoności konstrukcji oraz oceny jej funkcjonalności. Jednocześnie dokonano porównania, na podstawie dostępnych informacji, jednostkowego kosztu sadzenia dla kolejnych konstrukcji. Porównanie to odpowiada na pytanie: jaki jest koszt posadzenia jednej sadzonki w określonym horyzoncie czasowym inwestycji.

W opracowanym zestawieniu ujęto konstrukcje sadzące, które są dostępne w sprzedaży (dane na październik 2024 roku) celem porównania ich funkcjonalności oraz ogólnej oceny konstrukcji. Konstrukcje zestawiono w formie tabelarycznej, gdzie przyjęto następujące założenia:

- koszt wynagrodzenia obsługi maszyny przyjęty na poziomie 40 PLN/h dla jednego operatora,
- dokonano subiektywnej oceny prostoty konstrukcji w skali od 1 do 10 (1 to najbardziej złożona konstrukcja w zestawieniu, a 10 to konstrukcja najprostsza),
- dokonano subiektywnej oceny funkcjonalności danej konstrukcji w skali od 1 do 10 (1 to konstrukcja oferująca najniższą funkcjonalność, a 10 konstrukcja najbardziej funkcjonalna),
- sumę zebranych punktów w dwóch powyższych kategoriach przyjęto jako wskaźnik, w pewnym sensie uniwersalności,
- wyszczególniono zasadnicze zalety konstrukcji,
- wyszczególniono zasadnicze wady danej konstrukcji.
- określono wydajność danej konstrukcji w jednostce czasu,
- podano koszt zakupu danej jednostki,
- uwzględniono zapotrzebowanie energetyczne oraz fakt zapotrzebowania dodatkowego pojazdu napędowego (zapotrzebowanie na paliwo określono jako zużycie paliwa na jedną mth pracy przy cenie paliwa na poziomie 7 PLN/l).

Tabela 2.3. Zestawienie konstrukcji urządzeń sadzących z porównaniem kosztu sadzenia sadzonki (opracowanie własne)

Lp.	Konstrukcja	Wydajność	Koszt	Zapotrzebowanie mocy	Stopień złożoności (1-10)	Ocena funkcjonalności (1-10)	Suma ocen (2-20)	Koszt energii + koszt operatora	Koszt sadzenia jednej sadzonki	Główna zaleta	Główna wada	Dodatkowe uwagi
1		>12 000/8h (sosna 1-rocza) >10 000/8h (sosna 2-letnia)	52 000 PLN netto RZS-1 62 000 PLN netto RZS-2	ciągnik, >50kW	6	6	12	640/960+8*11*7=1256/1576 PLN	0,1047 PLN (RZS-1) lub 0,0657 PLN (RZS-2)	konstrukcja prosta, wysoka wydajność	wymagany ciągnik do pracy i przynajmniej jeden operator	https://www.sadzar.kalesna.pl/
2		>10 000/8h (sosna 1-rocza) >8 000/8h (drzewa 2-letnie)	59 000 PLN brutto	ciągnik, >50kW	6	6	12	960+8*11*7=1576 PLN	0,1576 PLN	konstrukcja prosta, wysoka wydajność	wymagany ciągnik do pracy i przynajmniej jeden operator	https://lesnik.trz.pl/katalog10/sadzarki-lesne
3		<2 000/8h (doświadczony pracownik)	450 USD	praca wykonywana ręcznie	10	2	12	320+0=320 PLN	0,16 PLN	lekka, ekonomiczna konstrukcja	niska wydajność w pełni ręcznego sadzenia	http://pottiputki.com/produkter-ror-eng/
4		<40 000/8h	4 000 USD	ciągnik, 20kW	7	6	13	640+9*8*7=1144 PLN	0,0286 PLN	stosunek prostoty do wydajności na wysokim poziomie	wymaganych dwóch operatorów; do ciągnika i do sadzarki	https://www.amscl.org/experimental-seedling-planting-2021/
5		<5 000/8h	3 000 USD	ciągnik, 15kW	7	6	13	960+9*8*7=1464 PLN	0,2928 PLN	minimalistyczna, prosta konstrukcja zawieszana	wymaganych dwóch operatorów; do ciągnika i do sadzarki	https://www.damcon.com/machines/tree-planting-machines/
6		<6 000/8h	350 GBP/5 dni najmu	ciągnik, 15kW	7	5	12	640+9*8*7=1144 PLN	0,1906 PLN	minimalistyczna, prosta konstrukcja zawieszana	konstrukcja zaprojektowana i testowana tylko do sadzenia drzewek choinkowych, wymaganych dwóch operatorów	https://www.fothergills-trees.co.uk/products/christmas-tree-planting-machine

c.d. Tabela 2.3

Lp.	Konstrukcja	Wydajność	Koszt	Zapotrzebowanie mocy	Stopień złożoności (1-10)	Ocena funkcjonalności (1-10)	Suma ocen (2-20)	Koszt energii + koszt operatora	Koszt sadzenia jednej sadzonki	Główna zaleta	Główna wada	Dodatkowe uwagi
7		~800/8h	80 000 EUR	koparka gąsienicowa; >85kW	1	9	10	320+18*8*7=1328 PLN	1,66 PLN	możliwość pracy w trudnym terenie	złożoność konstrukcji przy niskiej wydajności	https://www.youtube.com/watch?v=MNKj2T3CK9g
8		~400/8h (założenie)	?	~3kW	5	5	10	320+3*1*8=344 PLN + czas ładowania	0,86 PLN	w pełni samojezdna i sadząca konstrukcja	mały lub wręcz brak zasobnika na sadzonki	https://www.youtube.com/watch?v=uPNf37S35oY
9		~400/8h	150 PLN	praca wykonywana ręcznie	10	1	11	320+0=320 PLN	0,8 PLN	konstrukcja bardzo ekonomiczna	niska wydajność sadzenia, przeznaczona do jednostkowych nasadzeń	https://www.youtube.com/watch?v=x6Plcjl_muY
10		~1400/8h	44 000 EUR	koparka gąsienicowa; 120 kW	1	9	10	320+15*8*7=1160 PLN	0,8286 PLN	możliwość pracy w trudnym terenie	złożoność konstrukcji przy niskiej wydajności	https://www.youtube.com/watch?v=bC8BAVWlies
11		NASIONA	3 000 PLN	4x250W=1kW	2	3	5	320+1*1*8=328 PLN + czas ładowania	?	możliwość pracy w każdym terenie	konstrukcja zaprojektowana do sadzenia nasion, nie sadzonek, brak precyzji sadzenia	https://www.youtube.com/watch?v=U7nJBFjKqAY

3. CEL PRACY, PROBLEM NAUKOWY I TEZA PRACY

Głównym celem pracy jest opracowanie nowej wersji narzędzia sadzącego, które będzie można zagregować z ciągnikiem rolniczym, bądź innym pojazdem, który może poruszać się w trudnym terenie.

Problemem naukowym jest relacja między postacią konstrukcyjną zespołu sadzącego, w tym przede wszystkim narzędzia sadzącego, a poprawnością procesu sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym określaną za pomocą odpowiednich przyjętych parametrów.

Dodatkowo sformułowano cele szczegółowe, by uzyskać odpowiedzi na pytania, jakie na początkowym etapie analizowania i podejmowania tematu się pojawiły. Pytania te pozwalają na rozbicie głównego problemu na elementarne kroki i są następujące:

- czy konstrukcja podzespołów roboczych rozchylanego kostura w postaci stałego, przedniego ostrza i rozchylanych skrzydeł bocznych jest odpowiednia do prawidłowej realizacji procesu sadzenia sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym,
- czy parametry rośliny mają istotny wpływ na przebieg i jakość procesu ich sadzenia,
- jaki jest wpływ konstrukcji sadzącej na poprawność procesu sadzenia sadzonek.

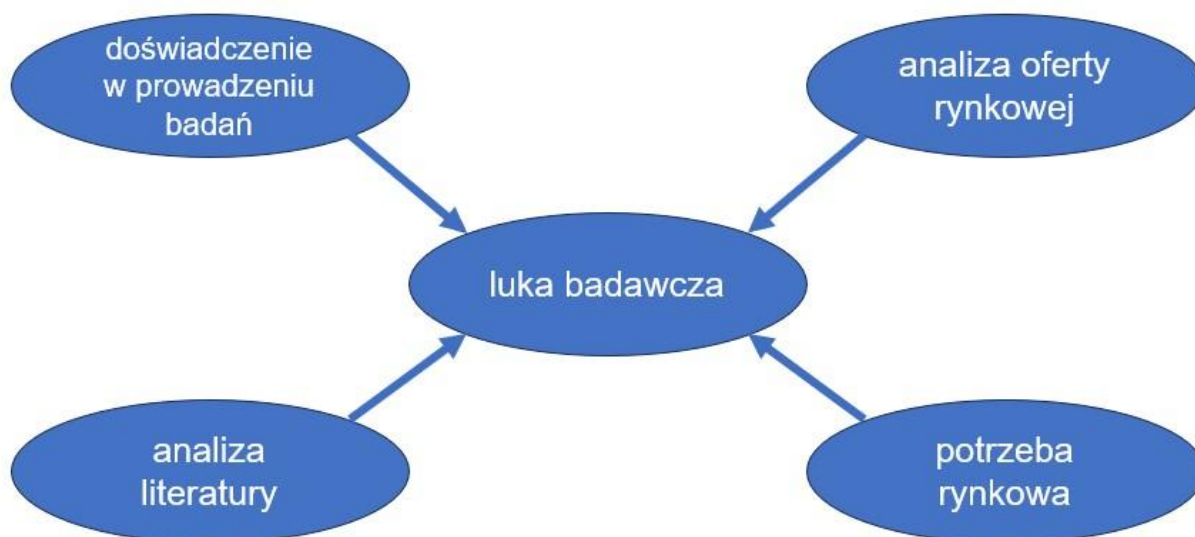
Zagadnienie: *przebieg procesu sadzenia* jest rozumiane jako operacja sadzenia sadzonki, na którą to operację składają się: umieszczenie sadzonki wewnątrz narzędzia, przemieszczanie sadzonki pionowo w dół, zagłębianie narzędzia, posadzenie sadzonki, podniesienie narzędzia.

Na podstawie doświadczenia w prowadzeniu badań nad podobnymi maszynami w przeszłości, analizy stosownej literatury oraz rozmów ze specjalistami w dziedzinie leśnictwa i uprawy roli sformułowano następującą tezę:

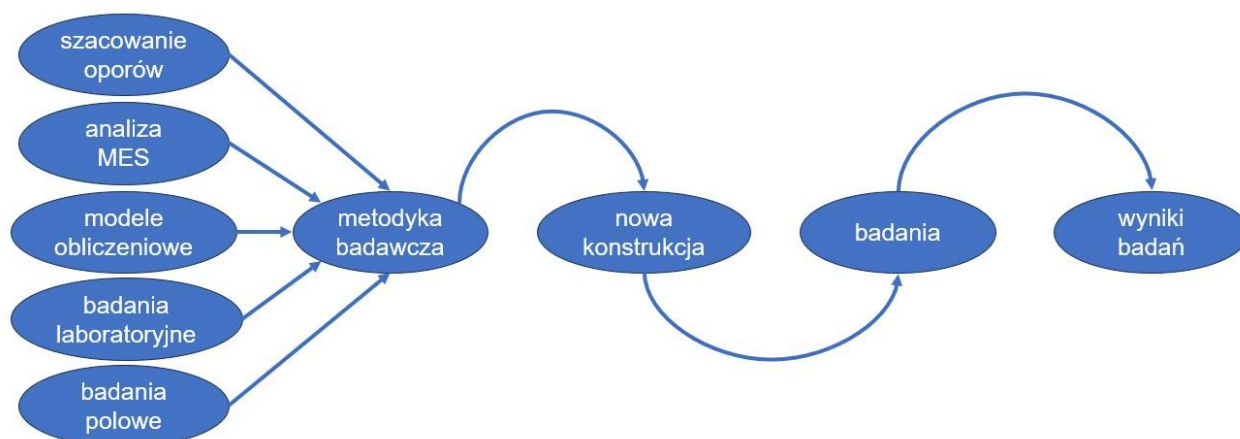
konstrukcja i działanie narzędzia sadzącego mają wpływ na przebieg procesu sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym.

Poprawność procesu sadzenia drzewek może zostać określona, np. przez określenie parametrów pracy całego układu, takich jak ciśnienie w układzie hydraulicznym, bądź efektywna głębokość zagłębiania narzędzia.

Na rysunkach poniżej przedstawiono schematycznie, w jaki sposób znaleziono lukę badawczą (Rys. 3.1. Schemat blokowy wskazujący składowe poszukiwania luki badawczej) oraz kolejne kroki podczas realizacji pracy doktorskiej (Rys. 3.2).



Rys. 3.1. Schemat blokowy wskazujący składowe poszukiwania luki badawczej



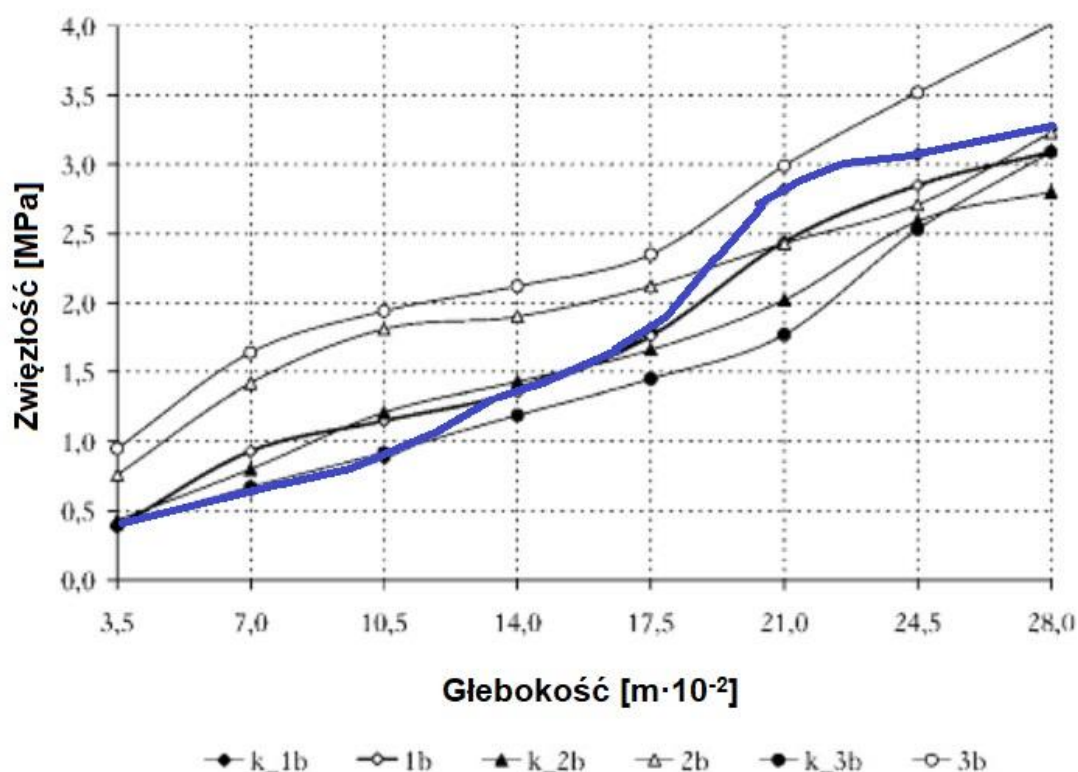
Rys. 3.2. Schemat blokowy postępowania podczas realizacji kolejnych kroków pracy doktorskiej

4. METODYKA BADAWCZA

4.1. Analiza wytrzymałościowa MES

4.1.1. Szacowanie oporów roboczych

W celu oszacowania obciążeń podzespołów urządzenia sadzącego dokonano analizy sił działających na zagłębianie narzędzie. Jako dane wyjściowe wykorzystano wyniki badań zwięzłości gleby poddanej wielokrotnym przejazdom maszyn typu forwarder [29] [79] [132]. Na Rys. 4.1 kolorem niebieskim zaznaczono przyjętą do dalszych analiz zwięzłość gleby, na której podstawie oszacowano następnie nominalne opory robocze.



Rys. 4.1. Średnia zwięzłość ziemi po przejazdach forwardera T1010 bez ładunku [132]

Oznaczenia:

- 1b, 2b, 3b – liczby przejazdów;
- k_1b, k_2b, k_3b – warianty kontrolne

Na podstawie powyższego wykresu średnia zwięzłość gleby podczas zagłębiania narzędzia została przyjęta na poziomie 2 MPa. Zaprojektowany nowy kształt narzędzia sadzącego odzwierciedla walec o średnicy 85 mm. Pole powierzchni zagłębianej w rzucie pionowym wynosi $5\,674\text{ mm}^2$. W związku z powyższym przy uproszczonym szacowaniu sił otrzymujemy opór gleby o wartości 11 348 N.

Biorąc pod uwagę przyjęte założenia napęd narzędzia sadzącego, tzn. siłownik do realizacji ruchów roboczych urządzenia powinien generować siłę zagłębiania co najmniej na poziomie 11 500 N [132].

4.1.2. Budowa modeli obliczeniowych

Celem wykonania analizy wytrzymałościowej Metodą Elementów Skończonych (MES) zamodelowano nową wersję ostrza oraz wykorzystano także gotowe modele części, które razem tworzą kompletny moduł sadzący CAD 3D. Do modelowania części oraz prowadzenia symulacji zastosowano oprogramowanie SolidWorks w wersji 2022.

W modelu obliczeniowym uwzględniono elementy, które mogą wpływać na sztywność i wzrost naprężeń w rozpatrywanym układzie. Elementy te zamodelowano w sposób uproszczony. Analizę MES przeprowadzano na komputerze z zainstalowanym oprogramowaniem SolidWorks Simulations zgodnie z ogólnie przyjętą i znaną w tym zakresie metodologią, stosowaną do prowadzenia obliczeń MES.

Poszczególne węzły obrotowe połączono przy zastosowaniu elementów 1D typu „Kolek”, który łączy obiekt bryłowy lub powierzchniowy z innym obiektem bryłowym lub powierzchniowym z możliwością zablokowania ruchów translacyjnych i obrotowych w zależności od potrzeb. Zespoły spawalnicze połączono ze sobą elementami kontaktowymi typu „Wiązanie”, które nie dopuszczają do wzajemnego przenikania pomiędzy łączonymi zestawami i nie pozwalają na powstawanie przerw (elementy wzajemnie połączone węzłami). Z kolei, pomiędzy zespołami będącymi w kontakcie między sobą zastosowano zestawy kontaktowe typu „Bez penetracji”, które nie dopuszczają do wzajemnego przenikania pomiędzy współpracującymi zestawami i pozwalają na powstawanie przerw kontaktowych [88] [89] [96] [97].

Do obliczeń przyjęto następujące parametry stali: moduł Young’a – 210 GPa, gęstość – 7829 kg/m³.

Na podstawie doświadczenia zebranego podczas prowadzenia w przeszłości podobnych analiz, przyjęto następujące kryteria wytrzymałościowe:

- dla bardzo niekorzystnych obciążeń, występujących doraźnie i rzadko:
 - dla materiału rodzimego: $\sigma_{H-M-H_max_b_rzadko_material} < 0,9Re$
 - dla spoin: $\sigma_{H-M-H_max_b_rzadko_spoina} < (\sigma_{H-M-H_max_b_rzadko_material})/\alpha$, gdzie α przyjęto na poziomie 1,6
- dla obciążeń występujących doraźnie:
 - dla materiału rodzimego: $\sigma_{H-M-H_max_dorznie_material} < 0,85Re$
 - dla spoin: $\sigma_{H-M-H_max_dorznie_spoina} = (\sigma_{H-M-H_max_b_rzadko_material})/\delta$

Naprężenia dopuszczalne w zależności od przypadku przedstawiają się następująco dla stali typu S355:

- $k_{dop_b_rzadko_material} = 0,9 Re = 315 \text{ MPa}$
- $k_{dop_b_rzadko_spoina} = 0,9 Re/1,6 = 196 \text{ MPa}$
- $k_{dop_dorznie_material} = 0,83 Re = 301 \text{ MPa}$
- $k_{dop_b_dorznie_material} = 0,85 Re/1,6 = 188 \text{ MPa}$

Dane wyjściowe do analizy wytrzymałościowej:

Zespół narzędzia sadzącego zasilany jest z układu hydrauliki siłowej posiadającego następujące parametry:

- ciśnienie robocze 18 MPa,
- przepływ nominalny 30 l/min,
- napęd zagłębiania narzędzia w ziemi realizowany jest poprzez siłownik hydrauliczny 50/30/160 (średnica tłoka 50 mm, średnica tłoczyska 30 mm, skok 160 mm, nominalne ciśnienie pracy 25 MPa),

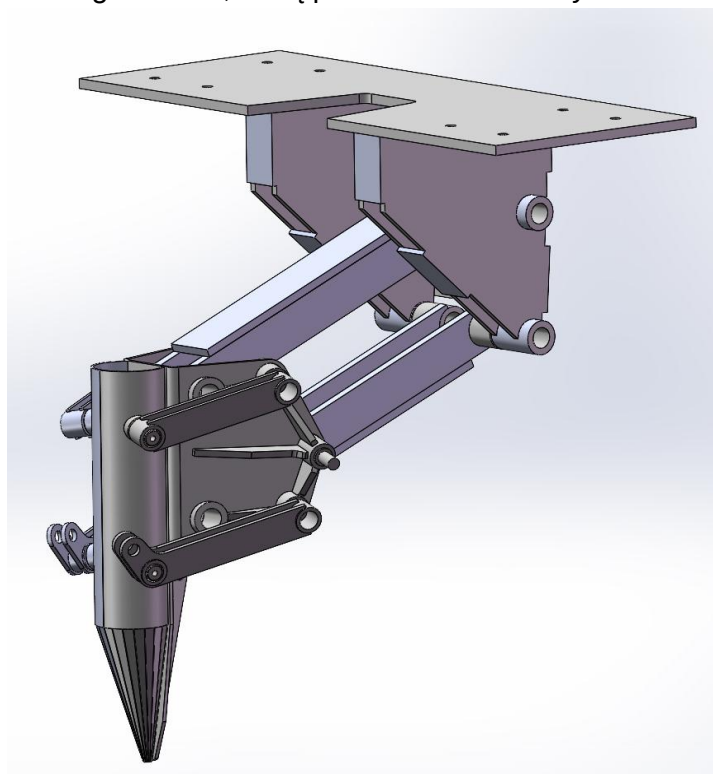
- napęd szczęk realizowany jest poprzez dwa siłowniki hydrauliczne 25/18/50 (średnica tłoka 25 mm, średnica tłoczyska 18 mm, skok 50 mm, nominalne ciśnienie pracy 25 MPa) [106].

W Tabeli 4.1 zestawiono siły generowane w siłownikach hydraulicznych zespołu sadzącego.

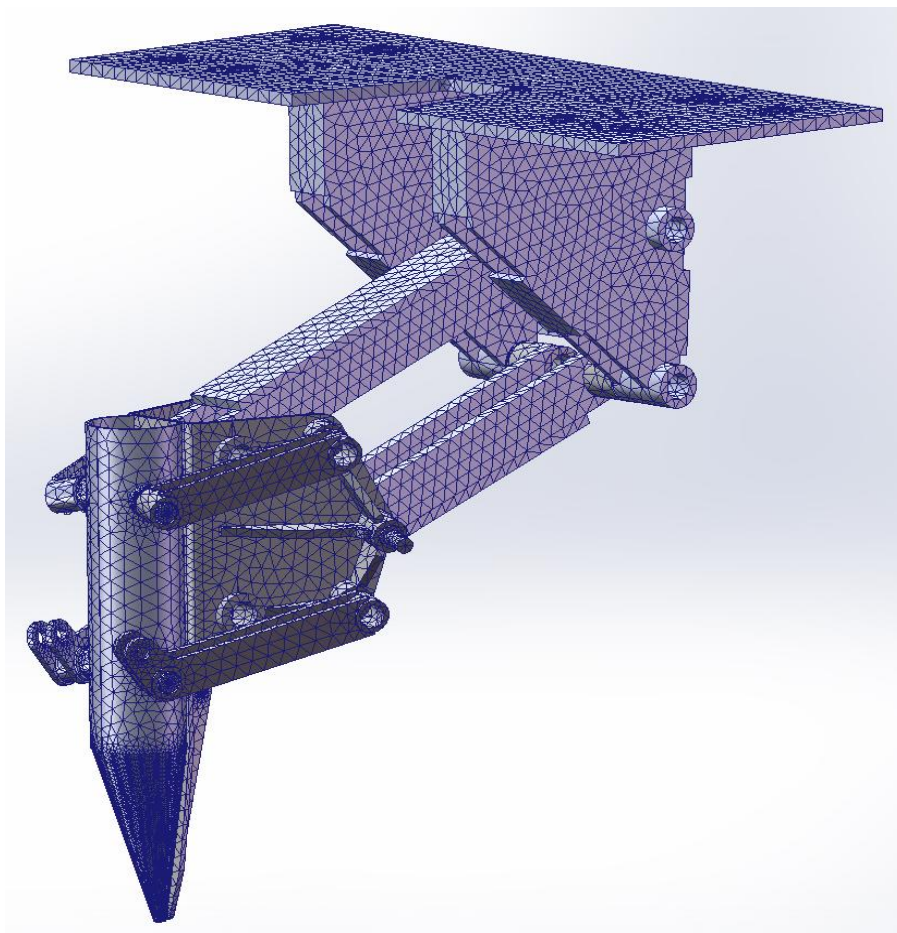
Tabela 4.1. Siły generowane w siłownikach hydraulicznych zespołu sadzącego [106]

Średnica tłoka [mm]	Średnica tłoczyska [mm]	Ciśnienie [MPa]	Siła wysuwania [N]	Siła cofania [N]
50	30	18	35343	22619
25	18	18	8836	4255
50	30	25	49087	31416
25	18	25	12272	5910

Model obliczeniowy zbudowany przez uproszczenie modelu CAD urządzenia, został zaprezentowany na Rys. 4.2 Następnie na model została nałożona bryłowa siatka MES o średnim wymiarze elementu liniowego 15 mm, którą przedstawiono na Rys. 4.3.



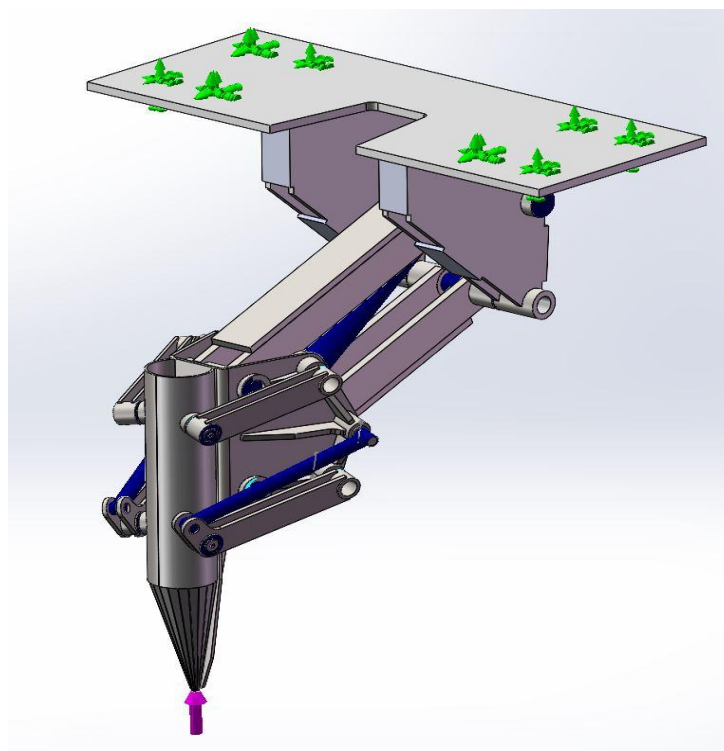
Rys. 4.2. Model obliczeniowy CAD 3D układu sadzącego z nową wersją ostrza [opracowanie własne]



Rys. 4.3. Siatka MES nałożona na model obliczeniowy układu sadzącego [opracowanie własne]

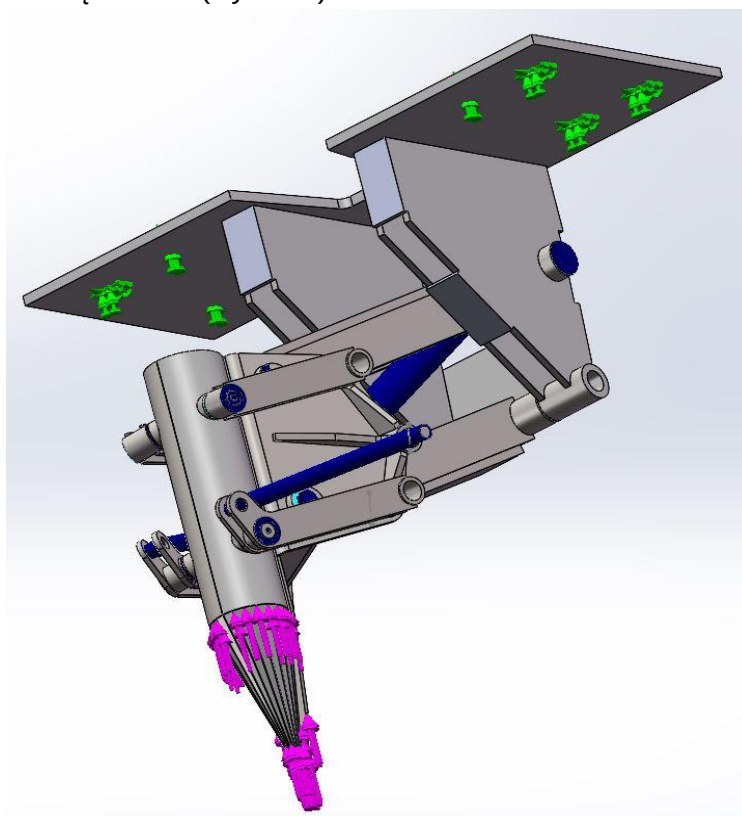
W kolejnym kroku przygotowano różne warianty obliczeniowe, które obciążały model w różnych płaszczyznach i z różnymi wartościami sił i obciążeń. Na kolejnych rysunkach przedstawiono w sumie 5 wariantów obliczeniowych, na których zwizualizowano utwierdzenie modelu oraz miejsca przyłożonych obciążeń. Przygotowano następujące przypadki obliczeniowe:

- LC_1 – wbijanie narzędzia sadzącego w kamień – obciążenie końcówek szczęk siłami oporu – w sumie 1100 N (Rys. 4.4) - generującymi na siłowniku zagłębiania maksymalne zakładane ciśnienie zasilania równe 180 barów.



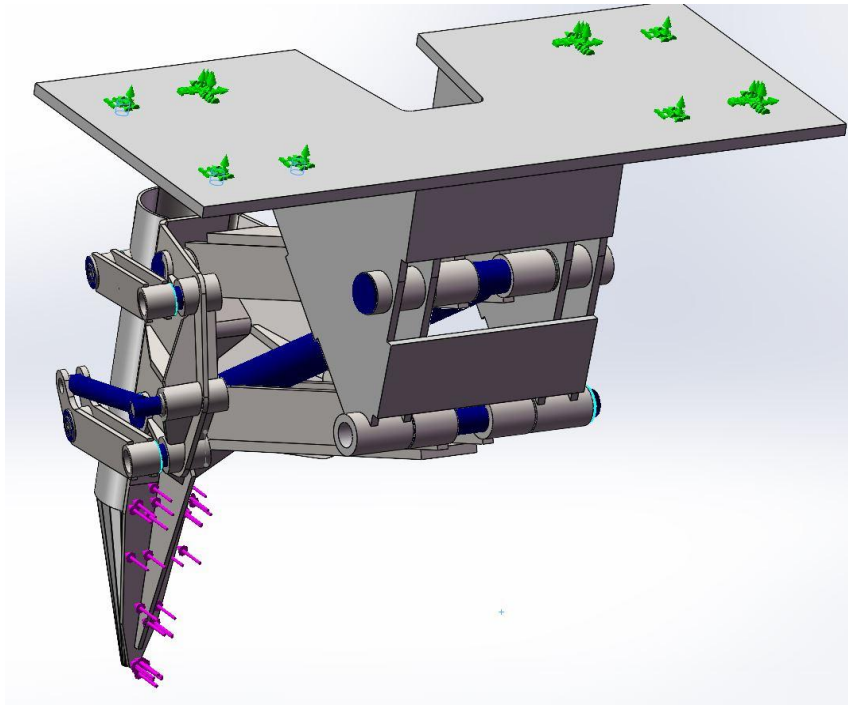
Rys. 4.4. Przypadek obliczeniowy LC_1 - wbijanie narzędzia sadzącego w kamień [opracowanie własne]

- LC_2 – wbijanie narzędzia sadzącego w ziemię pozrębową – obciążenie zagłębianej części kostura siłą 5000 N (Rys. 4.5).



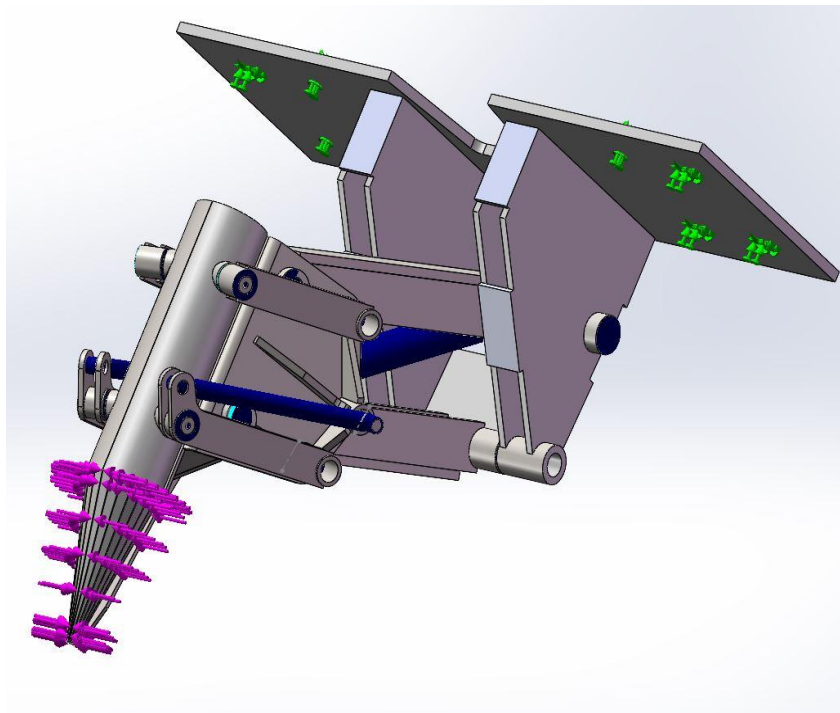
Rys. 4.5. Przypadek obliczeniowy LC_2 - wbijanie narzędzia sadzącego w ziemię pozrębową [opracowanie własne]

- LC_3 – wleczenie zagłębionej części stałej w glebie (Rys. 4.6) – obciążenie części stałej zagłębianej w glebę siłą oporu, jaka może wystąpić podczas wleczenia narzędzia zagłębionego w ziemi, równą 8400 N.



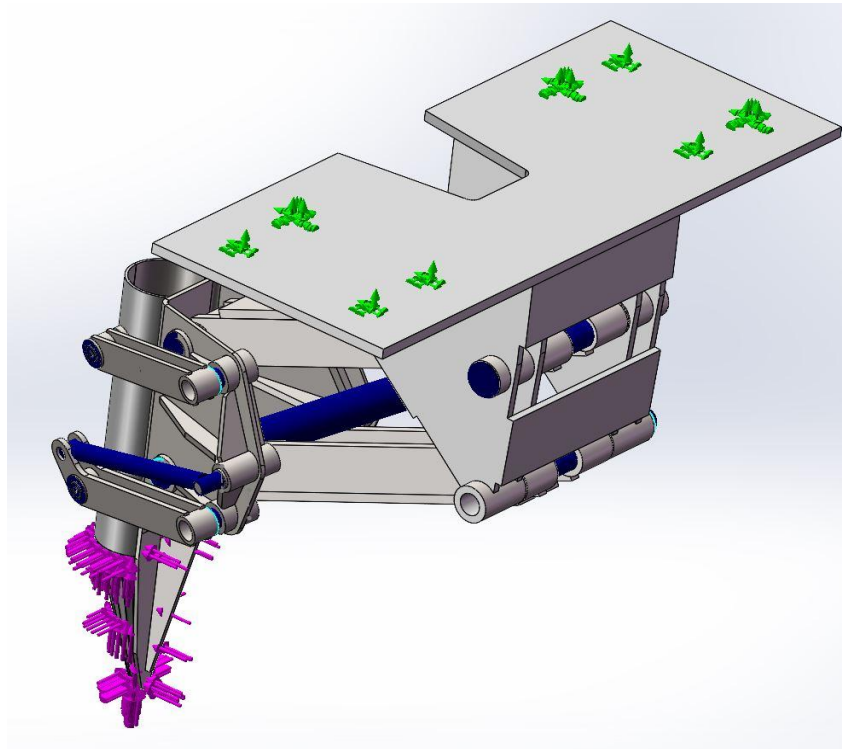
Rys. 4.6. Przypadek obliczeniowy LC_3 - wleczenie zagłębionej części stałej w glebie
[opracowanie własne]

- LC_4 – rozchylanie szczęk w ziemi (Rys. 4.7) – obciążenie bocznej powierzchni szczęki oporem roboczym wynikającym z jej rozwierania, generującym po stronie tłoczyska maksymalne zakładane ciśnienie zasilania równe 18 MPa;



Rys. 4.7. Przypadek obliczeniowy LC_4 - rozchylanie szczęk w ziemi, siła 2500 N na stronę
[opracowanie własne]

- LC_5 – kombinacja obciążeń części stałej kostura (Rys. 4.8): 9 000 N opór wbijania, 8 000 N opór targania, 5 000 N opór na końcówce podczas rozwierania szczęk;



Rys. 4.8. Przypadek obliczeniowy LC_5 - kombinacja obciążeń części stałej kostura
[opracowanie własne]

4.2. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne miały na celu ocenę płynności zagłębiania narzędzia w glebie. Płynność ta jest charakteryzowana jako zdolność do płynnego zagłębiania w funkcji przyłożonej siły, która pionowo wbija narzędzie w ziemię. Badania laboratoryjne narzędzia sadzącego wykonano z użyciem dwóch wersji ostrza przygotowanych w metalu ze stali typu S355. Ostrza te były zamontowane na ramie układu tworząc kompletne narzędzie sadzące. Na Rys. 4.9 przedstawiono same ostrza narzędzia sadzącego w dwóch wersjach, natomiast na Rys. 4.10 zaprezentowano jedno z ostrzy zamontowane na ramie, z którą razem tworzą narzędzie sadzące.



Rys. 4.9. Narzędzie sadzące w wersji pierwszej (po prawej) oraz w wersji drugiej (po lewej)
[opracowanie własne]



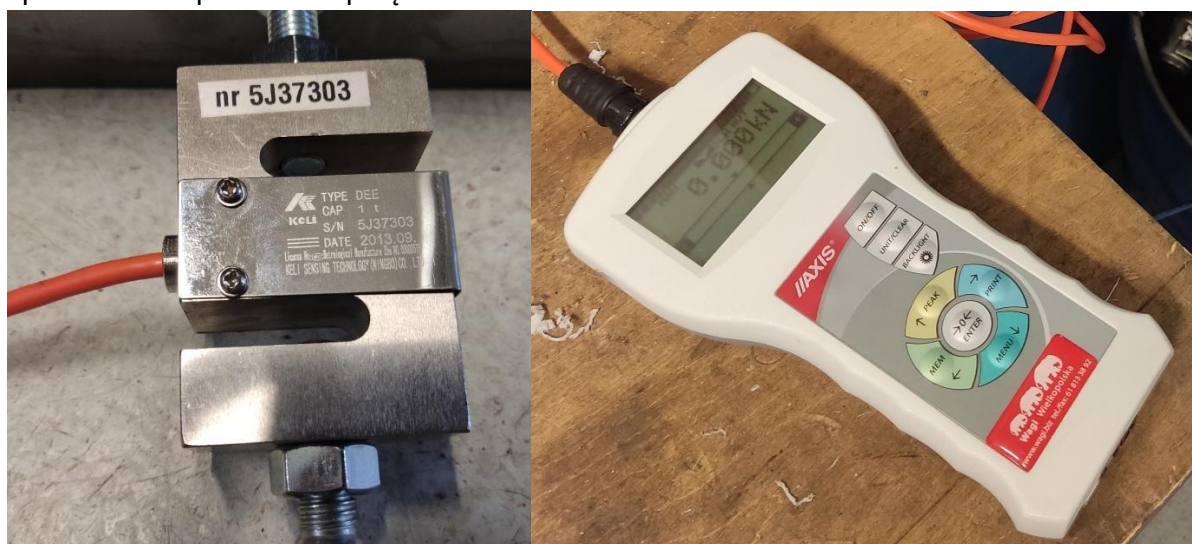
Rys. 4.10. Narzędzie sadzące w wersji pierwszej zamontowane na ramie [opracowanie własne]

Badania laboratoryjne polegały na stopniowym zagłębianiu obu wersji narzędzia w zbiorniku wypełnionym ziemią. Zbiornik ten stanowiła beczka o kształcie cylindrycznym, o średnicy wewnętrznej 385 mm i wysokości 510 mm, która została napełniona ziemią do wysokości 385 mm. Ziemia wsypana do pojemnika miała objętość $44,8 \text{ dm}^3$ oraz masę 34,2 kg. Na Rys. 4.11 przedstawiono zbiornik z ziemią, w którym prowadzono badania narzędzia z dwiema wersjami ostrza. Po wykonaniu serii prób zagłębiania narzędzia z jedną wersją ostrza, zawartość zbiornika została opróżniona i tę samą ziemię wsypano do zbiornika ponownie. Zabieg ten miał na celu wyeliminowanie lokalnych zagęszczeń ziemi i ponownej jej spulchnienie oraz przywrócenie do stanu pierwotnego krótko po zasypie [94] [95].



Rys. 4.11. Zbiornik wypełniony ziemią, przeznaczony do zagłębiania w nim narzędzia sadzącego [opracowanie własne]

Do wykonania pomiarów, które pozwoliły porównać siłę potrzebną do zagłębiania obu wersji narzędzia zastosowano czujnik siły marki Keli, model DEE 5J37303 o zakresie pomiarowym do 500 kg i klasie C3 oraz siłomierz elektroniczny marki AXIS model FB00 o zakresie pomiarowym do 20 kN i częstotliwości pomiaru w zakresie 1÷40/s. Na Rys. 4.12 zaprezentowano zastosowany do prowadzenia pomiarów sprzęt.



Rys. 4.12. Czujnik siły DEE 5J37303 (po lewej) oraz miernik AXIS FB00 (po prawej)

Do czujnika siły z jednej strony przymocowana została płytka dociskowa, która poziomo oparta była na kołnierzu wlotowym urządzenia sadzącego (Rys. 4.13). Po drugiej stronie czujnika zamocowano ucho, przez które przełożony został pręt będący dźwignią umożliwiającą chwyt ręczny i przyłożenie siły wbijającej narzędzie podczas zagłębiania. Szczęki ostrza na czas prowadzenia badań zostały związane opaską zaciskową celem zapobiegania otwieraniu się ich podczas procesu zagłębiania (podczas prowadzenia badań laboratoryjnych narzędzie zostało pozbawione wszystkich części napędowych, w tym siłowników, które podczas normalnej pracy blokują ostrza przed otwarciem), co pokazano na Rys. 4.14.



Rys. 4.13. Zestaw pomiarowy miernika oraz czujnika z dołączoną płytką dociskową.
[opracowanie własne]



Rys. 4.14. Narzędzie sadzące z ostrzem zabezpieczonym przed otwarciem podczas zagłębiania [opracowanie własne]

4.3. Badania polowe

Zaplanowane badania polowe w warunkach rzeczywistych miały na celu, podobnie jak badania prowadzone w warunkach laboratoryjnych, ocenę płynności procesu zagłębiania narzędzia w glebie. Płynność tę w warunkach rzeczywistej pracy scharakteryzowano w sposób dwójaki; poprzez pomiar wartości osiągniętego przez narzędzie zagłębienia oraz wartość siły pochodzącej od oporu gleby. Pomiar i porównanie ww. wartości pomoże ocenić, która wersja wykorzystywanego ostrza pozwala na zagłębianie płynniejsze, z użyciem mniejszej siły, a co za tym idzie mniej energochłonną pracę.

Badania polowe w rzeczywistych warunkach pracy zostały przeprowadzone na modelu funkcjonalnym. Ostrza narzędzia przymocowane do ramy tworzyły kompletne narzędzie sadzące, które wraz z kompletnym układem hydraulicznym za pomocą wahaczy zamocowane zostało do ramy pośredniej (Rys. 4.15).



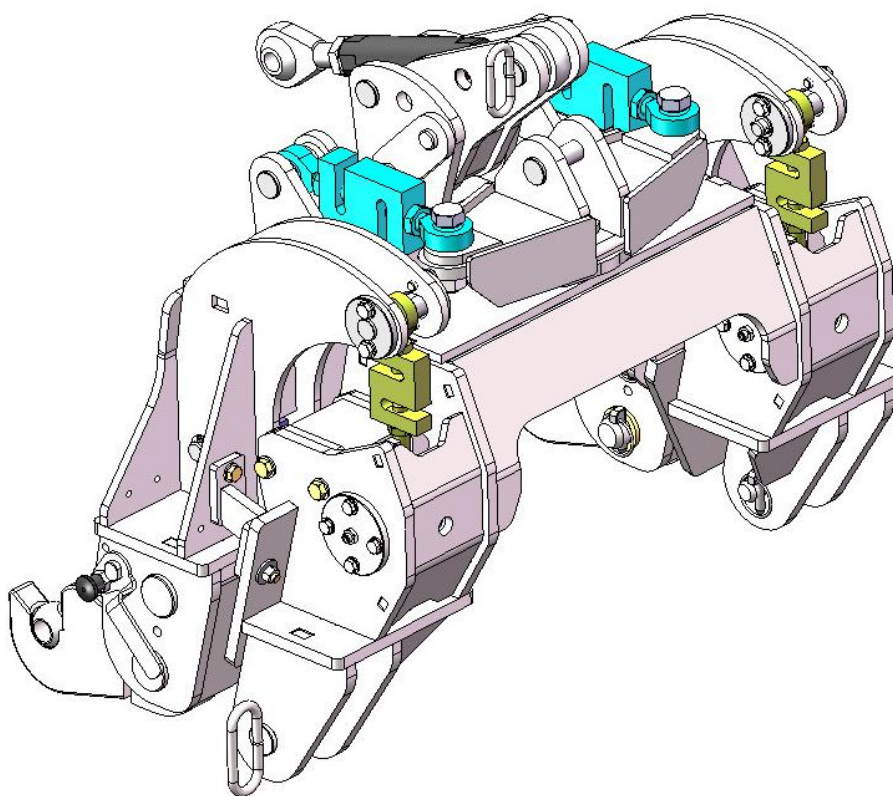
Rys. 4.15. Model funkcjonalny narzędzia sadzącego zamocowany do ramy pośredniej umożliwiającej zagregowanie z ciągnikiem rolniczym [opracowanie własne]

W celu zmierzenia potrzebnych do późniejszej analizy parametrów pracy narzędzia, ramę pośrednią wraz z modelem narzędzia zamocowano następnie do ramy pomiarowej agregowanej do współpracującego ciągnika rolniczego będącego źródłem napędu badanego zespołu roboczego (Rys. 4.16). Do badań użyto ciągnika rolniczego marki Deutz-Fahr, model Agrottron X720 o mocy 200 kW będący w posiadaniu Łukasiewicz-PIT.

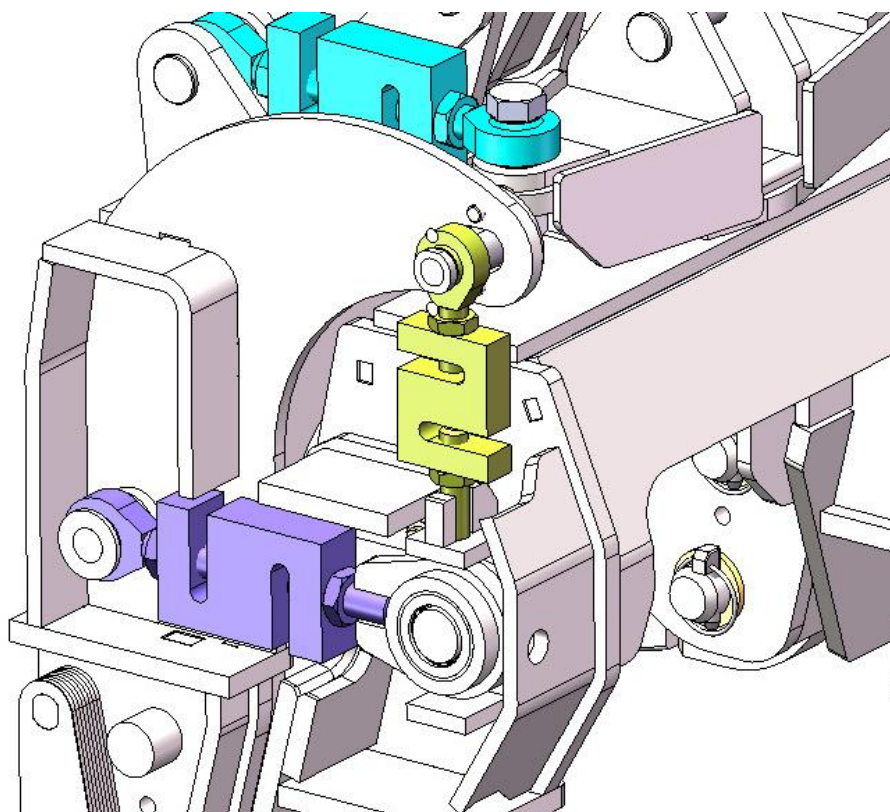


Rys. 4.16. Rama z narzędziem sadzącym połączona pośrednio z ciągnikiem z użyciem ramy pomiarowej [opracowanie własne]

Rama pomiarowa jest modulem, który pozwala w sposób pośredni połączyć wiele maszyn i urządzeń z ciągnikiem rolniczym, przy czym jej główną cechą jest możliwość mierzenia sił generowanych pomiędzy ciągnikiem i zagregowaną z nim maszyną rolniczą lub leśną. Model CAD 3D ramy zaprezentowano na Rys. 4.17, natomiast na Rys. 4.18 zaprezentowano na przekroju rozmieszczenie czujników wewnątrz ramy. Jest to zasadniczo układ dwóch ram połączonych wzajemnie ze sobą za pomocą kompletu siedmiu czujników siły. Czujniki, które wchodzi w wyposażenie ramy są czujnikami typu S o oznaczeniu H3-C3-5.0t-6B, o zakresie pomiarowym do 5t. Przykład jednego z czujników, który stanowi integralną część ramy pomiarowej przedstawiono na Rys. 4.19 Rama pozwala na wyznaczenie środka ciężkości zagregowanej maszyny oraz pomiar sił wzdłużnych, poprzecznych oraz pionowych, które podczas pracy generuje maszyna [86] [133].



Rys. 4.17. Model CAD 3D ramy pomiarowej w widoku izometrycznym – rozmieszczenie czujników typu S w konstrukcji [133]



Rys. 4.18. Model CAD 3D ramy pomiarowej w przekroju – rozmieszczenie czujników typu S w konstrukcji [opracowanie własne] [133]



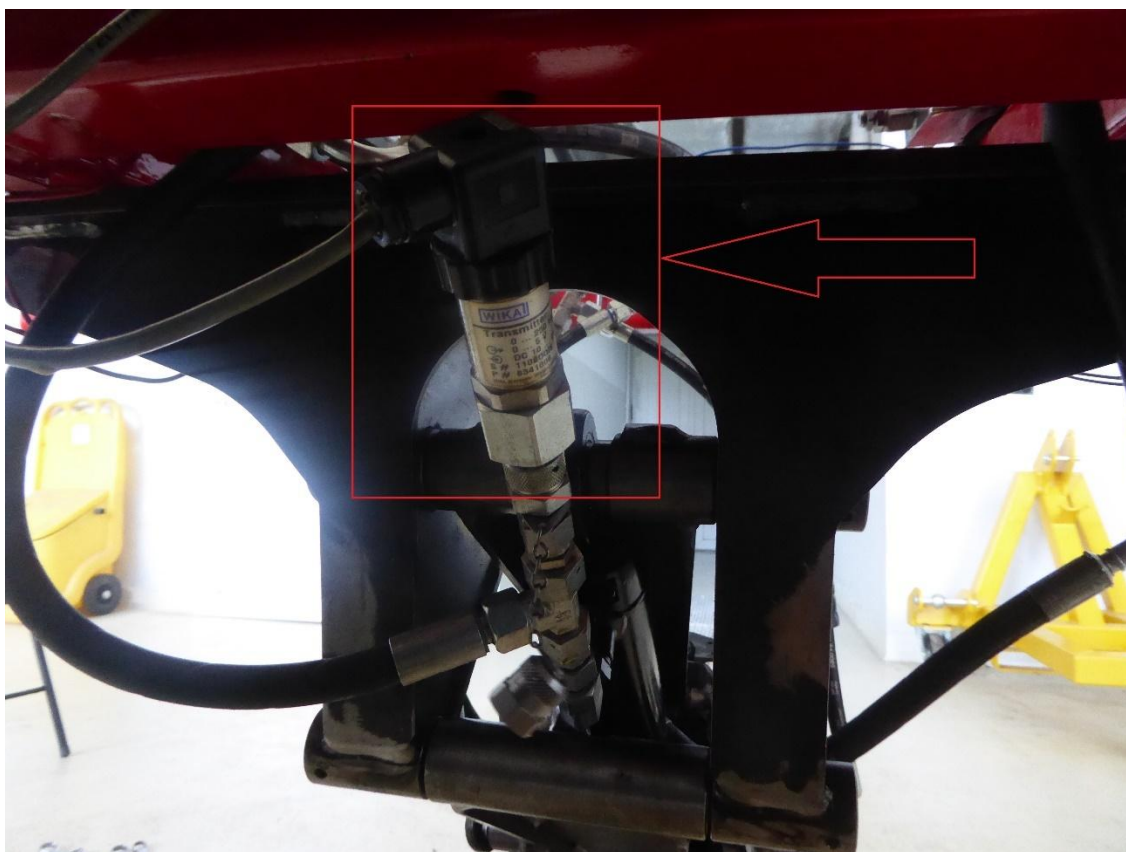
Rys. 4.19. Czujnik typu S o oznaczeniu H3-C3-5.0t-6B, o zakresie pomiarowym do 5t, który wchodzi w skład oprzyrządowania ramy pomiarowej [133]

Rama pozwala zmierzyć masę własną zawieszanej maszyny, siły pionowe, wzdłużne oraz poprzeczne, które działają na maszynę.

Podczas prowadzenia badań mierzone były także ciśnienie oleju podczas zagłębiania narzędzia sadzącego oraz głębokość wbijania narzędzia sadzącego. Ciśnienie oleju było mierzone na siłowniku odpowiadającym za zagłębianie i wygłębianie narzędzia, po stronie tłoka. Do pomiarów wykorzystywano czujnik Wika o zakresie pomiarowym 0÷250 bar i dokładności pomiarowej $\pm 0,5\%$ oraz sprzęt pomiarowy HBM QuantumX MX840B wraz z dedykowanym oprogramowaniem Catman. Na Rys. 4.20 przedstawiono czujnik ciśnienia, natomiast na Rys. 4.21 miejsce pomiaru ciśnienia w układzie.



Rys. 4.20. Czujnik ciśnienia Wika o zakresie pomiarowym od 0 do 250 barów



Rys. 4.21. Miejsce pomiaru ciśnienia w układzie podczas zagłębiania narzędzia [opracowanie własne]

Pomiar prędkości zagłębiania narzędzia sadzącego odbywał się z zastosowaniem czujnika typu linkowego (Rys. 4.22). Jest to czujnik Kubler D5.3501.A331.0000, o dokładności pomiarowej $\pm 0,1\%$ i zakresie $0 \div 1000$ mm, który zamontowany był na ramie pośredniej, natomiast końcówka linki zamocowana była do blaszki, która była wprawiana w ruch podczas ruchu pionowego narzędzia.



Rys. 4.22. Czujnik linkowy, model Kubler D5.3501.A331.0000

Na rysunku poniżej (Rys. 4.23) przedstawiono sposób zamocowania czujnika linkowego do ramy wraz z zamocowaną końcówką linki do narzędzia zagłębianego.



Rys. 4.23. Czujnik typu linkowego zamontowany do ramy podczas prowadzenia badań w warunkach rzeczywistych (linia niebieska) [opracowanie własne]

W celu umożliwienia rejestracji potrzebnych parametrów zastosowano urządzenie QuantumX marki HBM (Rys. 4.24 oraz Rys. 4.25), które podłączone było do komputera z oprogramowaniem Catman.



Rys. 4.24. Skrzynka pomiarowa HBM QuantumX MX840B (widok części zasilającej) [opracowanie własne]



Rys. 4.25. Skrzynka pomiarowa HBM QuantumX MX840B (widok od frontu) [opracowanie własne]

Badania wykonywane były na poletku doświadczalnym zlokalizowanym na terenie Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego w miesiącach lipiec oraz sierpień 2024 roku. Podczas badań temperatura otoczenia zawierała się w przedziale $23 \div 26^{\circ}\text{C}$, natomiast wilgotność względna powietrza wynosiła od 30 do 35%. Pole, które wykorzystano do badań miało wymiary $3,5 \times 25 \text{ m}$, co daje powierzchnię $87,5 \text{ m}^2$. Na Rys. 4.26 przedstawiono wykorzystane pole testowe, natomiast na Rys. 4.27 zaprezentowano pole przygotowywane do testów po przejeździe agregatu uprawowego pracującego na głębokości 15 cm.



Rys. 4.26. Pole doświadczalne, na którym prowadzono badania w warunkach rzeczywistych [opracowanie własne]



Rys. 4.27. Pole doświadczalne po uprawie agregatem uprawowym na głębokości 15 cm
[opracowanie własne]

Przygotowując model narzędzia wraz z ramą do badań, wykorzystując posiadane doświadczenie zdobyte podczas prowadzenia innych podobnych badań terenowych, model badawczy wyposażono w dodatkowe obciążenie w postaci 6 obciążników o masie 47 kg każdy. Ich zadaniem jest utrudnienie unoszenia się zagregowanego z ciągnikiem narzędzia podczas wykonywania pracy, sadzenia sadzonek drzew z zakrytym systemem korzeniowym. Zjawisko unoszenia zestawu testowego spowodowane jest dużą siłą wywieraną na podłoże działającą na długim ramieniu, jakie tworzy zawieszona na ciągniku maszyna (Rys. 4.28).



Rys. 4.28. Obciążenie ciągnika marki Kubota o masie 47 kg zastosowane podczas prowadzenia badań [opracowanie własne]

Obciążenie w liczbie sześciu sztuk, zostało zamontowane symetrycznie po trzy sztuki na każdą stronę zestawu testowego na ramie pośredniej, na wieszakach specjalnie przygotowanych do tego celu (Rys. 4.29).



Rys. 4.29. Obciążniki ciągnika marki Kubota o masie jednostkowej 47 kg w liczbie sześciu sztuk, po 3 sztuki na stronę ramy [opracowanie własne]

W celu przeprowadzenia badań w sposób kompleksowy, dokonano przejazdów roboczych z modelem wyposażonym w narzędzie sadzące najpierw z jedną, a następnie z drugą wersją narzędzia. Ponadto przejazdy odbywały się w taki sposób, że za jednym razem sadzonek nie sadzono, by sprawdzić narzędzie pod kątem zagłębiania, a w kolejnym przejeździe sadzonki sadzono, by dokonać również oceny w jaki sposób sadzonka zachowuje się przemieszczając się przez wnętrze narzędzia i dokonać oceny jakości sadzenia po zakończonym procesie.

Do badań wykorzystano sadzonki drzew iglastych, były to przede wszystkim roczne i dwuletnie sadzonki sosnowe o wysokości do 53 cm i średnicy korony do 12 cm. Pierwotnie planowano prowadzić badania również z wykorzystaniem sadzonek drzew liściastych, jednak z uwagi na porę roku, w której prowadzono badania, a co za tym idzie – dość rozłożystą koronę liści, a także długość sadzonki (sadzonki liściaste były dwu- oraz trzyletnie i miały wysokość dochodzącą do 90 cm i rozpiętość korony do 32 cm), zrezygnowano z takiego badania. Sadzonki drzew liściastych w takiej sytuacji przede wszystkim nie byłyby w stanie przesunąć się przez wnętrze narzędzia sadzącego. Ponadto były znacząco dłuższe aniżeli długość narzędzia wynosząca 485 mm w przypadku ostrza stożkowego oraz 484 mm w przypadku ostrza klinowego. W takim przypadku sadzonka po wysadzeniu byłaby zabrana z ziemi, podniesiona wraz z kolejnym ruchem roboczym narzędzia oraz realizowanym równocześnie przejazdem ciągnika z powodu wystającej ponad rurę narzędzia jej korony o znacznie większych rozmiarach, niż wymiary przekroju kanału kostura. Na zdjęciach poniżej (Rys. 4.30 ÷ Rys. 4.35) pokazano sadzonki drzew iglastych oraz liściastych, które były do dyspozycji podczas prowadzenia badań.



Rys. 4.30. Sadzonki dwuletnie iglaste (sosna) – przedstawienie szerokości korony sadzonek [opracowanie własne]



Rys. 4.31. Sadzonki dwuletnie iglaste (sosna) – przedstawienie wysokości sadzonek [opracowanie własne]



Rys. 4.32. Sadzonki dwuletnie iglaste – przedstawienie wysokości sadzonek w przybliżeniu [opracowanie własne]



Rys. 4.33. Sadzonki trzyletnie liściaste – przedstawienie szerokości korony sadzonek [opracowanie własne]



Rys. 4.34. Sadzonki trzyletnie liściaste (dąb) – przedstawienie wysokości sadzonek [opracowanie własne]



Rys. 4.35. Sadzonki trzyletnie liściaste (buk) – przedstawienie wysokości sadzonek [opracowanie własne]

Metodyka prowadzenia badań polegała na wykonaniu przejazdów wzdłuż przygotowanego pola z:

- narzędziem wyposażonym w ostrze klinowe bez wysadzania sadzonek,
- narzędziem wyposażonym w ostrze klinowe z wysadzaniem sadzonek,
- narzędziem wyposażonym w ostrze stożkowe bez wysadzania sadzonek,
- narzędziem wyposażonym w ostrze stożkowe z wysadzaniem sadzonek.

Przed każdym przejazdem z użyciem narzędzia sadzącego wykonano przejazd ciągnikiem z zawieszonym na jego TUZ-ie agregatem uprawowym. Dokonano w ten sposób spulchnienia gleby na głębokości 15 cm, co przedstawiono na Rys. 4.36.



Rys. 4.36. Przejazd z zawieszonym agregatem uprawowym celem spulchnienia i ujednolicenia gleby [opracowanie własne]

W kolejnym etapie przygotowano ciągnik wraz z ramą ustawiając ją w odpowiedniej, wypoziomowanej pozycji początkowej (Rys. 4.37).



Rys. 4.37. Ustawianie ramy pomiarowej oraz ramy pośredniej równoległe do podłoża w punkcie startowym [opracowanie własne]

4.4. Statystyczne opracowanie wyników

Celem podsumowania i wyciągnięcia stosownych wniosków wykonano także analizę statystyczną otrzymanych wyników badań doświadczalnych. Zastosowano do tego celu oprogramowanie MS Office i arkusze kalkulacyjne Excel. Obliczono podstawowe wartości statystyczne, m.in. średnią, medianę, odchylenie standardowe oraz zastosowano test t-Studenta. Test ten dla prób zależnych jest odpowiednim narzędziem, gdy:

- porównujemy dwie serie pomiarów wykonane na tych samych obiektach – np. pomiary siły oporu dla dwóch różnych typów narzędzi (klin vs stożek) wykonane na tych samych próbach materiałowych;
- dane są ilościowe i mają rozkład zbliżony do normalnego – co jest typowe dla pomiarów technicznych;
- Istotne jest znalezienie różnicy między średnimi wartościami – czyli czy jeden typ narzędzia daje istotnie inne wyniki, niż drugi.

Zastosowanie testu t-Studenta dla prób zależnych było uzasadnione ze względu na charakter danych (powiązane pomiary), ich ilościowy charakter oraz cel analizy (porównanie średnich). Przyjęty poziom istotności $\alpha = 0,05$ oznacza, że akceptowane jest maksymalnie 5% ryzyko popełnienia błędu I rodzaju, czyli odrzucenia prawdziwej hipotezy zerowej. Jednocześnie poziom ten jest kompromisem między ryzykiem błędu, a siłą testu – mniejsze wartości α (np. 0,01) zmniejszają ryzyko błędu, ale wymagają większych różnic lub większej liczby danych i jest zgodny z praktyką naukową i zapewnia równowagę między czułością testu, a ryzykiem błędu.

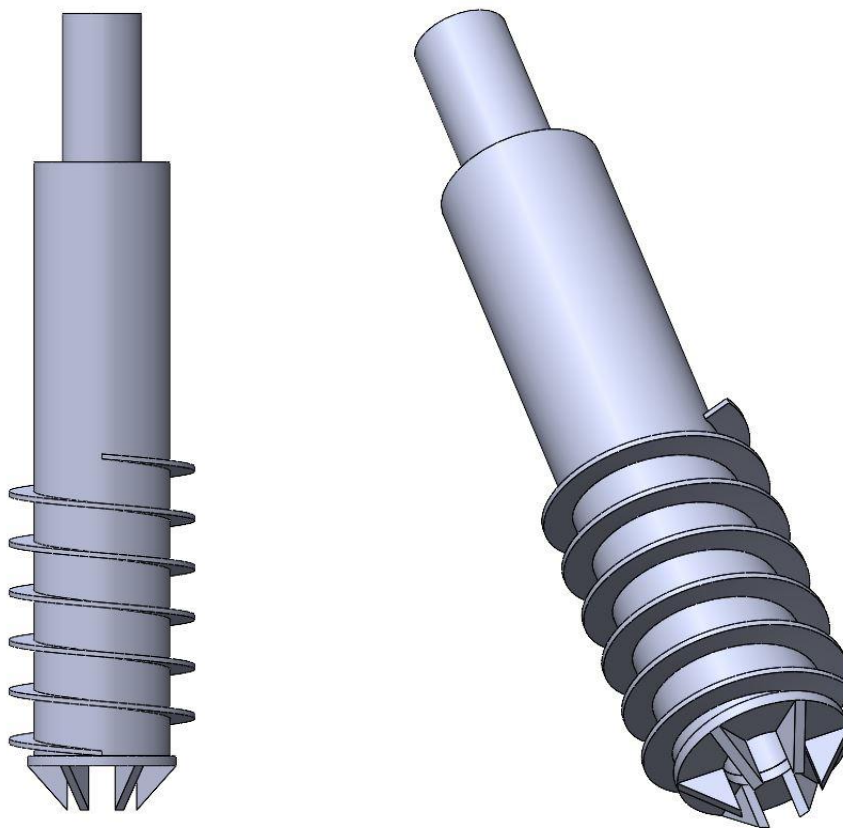
5. PROJEKT NOWEJ KONSTRUKCJI SADZĄCEJ

5.1. Konceptcje rozwiązań nowego narzędzia

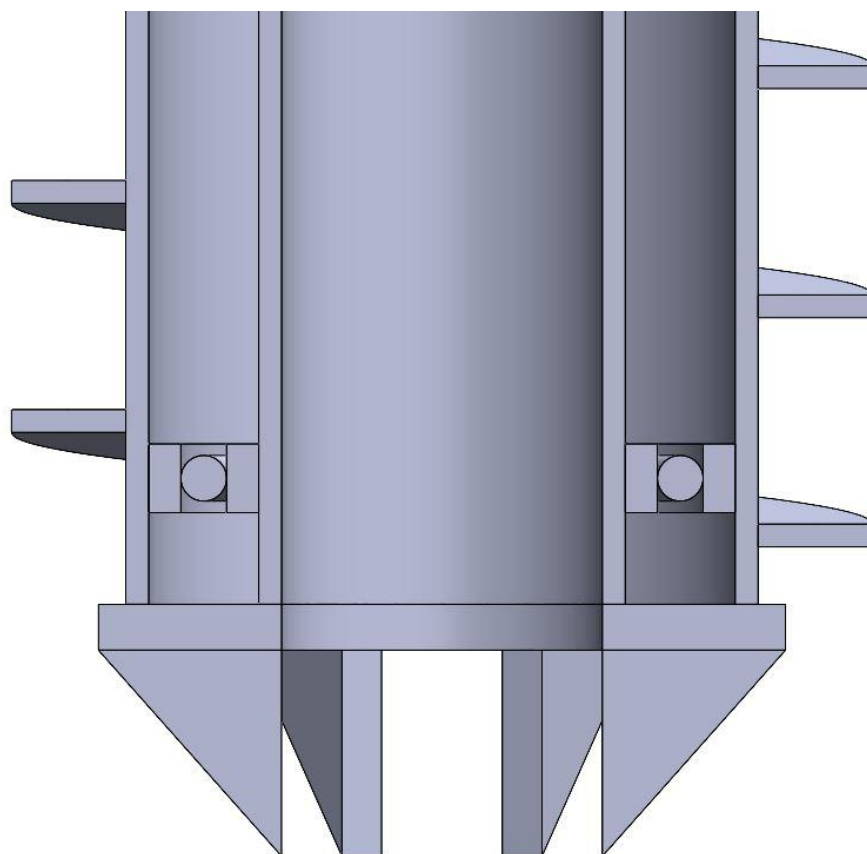
Dysponując wiedzą pozyskaną z przeglądu dostępnych materiałów źródłowych, wiedzą na temat sytuacji rynkowej w kwestii dostępnych maszyn i urządzeń przeznaczonych do sadzenia sadzonek drzewek utworzono kilka koncepcji nowego kształtu narzędzia. Tworząc wspomniane koncepcje, jako bazę przyjęto ramę robota sadzącego, który powstał we współpracy konsorcjum Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych, Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie oraz Ośrodka Techniki Leśnej w Jarocinie, a który to robot otrzymał akronim RoboFoR. Koncepcje te uwzględniają ramę robota wraz z dostępnym wyposażeniem oraz układ kinematyczny, który wykorzystywany jest do napędu urządzenia sadzącego [98] **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..**

Powstały w ten sposób koncepcje, które brane były pod uwagę na wstępnym etapie projektowania. Każda z nich wyróżnia się pewnymi cechami na tle pozostałych, jednak, ma też swoje wady.

Pierwsza z koncepcji reprezentuje narzędzie sadzące w postaci wiertła z wewnętrzną przestrzenią na sadzonkę. Idea działania polega na tym, że maszyna zatrzymuje się w miejscu sadzenia, a wiertło, we wnętrzu którego znajduje się sadzonka jest wprawiane w ruch poprzez napęd zewnętrzny i zagłębia się w ziemi. Następnie w momencie wygłębienia narzędzia sadzonka pozostaje w glebie. Na Rys. 5.1 oraz Rys. 5.2. Narzędzie sadzące w postaci obrotowego wiertła; widok w przekroju końcówki wgłębnej [opracowanie własne] przedstawiono wspomnianą koncepcję narzędzia.

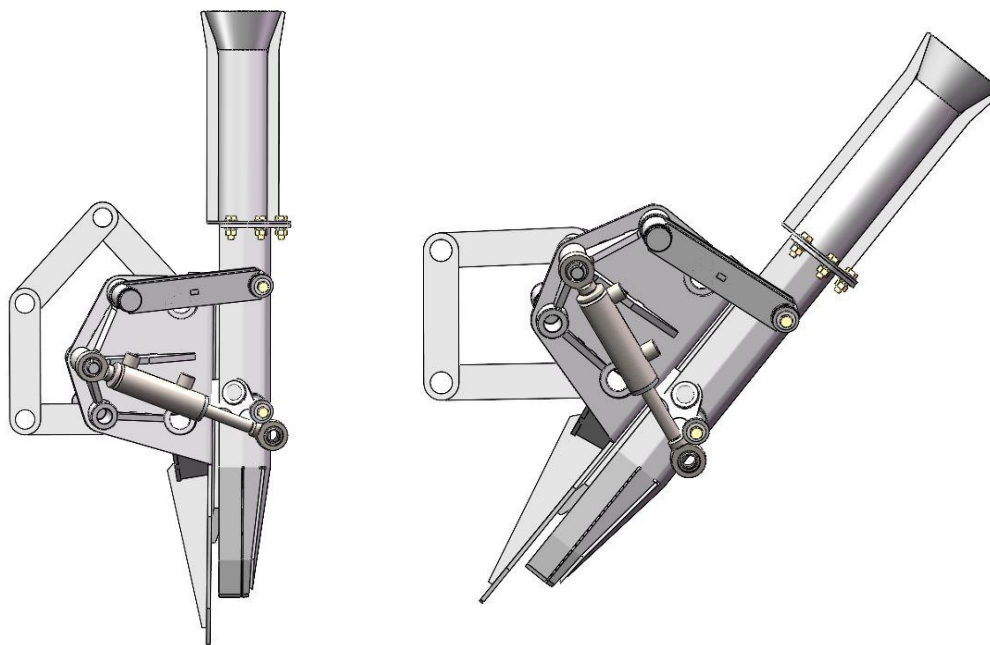


Rys. 5.1. Narzędzie sadzące w postaci obrotowego wiertła; widok z przodu (po lewej), widok izometryczny (po prawej) [opracowanie własne]



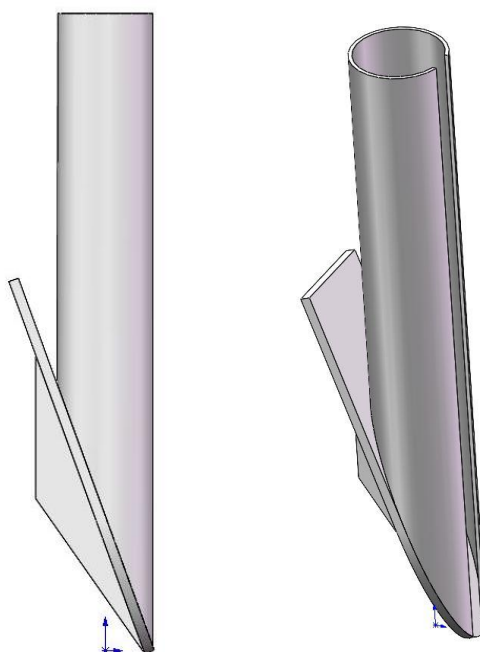
Rys. 5.2. Narzędzie sadzące w postaci obrotowego wiertła; widok w przekroju końcówki węgłowej [opracowanie własne]

W innej koncepcji, która została wzięta pod uwagę wykorzystano pierwotne narzędzie sadzące, w które wyposażony był robot sadzący RoboFoR. Narzędzie to wykorzystuje mechanizm dwóch otwieranych ramion, które w momencie unoszenia rozchylają się także na bok. Innowacyjne w tej koncepcji jest wyposażenie układu w dodatkowy mechanizm przegubowy, napędzany dodatkowym siłownikiem hydraulicznym. Narzędzie w swojej wyjściowej pozycji jest skierowane pod kątem około 45 stopni do kierunku jazdy i wykorzystując nachylenie oraz posuw całej maszyny zagłębia się w glebie. Kiedy narzędzie osiągnie oczekiwaną głębokość siłownik wymusza ustawienie narzędzia w kierunku pionowym. Następnie narzędzie wysadza sadzonkę, otwiera ramiona i wygłębia się do pozycji pierwotnej. Na Rys. 5.3 zaprezentowano opisaną powyżej koncepcję narzędzia.



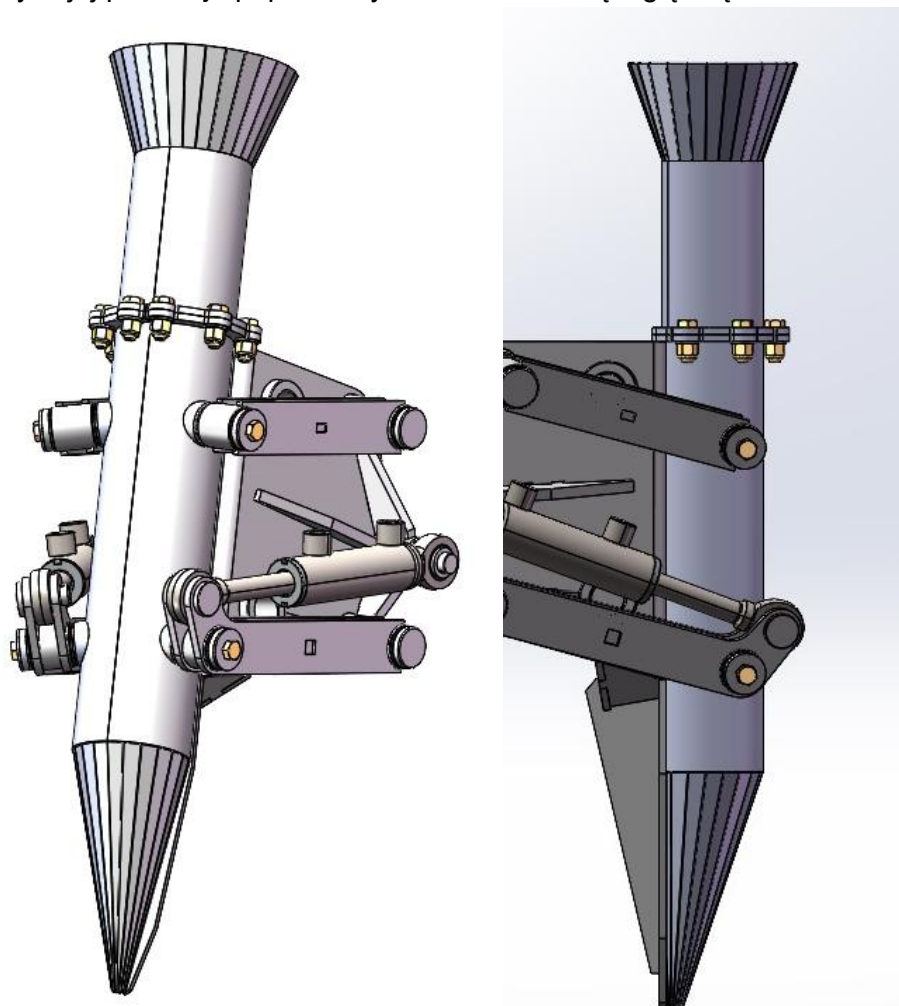
Rys. 5.3. Narzędzie sadzące z ostrzem w postaci klina z unoszonymi ramionami zamontowane na mechanizmie przegubowym pozwalającym na ustawienie narzędzia pod kątem względem powierzchni gleby; pozycja sadzenia (po lewej), pozycja początkowa (po prawej) [opracowanie własne]

Trzecia koncepcja jest dość prostym narzędziem sadzącym. Bazuje ona na ręcznym kosturze, szeroko wykorzystywanym w Skandynawii. Zbudowana jest z rury cylindrycznej zaślepionej na końcu płytką blokującą sadzonkę we wnętrzu narzędzia. Rura jest na końcu ścięta pod kątem 60 stopni i jednocześnie płytka zaślepiająca również pod takim kątem ustawiona jest względem podłoża (Rys. 5.4).



Rys. 5.4. Narzędzie sadzące w formie rury cylindrycznej z płytką wgłębną pełniącą rolę zaślepki dla sadzonki; widok z profilu (z lewej), widok izometryczny (po prawej) [opracowanie własne]

Kolejna koncepcja jest najbardziej zbliżona do pierwowzoru, ponieważ wykorzystuje kinematykę pracy całego układu, jak i samego narzędzia w postaci dwóch otwieranych ramion. Różnica polega na zastosowaniu większego przekroju rury prowadzącej sadzonkę oraz zastosowaniu końcówki wgłębnej w postaci stożka zamiast klina. Na Rys. 5.5 przedstawiono koncepcję narzędzia wykorzystującą kinematykę pracy pierwowzoru wyposażonego w rurę o większej średnicy w jej przekroju poprzecznym oraz końcówkę wgłębnią w kształcie stożka.



Rys. 5.5. Koncepcja narzędzia wykorzystująca kinematykę pracy pierwowzoru wyposażoną w rurę o większym przekroju poprzecznym oraz końcówkę wgłębnią w kształcie stożka; widok z przodu (po lewej), widok z profilu (po prawej) [opracowanie własne]

5.2. Uzasadnienie wyboru i analiza wybranej koncepcji

Analiza dostępnych narzędzi, w tym możliwej do zastosowania aparatury pomiarowej oraz założenia metodyki badań ukierunkowały wybór ostatniej z przedstawianych koncepcji narzędzia sadzącego sadzonki drzewek, a więc narzędzia sadzącego w postaci rury cylindrycznej wraz z końcówką wgłębnią w kształcie stożka, jako przedmiotu przyjętego procesu badawczego. Wybór ten podyktowany został również tym, że postanowiono sprawdzić, jaki wpływ na przebieg procesu sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym ma zmiana wybranych elementów konstrukcyjnych samego narzędzia roboczego, a nie zmiana całości koncepcji jego pracy w ramach maszyny jako całości. Istotnym aspektem wpływającym na wybór bazy w postaci istniejącej platformy automatycznego robota sadzącego będącego wynikiem zrealizowania wspomnianego wcześniej projektu pod akronimem RoboFoR był aspekt ekonomiczny. Środki, które zostały przyznane na realizację badań w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy nie

pozwołyby na projekt i budowę kompletnego, nowego urządzenia wraz z hydraulicznym układem napędowym. Taki rodzaj napędu jest najbardziej przydatny do zastosowania z uwagi na rodzaj wykonywanej pracy i przewidywane obciążenia zespołów roboczych narzędzia sadzącego.

Postanowiono zatem wykorzystać podstawę narzędzia sadzącego wraz z jego układem kinematycznym i napędowym i porównać oraz udoskonalić samo narzędzie, które odpowiada bezpośrednio za wysadzanie sadzonek i penetrację gleby.

Geneza tematu ma swoje podłoże właśnie w problematyce automatyzacji procesów związanych z pracami przy sadzeniu lasów. Jedną z przyczyn podjęcia tematu w ramach Doktoratu Wdrożeniowego, była chęć sprawdzenia i udoskonalenia istniejącego elementu, który po wykonaniu wstępnych badań w ramach wspomnianego projektu wymagał usprawnienia. Wykorzystanie istniejącej bazy spowoduje, że będzie możliwość porównania bezpośrednio dwóch różniących się od siebie konstrukcji ostrza wysadzającego z zastosowaniem tego samego rozkładu sił pochodzących od napędu ich elementów roboczych. Niezmieniony pozostanie zakres ruchowy większości podzespołów oraz ich masa. Tym samym będzie możliwość przeanalizowania bezpośredniego wpływu zmiany kształtu samego ostrza na płynność procesu sadzenia.

Podczas prowadzenia prób pierwotną wersją kostura zaobserwowano, iż proces sadzenia jest sporadycznie przerywany. Przerwy te częściowo, z dużym prawdopodobieństwem, powodowane są przez kształt ostrza wysadzającego. Klinowy kształt ostrza spotykał się z nadmiernym oporem gleby, w efekcie czego narzędzie nie mogło zostać w nią zagłębione dostatecznie głęboko. Dochodziło także do klinowania się sadzonki we wnętrzu kostura lub do zakleszczania łodygi sadzonki w szczelinie pomiędzy ramionami kostura. Z kolei mała przestrzeń wewnątrz kostura, inaczej - mały przekrój poprzeczny kostura - powodował, w zależności od ustawienia się sadzonki w kosturze, iż sadzonka podczas wygłębiania narzędzia z ziemi była wraz z kosturem zabierana, podnoszona siłą tarcia pomimo otwartych szczęk od chwili wygłębiania narzędzia.

Opracowana na nowo geometria kostura uwzględnia ww. obserwacje. Został poszerzony korpus ostrza, dzięki czemu istnieje mniejsze prawdopodobieństwo zaklinowania się sadzonki w jego wnętrzu.

Najbardziej istotną modyfikacją jest zastosowanie końcówki wgłębnej w postaci stożka w miejsce klinowej. Pomimo zwiększenia przekroju poprzecznego kostura, dzięki zastosowaniu końcówki stożkowej spodziewane jest zmniejszenie oporów od gleby i łatwiejsze zagłębianie narzędzia oraz łatwiejsze pokonywanie ewentualnych przeszkód znajdujących się w ziemi, np. poprzez ześlizgnięcie się z takiej przeszkody. Z kolei poprzez dokładniejsze wykonanie i dopasowanie części składowych kostura zakłada się eliminację zjawiska zakleszczania się łodygi sadzonki między nie przylegającymi do siebie ramionami kostura. W efekcie praca powinna być rzadziej przerywana i jednocześnie wzrośnie wydajność sadzenia wyrażona w liczbie wysadzonych sadzonek w jednostce czasu.

Zaproponowana zmiana konstrukcji, względem pierwotnej wersji kostura wysadzającego, pod względem technologicznym wydaje się być nieco korzystniejsza. Przede wszystkim z uwagi na fakt, iż korpus zasadniczy ostrza jest regularną rurą cylindryczną. W zależności od możliwości zakładu produkcyjnego korpus ten można wykonać z gotowej rury hutniczej, bądź metodą gięcia z arkusza blachy. Stożek, czyli element penetrujący glebę może być wykonany metodą gięcia z arkusza blachy i następnie zespawany z korpusem. Na etapie produkcji operacja spawania w pewnym stopniu utrudnia proces produkcyjny, natomiast element taki staje się elementem wymiennym. W razie zużycia ściernego stożka i zająścia potrzeby jego wymiany, można zużyty element wyciąć i w jego miejsce spawać nowy. W konstrukcji pierwotnej takiej możliwości nie

było, ponieważ element wgłębny w postaci klina jest integralną częścią korpusu, który jest wykonany w całości metodą gięcia z arkusza blachy.

Podstawa konstrukcji całego układu wysadzającego jest zbudowana zasadniczo z części blaszanych, które są zaprojektowane do wycięcia metodą laserową. Projektowana konstrukcja zmienionego ostrza zagłębianego ma pewne różnice w stosunku do pierwowzoru. Z technologicznego punktu widzenia proces wykonania obu ostrzy będzie jest bardzo zbliżony pod względem czasochłonności i zastosowanych procesów technologicznych.

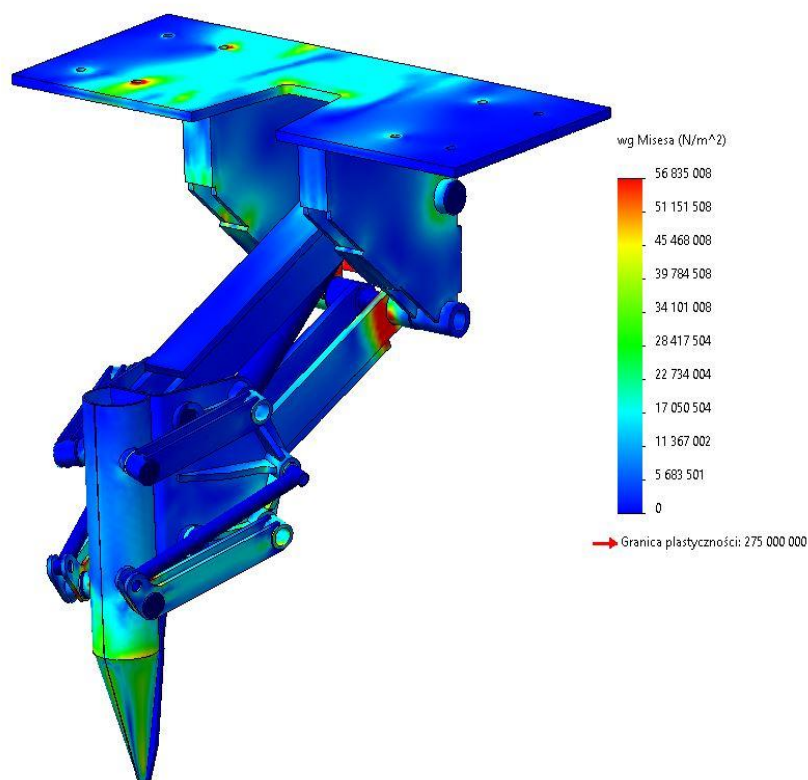
W przypadku nowoprojektowanej konstrukcji, w której ostrze zakończone jest stożkiem, można stożek ten wykonać także metodą odlewania. Istnieje także teoretyczna możliwość zakupu stożka katalogowego, gotowego, który geometrycznie będzie współgrał z projektowanym ostrzem. Takie rozwiązanie byłoby rozwiązaniem tanim, szybkim i być może trwalszym. W zależności od materiału użytego przez producenta do produkcji takiej końcówki stożkowej, jest możliwość zwiększenia trwałości na zużycie ściernie.

Analizując koszt wyprodukowania kompletnego układu wysadzającego, który bazować będzie na licznych elementach wykonanych z blachy oraz na podzespołach hydraulicznego układu napędowego, pojedyncze zmiany wprowadzone w geometrii ostrza zagłębianego nie spowodują znaczących oszczędności. Niemniej, warto pochylić się nad doskonaleniem również tych pojedynczych części, których drobne modyfikacje bardzo często powodują istotne zmiany w funkcjonalności całego układu.

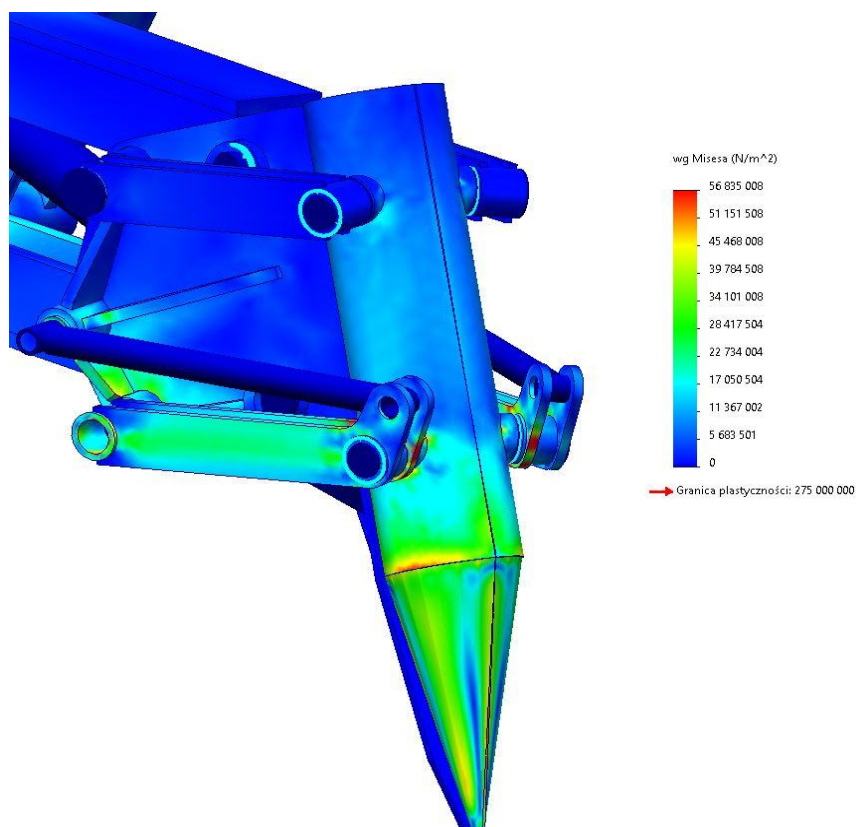
Zmodyfikowana konstrukcja ostrza wysadzającego, podobnie jak pierwowzór, skonstruowana jest zasadniczo z podzespołów wykonanych z arkusza blachy, giętych i spawanych. Różnicę stanowi stożek, jako element penetrujący glebę. Zasadnym podczas badań byłoby porównać konstrukcje wykonane z różnych gatunków stali. Konstrukcja pierwotna została wykonana ze stali S355JR i z tego samego materiału wykonano również drugą wersję ostrza. Rozważyć w przyszłości warto wykonanie ostrza narzędzia również z innego materiału, np. stali typu Hardox. Do przeprowadzenia badań opisanych w niniejszej pracy użyty został ten sam materiał, co dla wersji pierwotnej celem ograniczenia zmiany zbyt wielu parametrów mogących mieć wpływ na wyniki badań.

5.3. Analiza wytrzymałościowa MES

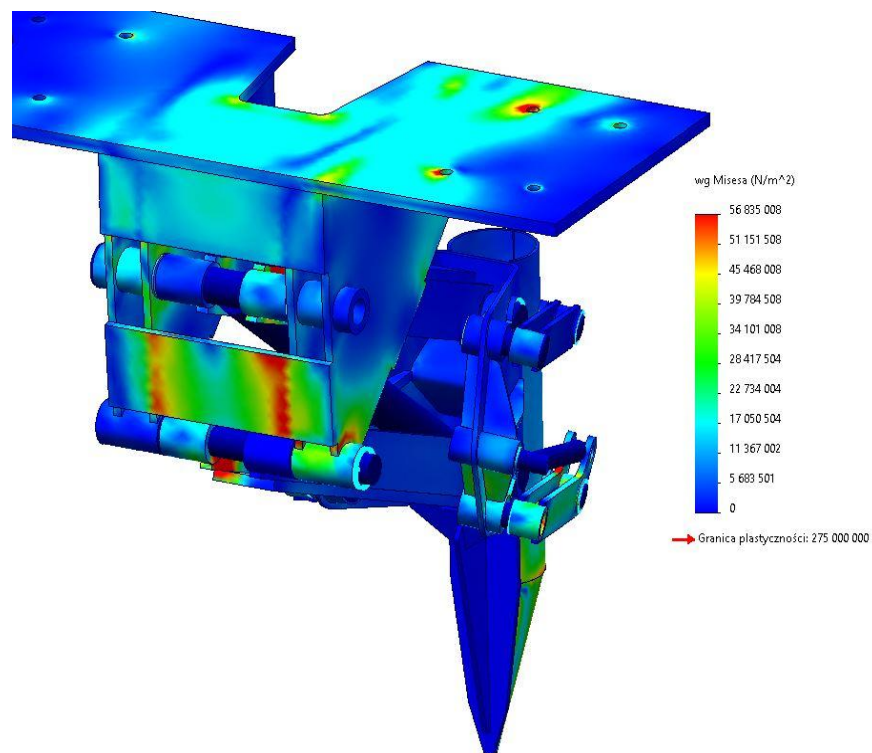
Wykonane analizy MES pozwoliły uzyskać wartości naprężeń, jakie powstają w elementach konstrukcji po przyłożeniu zakładanego obciążenia. Analizę przeprowadzono zgodnie z przyjętą metodyką badawczą, opisaną w rozdziale 4. Na rysunkach poniżej (Rys. 5.6 ÷ Rys. 5.20) zaprezentowano wykresy wartości naprężeń dla każdego z pięciu przypadków przyjętych obciążeń.



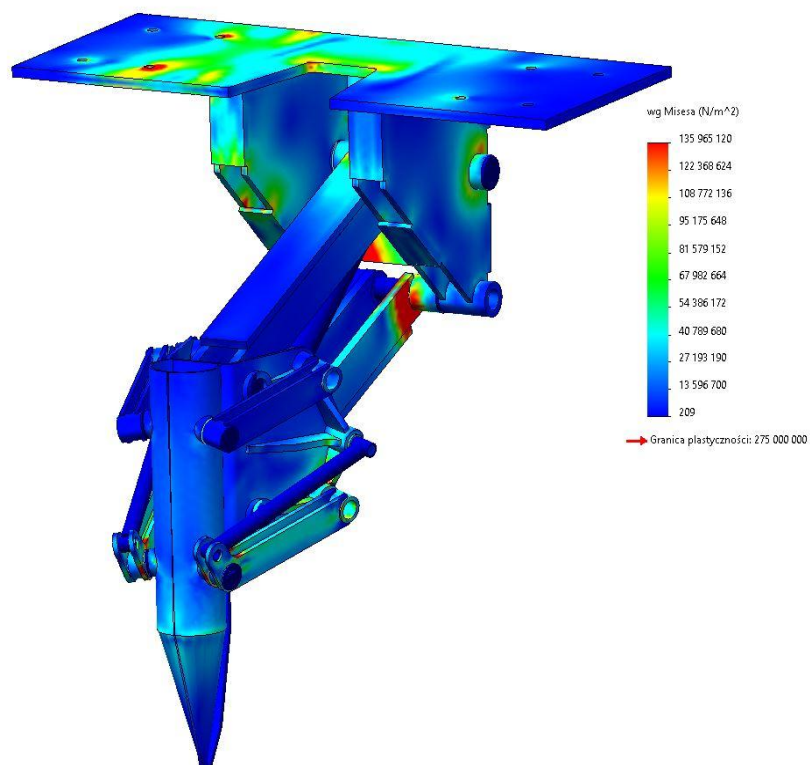
Rys. 5.6. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_1a, widok izometryczny z przodu [opracowanie własne]



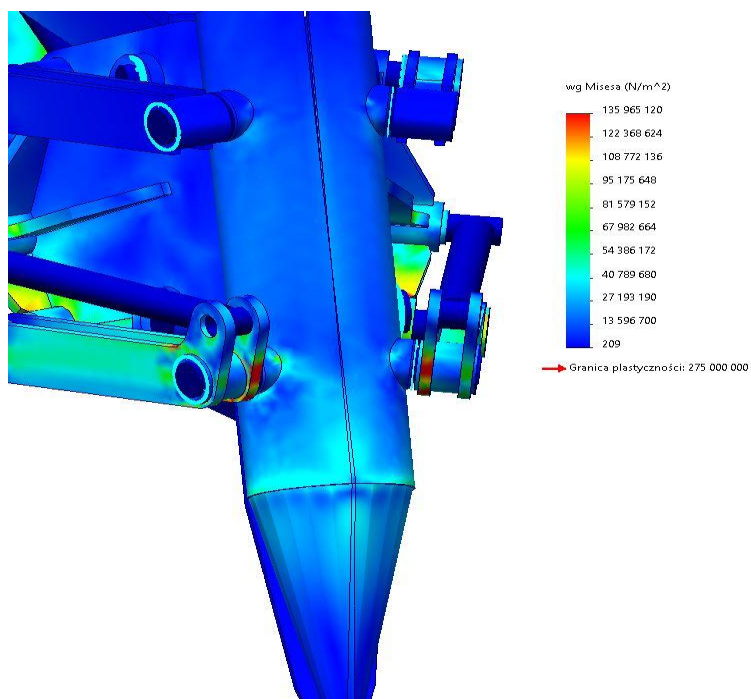
Rys. 5.7. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_1b, widok ostrza sadzącego [opracowanie własne]



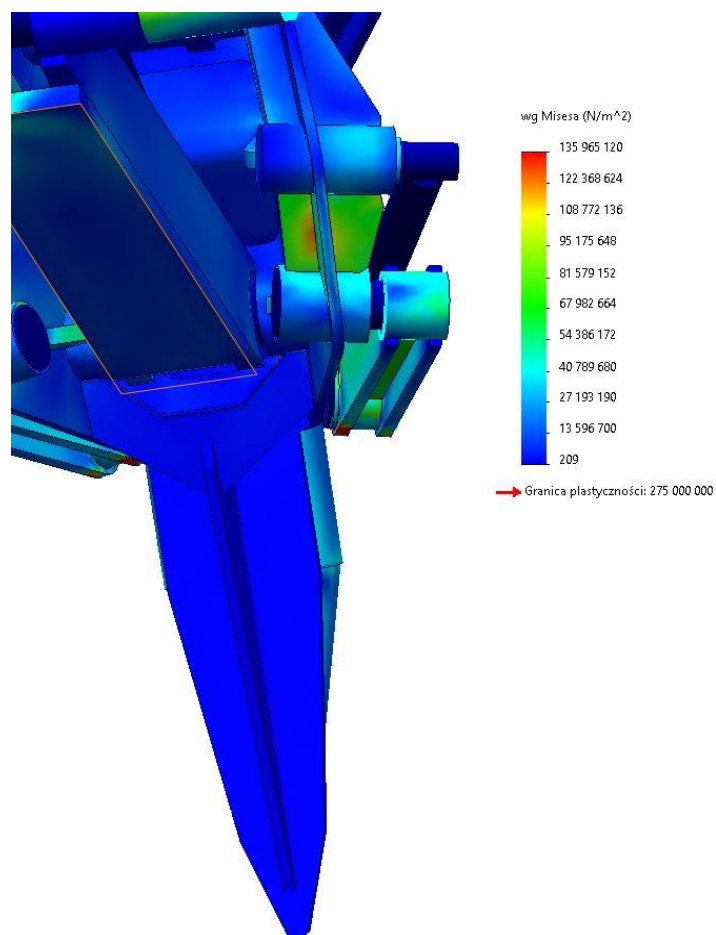
Rys. 5.8. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_1c, widok izometryczny z tyłu [opracowanie własne]



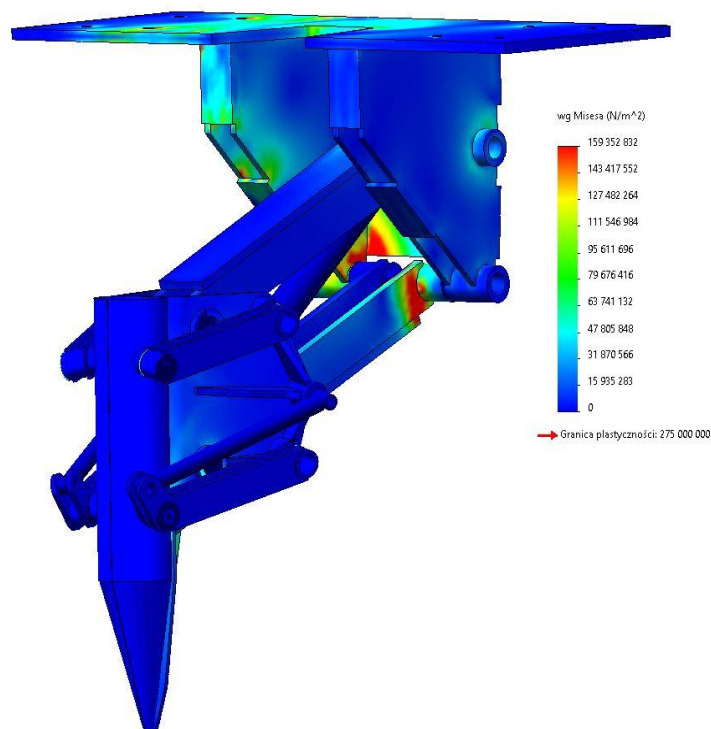
Rys. 5.9. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_2a, widok izometryczny z przodu [opracowanie własne]



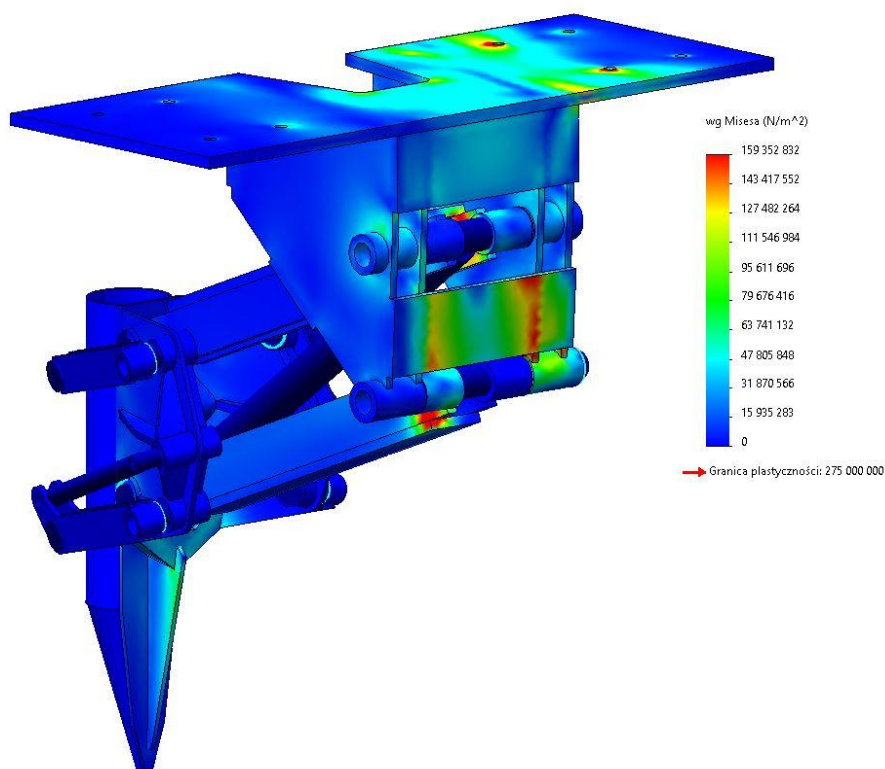
Rys. 5.10. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_2b, widok ostrza sadzącego [opracowanie własne]



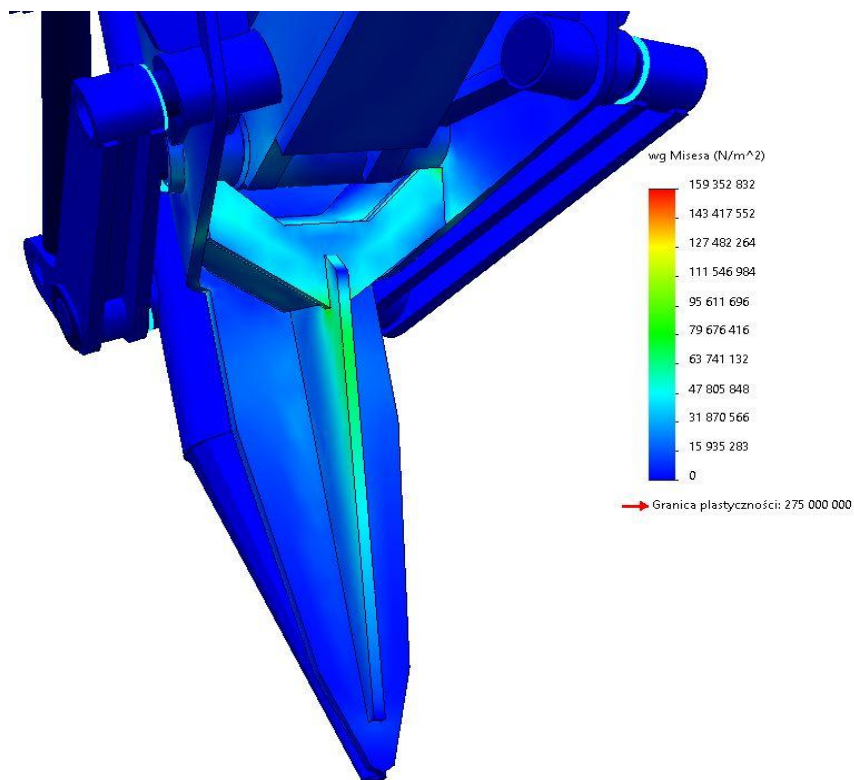
Rys. 5.11. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_2c, widok narzędzia sadzącego z tyłu [opracowanie własne]



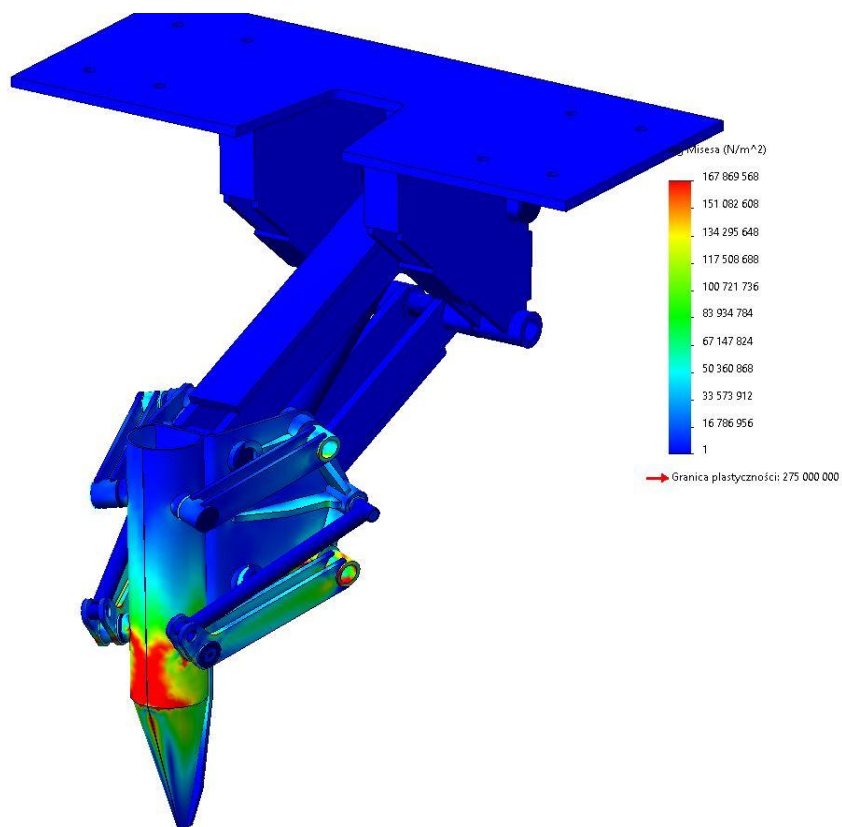
Rys. 5.12. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_3a, widok izometryczny z przodu [opracowanie własne]



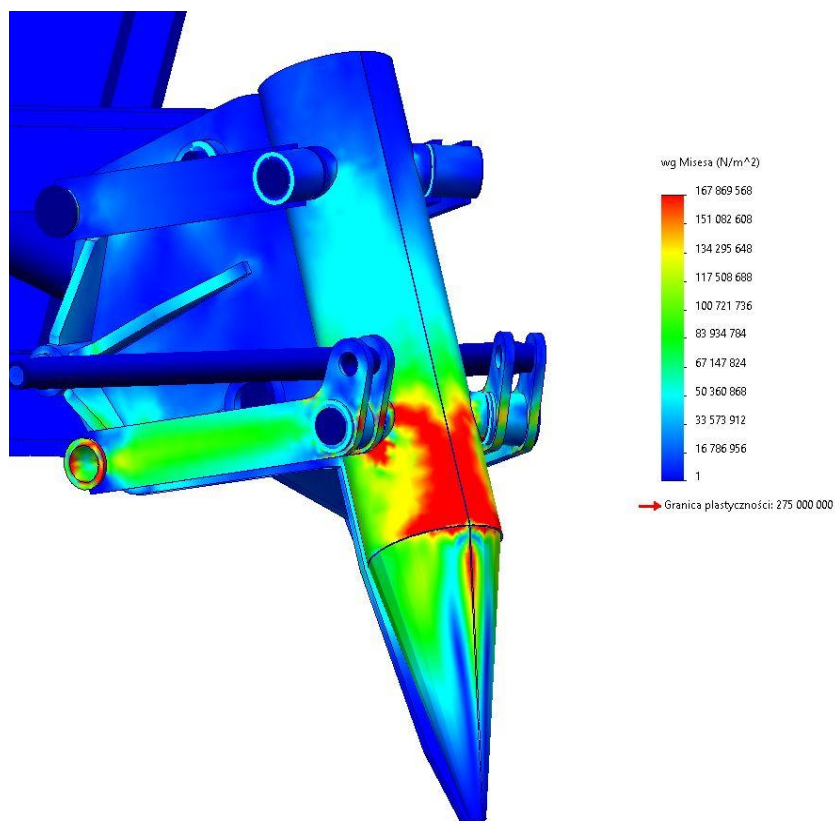
Rys. 5.13. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_3b, widok izometryczny z tyłu [opracowanie własne]



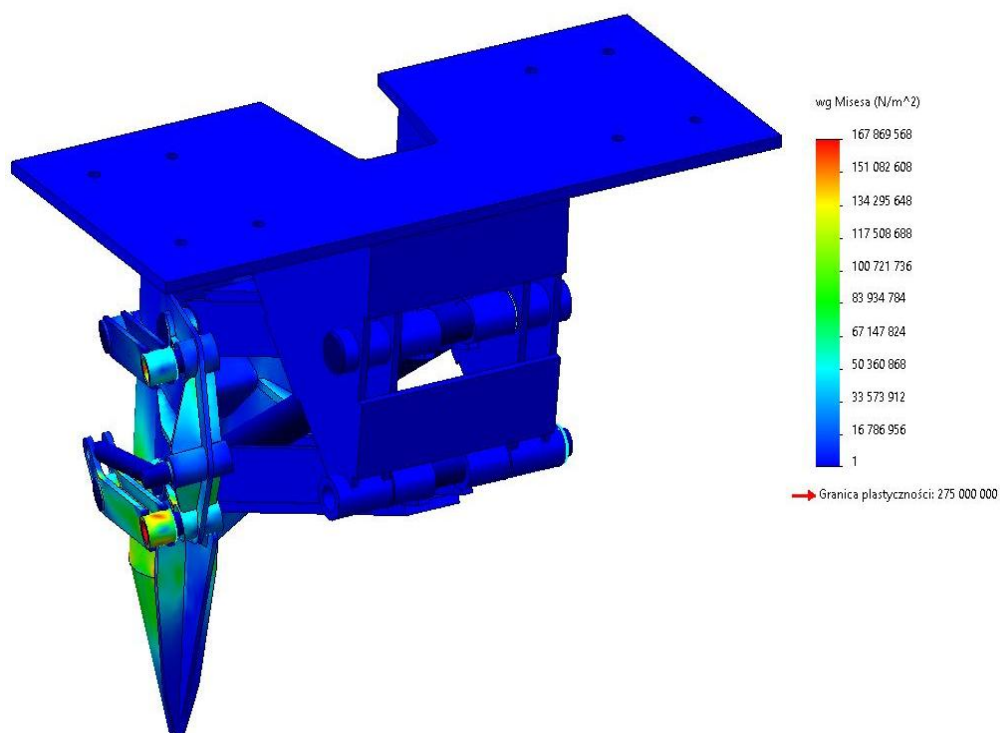
Rys. 5.14. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_3c, widok narzędzia sadzącego z tyłu [opracowanie własne]



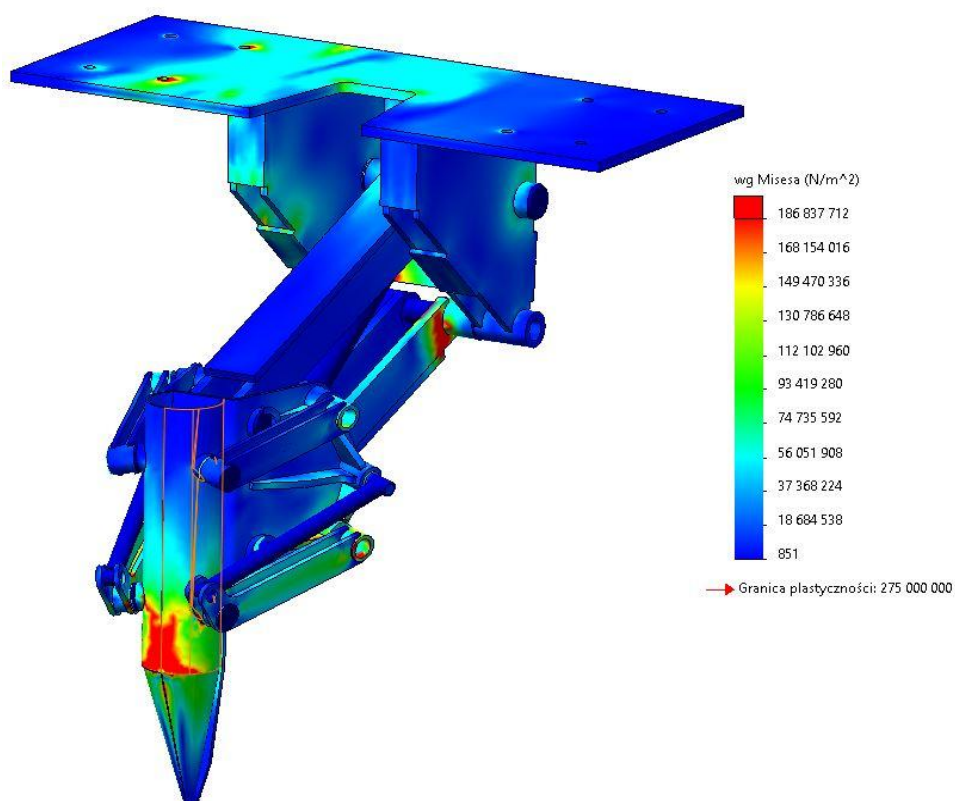
Rys. 5.15. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_4a, widok izometryczny z przodu [opracowanie własne]



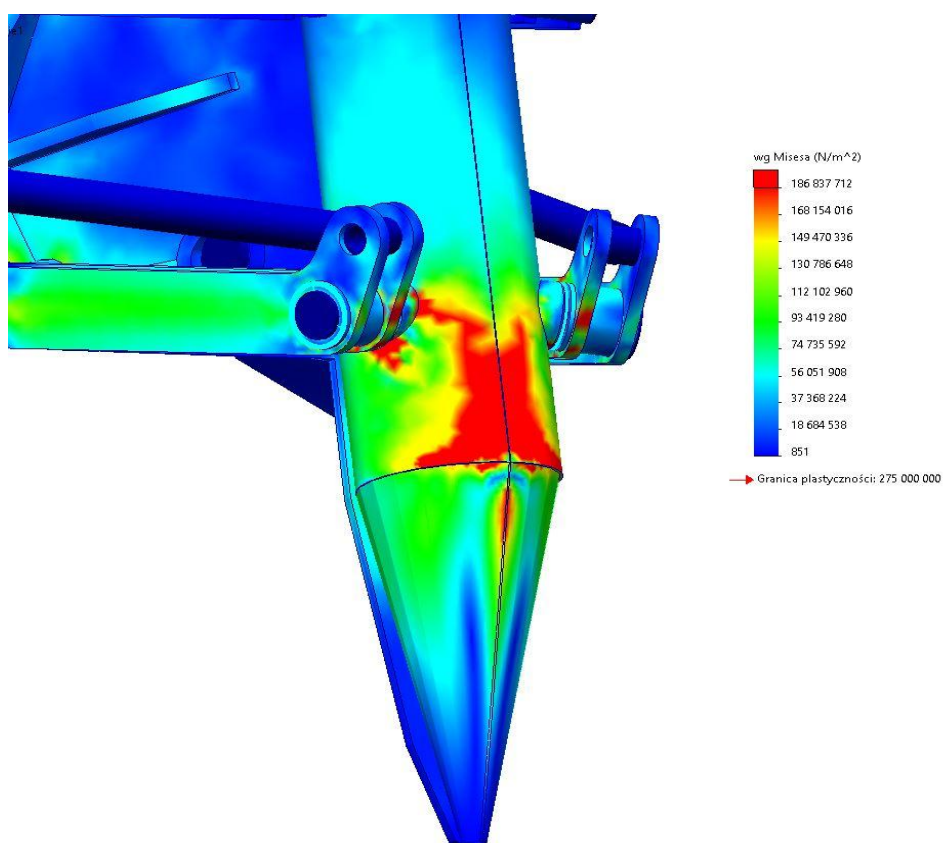
Rys. 5.16. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_4b, widok narzędzia z przodu [opracowanie własne]



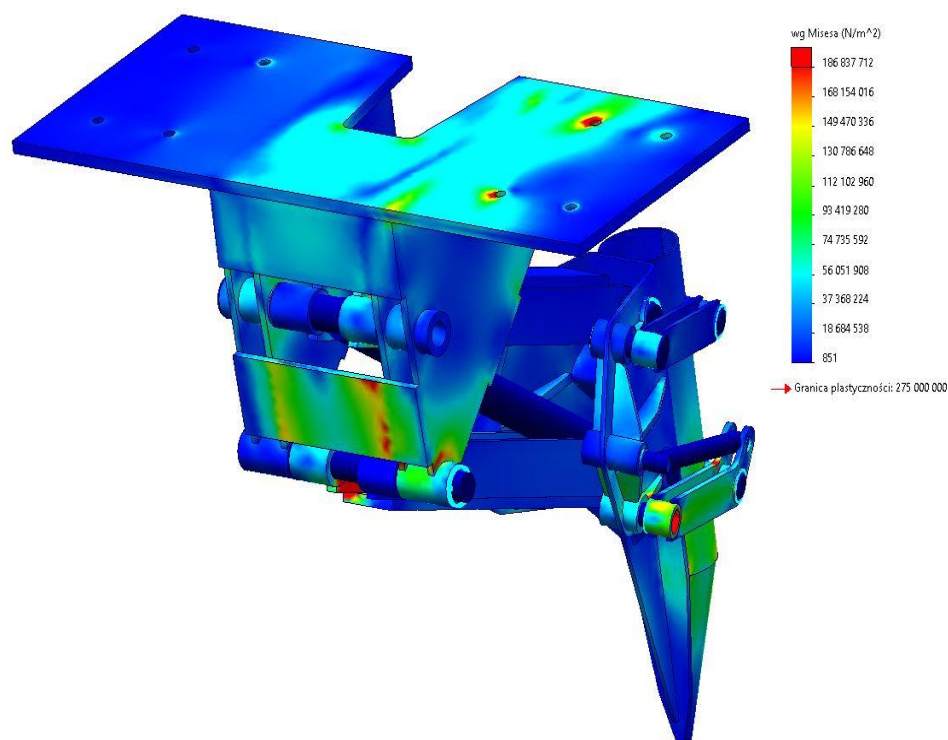
Rys. 5.17. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_4c, widok izometryczny z tyłu [opracowanie własne]



Rys. 5.18. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_5a, widok izometryczny z przodu [opracowanie własne]



Rys. 5.19. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_5b, widok ostrza z przodu [opracowanie własne]



Rys. 5.20. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_5c, widok izometryczny z tyłu [opracowanie własne]

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że dla rozważanych przypadków obliczeniowych naprężenia w konstrukcji zespołu sadzącego nie przekraczają naprężeń określonych w kryteriach oceny konstrukcji. Dla właściwej oceny wytrzymałości zespołu sadzącego, zostały także wykonane badania eksploatacyjne na rzeczywistym obiekcie i dokonana walidacja wyników poprzez pomiar czujnikami tensometrycznymi.

6. PARAMETRY WPLYWAJĄCE NA POPRAWNOŚĆ PROCESU SADZENIA

6.1. Geometria ostrza

Geometria ostrza ma zasadniczy wpływ na płynność zagłębiania narzędzia w ziemi. Im przekrój poprzeczny narzędzia jest mniejszy, tym siła potrzebna do jego zagłębiania jest również mniejsza. Jednocześnie znaczący wpływ na płynność procesu zagłębiania ma kształt końcówki ostrza. I tak charakterystyka ostrza w kształcie stożka cechuje się z pewnością inną płynnością, aniżeli końcówka w kształcie klina. W obu przypadkach znaczenie ma również kąt rozwarcia stożka, bądź klina – im będzie on mniejszy, tym proces zagłębiania będzie przebiegał sprawniej. Niestety kształt końcówki zagłębianej ma duże znaczenie, ponieważ jego zmniejszanie, podobnie jak zmniejszanie przekroju poprzecznego całego narzędzia, powoduje zmniejszenie przestrzeni wewnątrz ostrza. Pozostaje wtedy mniej miejsca dla sadzonki, która będzie miała tendencję do zakleszczania się, szczególnie przy bardziej rozbudowanym systemie gałązek. Dodatkowo, im mniejszy będzie kąt rozwarcia ostrza, to przy potrzebie zachowania oczekiwanej przestrzeni na sadzonkę we wnętrzu ostrza zachodzi konieczność wydłużania narzędzia, co również nie jest oczekiwane, ponieważ przestrzeń pomiędzy pozycją wyjściową, bądź transportową narzędzia, a powierzchnią ziemi (prześwit) jest ograniczona.

W efekcie powyższych spostrzeżeń zachodzi konieczność połączenia wielu parametrów będących najbardziej odpowiednimi dla narzędzia, które jest przedmiotem badań niniejszej pracy. Jedynym skutecznym i pewnym sposobem sprawdzenia poprawności pracy takiego narzędzia jest przeprowadzenie badań w rzeczywistych warunkach jego pracy.

6.2. Parametry pracy

- prędkość zagłębiania kostura

Parametr ten wpływa bezpośrednio na szybkość prowadzenia procesu umieszczania sadzonek w glebie. Im większa prędkość zagłębiania kostura, tym więcej sadzonek zostanie wysadzonych w jednostce czasu. Tym samym rośnie wydajność całego procesu.

Prędkość zagłębiania kostura jest zależna od kilku parametrów. Wpływ na nią ma geometria narzędzia - kształt elementu penetrującego glebę oraz pole przekroju poprzecznego kostura w czasie, kiedy narzędzie zaczyna penetrować glebę. Ponadto znaczenie ma również masa narzędzia sadzącego i całego napędzanego układu, która wpływa bezpośrednio na napęd kostura. Im masa większa, tym większa inercja układu, a więc potrzebna większa siła napędowa.

- prędkość wygłębienia kostura

Parametr ten ma bezpośredni związek z szybkością procesu sadzenia sadzonek, ale również ze zjawiskiem zabierania, unoszenia sadzonki z gleby zaraz po jej pozostawieniu w otworze wykonanym w glebie. Powiązane jest to z tarciem sadzonki o ścianki kostura w chwili, kiedy narzędzie zaczyna być podnoszone i wygłębiane z ziemi, a bryłka korzeniowa sadzonki nie została w pełni uchwycona i dognieciona kołami dociskowymi. Wolniejsze unoszenie narzędzia z gleby po wysadzeniu sadzonki powoduje mniejsze prawdopodobieństwo zahaczenia sadzonki o powierzchnię wewnętrzną ostrza i wyciągnięcie jej z gleby w czasie ruchu powrotnego narzędzia wysadzającego.

- ciśnienie w układzie hydraulicznym podczas zagłębiania kostura

Parametr ten jest ściśle związany z geometrią kostura wysadzającego sadzonki. Kształt elementu czołowego, który penetruje glebę, a także pole powierzchni przekroju poprzecznego rury kostura wpływają bezpośrednio na siłę potrzebną do zagłębiania kostura. Im większe pole powierzchni przekroju kostura, tym większa siła zagłębiająca jest wymagana, a co za tym idzie -

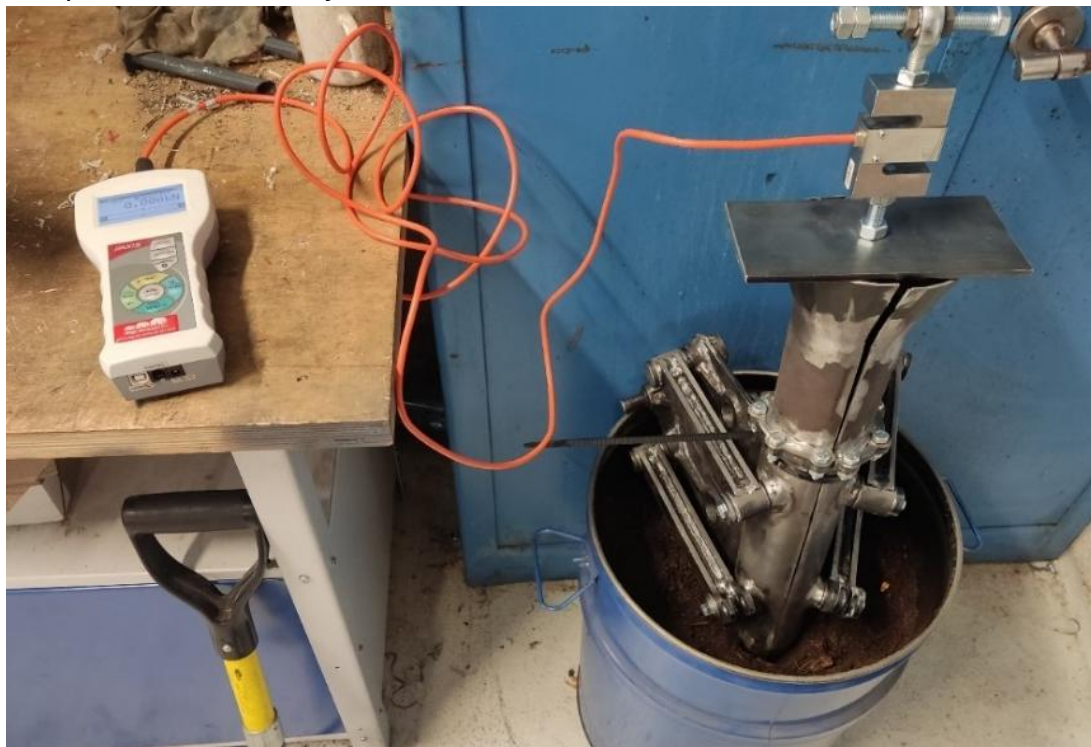
większe ciśnienie w układzie hydraulicznym. Istotne jednak jest to, że pole powierzchni przekroju poprzecznego nie może być minimalizowane z uwagi na większe prawdopodobieństwa zacinania się sadzonki w rurze wylotowej kostura. Im większe ciśnienie w układzie hydraulicznym z tym większą siłą narzędzie jest wbijane w ziemię oraz tym bardziej obciążone są elementy w układzie mechanicznym narzędzia.

7. BADANIA LABORATORYJNE I POLOWE

7.1. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne zostały przygotowane i przeprowadzone zgodnie z opisaną w rozdziale 4. metodyką badawczą. We wspomnianym rozdziale przedstawiono dokładny opis wykonywania poszczególnych kroków. Na rysunkach poniżej przedstawiono widok stanowiska badawczego oraz sposób dokonywania pomiaru.

Czujnik siły podłączony był do miernika dokonującego pomiaru wartości siły zagłębienia narzędzia przedstawiono na Rys. 7.1.



Rys. 7.1. Stanowisko pomiarowe; narzędzie sadzące zagłębione w zbiorniku wraz z zestawem pomiarowym [opracowanie własne]

Zarówno podczas przygotowania do badań, jak i podczas ich prowadzenia kontrolowano, ustawienie narzędzia, by było ono zagłębiane pionowo (Rys. 7.2). Jest to istotny czynnik z punktu widzenia pomiaru zagłębienia, ponieważ tylko podczas pionowego prowadzenia ostrza w glebie można dokonać rzeczywistego pomiaru celem dalszego porównania z osiągniętymi wynikami dla drugiej wersji ostrza.



Rys. 7.2. Wypoziomowana płyta dociskowa przyłożona do kołnierza narzędzia sadzącego [opracowanie własne]

W momencie osiągnięcia określonej wartości siły dokonywano pomiaru głębokości zagłębienia narzędzia (Rys. 7.3). Pomiaru tego dokonywano przez zmierzenie odległości między płytką ustawioną poziomo, a krawędzią zbiornika z ziemią.



Rys. 7.3. Dokonywanie pomiaru zagłębienia narzędzia sadzącego po zagłębieniu zadaną wartością siły [opracowanie własne]

7.2. Badania polowe w warunkach rzeczywistych

Badania zostały przygotowane i przeprowadzone zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 4. Wykonano przejazd zamontowaną na narzędziu pierwszą wersją ostrza, celem wykonania pomiarów parametrów istotnych do oceny i analizy jakości pracy narzędzia. Wykonano dwa przejazdy z narzędziem wyposażonym w ostrze klinowe oraz dwa przejazdy z narzędziem wyposażonym w ostrze stożkowe. Podczas pierwszego przejazdu obu wersji narzędzia skupiono się na obserwacji pracy narzędzi i jednocześnie rejestracji istotnych parametrów. Prowadzono następujące pomiary:

- ciśnienia w układzie hydraulicznym w obwodzie zasilającym siłownik zagłębiania narzędzia,
- osiągniętej głębokości narzędzia w gruncie,
- siły oporu gruntu podczas procesu zagłębiania narzędzia.

Podczas drugich przejazdów do narzędzia (kostura) podawane były sadzonki. Podawano je ręcznie. W czasie tych przejazdów również rejestrowano wspomniane wcześniej parametry.

Schemat postępowania w czasie prowadzenia testu był następujący:

- spulchnienie gleby na głębokości 15 cm i na długości 25 m przed każdym z przejazdów badawczych;
- przejazd z pierwszą/drugą wersją ostrza, sadzenie/brak sadzenia:
 - narzędzie znajduje się w pozycji zamkniętej górnej,
 - wrzucenie sadzonki do rury wlotowej narzędzia,
 - zagłębienie narzędzia w ziemi,
 - otwarcie narzędzia,
 - podniesienie narzędzia,
 - ruszenie do przodu,
 - zamknięcie narzędzia,
 - powtórzenie cyklu.

Podczas wykonywania przejazdów dokonywano rejestracji:

- ciśnienia oleju hydraulicznego w układzie podczas zagłębiania siłownika,
- sił pionowych z czujników ramy pomiarowej,
- długości wysunięcia linki z czujnika.

Ponadto dokonywano obserwacji zachowania sadzonki w momencie przemieszczania się przez wnętrze narzędzia, osiadania w glebie po wysadzeniu oraz w momencie wygłębiania narzędzia z gleby. Była to obserwacja wzrokowa prowadzona na bieżąco, podczas której dokonywano subiektywnej oceny, w jaki sposób sadzonka przemieszcza się przez wnętrze narzędzia – czy występuje znaczące tarcie sadzonki o ścianki wewnętrzne narzędzia oraz występuje tendencja do blokowania sadzonki we wnętrzu narzędzia. Ponadto obserwowano zachowanie sadzonki podczas jej osadzania w glebie, dogniatania i następnie w trakcie podnoszenia narzędzia. W tym aspekcie istotne było, by sadzonka posadzona była w glebie w pozycji jak najbliższej pionu, dognieciona oraz nie występowało zjawisko podnoszenia sadzonki w chwili podnoszenia narzędzia z gruntu.

Na rysunkach (Rys. 7.4 ÷ Rys. 7.33) przedstawiono układ pomiarowy zamontowany na ciągniku wraz z narzędziem sadzącym wyposażonym w ostrze klinowe oraz stożkowe podczas realizacji kolejnych etapów doświadczenia polowego.



Rys. 7.4. Narzędzie z ostrzem klinowym zamocowane na ramie pośredniej wraz z obciążnikami [opracowanie własne]



Rys. 7.5. Narzędzie z ostrzem klinowym zagłębione w glebie podczas otwierania szczęk [opracowanie własne]



Rys. 7.6. Narzędzie z ostrzem klinowym zagłębione w glebie z zamkniętymi szczękami
[opracowanie własne]



Rys. 7.7. Narzędzie z ostrzem stożkowym zagłębione w glebie podczas otwierania szczęk
[opracowanie własne]



Rys. 7.8. Narzędzie z ostrzem klinowym podczas zagłębiania, widok od lewej strony
[opracowanie własne]



Rys. 7.9. Narzędzie z ostrzem stożkowym podczas zagłębiania, widok od prawej strony
[opracowanie własne]



Rys. 7.10. Narzędzie z ostrzem stożkowym zagłębione w gruncie z zamkniętymi szczękami
[opracowanie własne]



Rys. 7.11. Narzędzie z ostrzem stożkowym w momencie otwierania szczęk i wysadzania sadzonki sosnowej, widok od frontu [opracowanie własne]



Rys. 7.12. Narzędzie z ostrzem stożkowym w momencie otwierania szczęk i wysadzania sadzonki sosnowej, widok od prawej strony [opracowanie własne]



Rys. 7.13. Sadzonka sosnowa po wysadzeniu narzędziem z ostrzem klinowym [opracowanie własne]



Rys. 7.14. Narzędzie z ostrzem klinowym w momencie pełnego zagłębienia [opracowanie własne]



Rys. 7.15. Narzędzie z ostrzem klinowym w momencie otwierania szczęk i wysadzania sadzonki sosnowej [opracowanie własne]



Rys. 7.16. Narzędzie sadzące zamontowane na ramie pośredniej wraz z kołami dociskowymi [opracowanie własne]



Rys. 7.17. Narzędzie sadzące zamontowane na ramie pośredniej wraz z kołami dociskowymi, widok z profilu [opracowanie własne]



Rys. 7.18. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym zagłębione w glebie [opracowanie własne]



Rys. 7.19. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym zagłębione w glebie, widok z profilu [opracowanie własne]



Rys. 7.20. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym zagłębione w glebie, widok z profilu z sadzonką sosnową wewnątrz narzędzia [opracowanie własne]



Rys. 7.21. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym zagłębione w glebie, widok z góry z sadzonką sosnową wewnątrz narzędzia [opracowanie własne]



Rys. 7.22. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym z otwartymi szczękami [opracowanie własne]



Rys. 7.23. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym, z otwartymi szczękami, widok z profilu z sadzonką sosnową wewnątrz narzędzia [opracowanie własne]



Rys. 7.24. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym z otwartymi szczękami zaraz po wysadzeniu sadzonki w ziemi i dognieceniu kołami dociskowymi [opracowanie własne]



Rys. 7.25. Sadzonka sosnowa zaraz po wysadzeniu narzędziem z ostrzem stożkowym i dognieceniu kołami dociskowymi [opracowanie własne]



Rys. 7.26. Narzędzie z ostrzem klinowym zamontowane na ramie pośredniej [opracowanie własne]



Rys. 7.27. Narzędzie z ostrzem klinowym zagłębione w ziemi wraz z sadzonką sosnową umieszczoną wewnątrz [opracowanie własne]



Rys. 7.28. Narzędzie z ostrzem klinowym zagłębione w glebie wraz z sadzonką sosnową umieszczoną wewnątrz, widok z boku [opracowanie własne]



Rys. 7.29. Narzędzie z ostrzem klinowym z otwartymi szczękami w momencie wysadzania sadzonki sosnowej w ziemi [opracowanie własne]



Rys. 7.30. Sadzonka sosnowa po wysadzeniu w glebie narzędziem wyposażonym w ostrze klinowe i dognieciona kołami dociskowymi [opracowanie własne]



Rys. 7.31. Sadzonka sosnowa po wysadzeniu w ziemi narzędziem wyposażonym w ostrze klinowe i dognieciona kołami dociskowymi, widok z góry [opracowanie własne]



Rys. 7.32. Sadzonki sosnowe osadzone w ziemi w szyku z użyciem narzędzia wyposażonego w ostrze klinowe [opracowanie własne]



Rys. 7.33. Sadzonka sosnowa w momencie otwierania szczęk narzędzia z ostrzem klinowym [opracowanie własne]

8. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA

8.1. Badania laboratoryjne

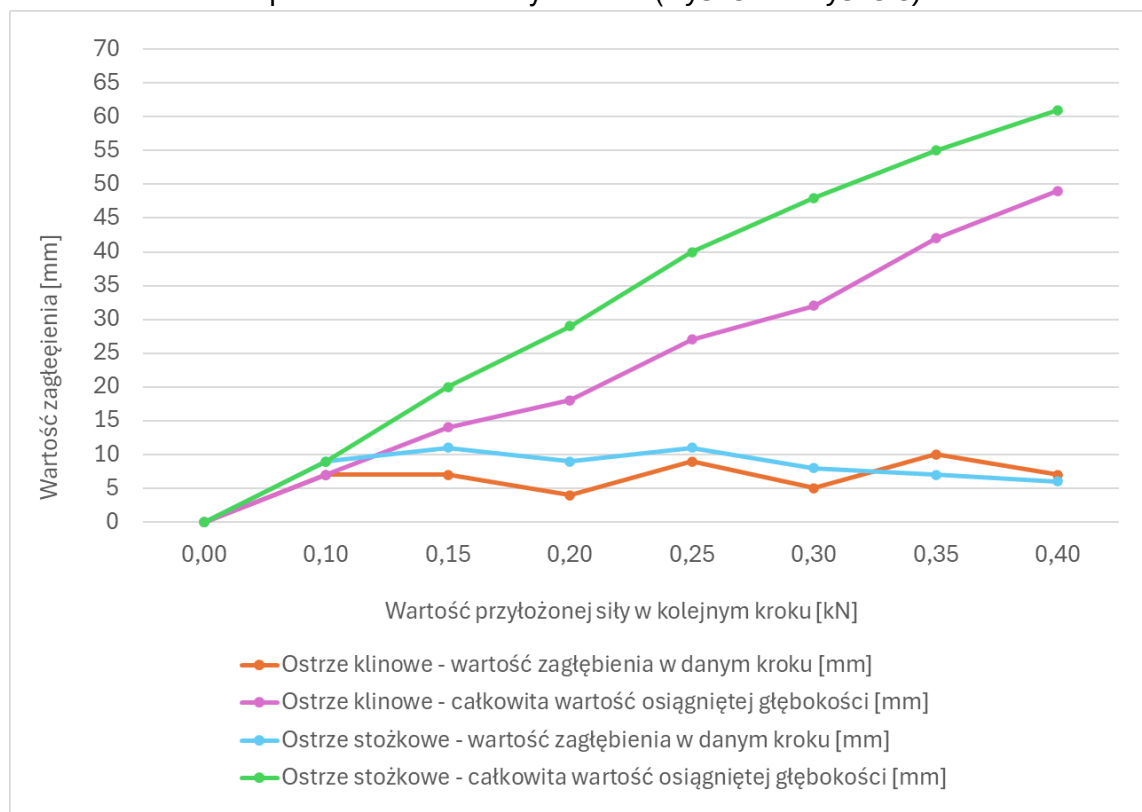
Wyniki zebrane podczas prowadzenia badań laboratoryjnych przedstawiono w Tabeli 8.1. Podane wartości uwzględniają różnicę wysokości konstrukcyjnych obu wersji ostrza. Podana wartość zagłębienia w danym etapie badań (kolumny 4 oraz 7), całkowita wartość osiągniętej głębokości (kolumny 5 oraz 8) odnoszą się do wartości bezwzględnych. W kolumnach 3 oraz 6 podano wysokość płytki przymocowanej do czujnika nad krawędzią pojemnika z ziemią. Kolumna 2 z kolei zawiera wartości przyłożonej siły.

Tabela 8.1. Wyniki testów zagłębiania obydwoma typami ostrzy dla zmiennych wartości siły nacisku tłoka siłownika opuszczania zespołu sadzącego

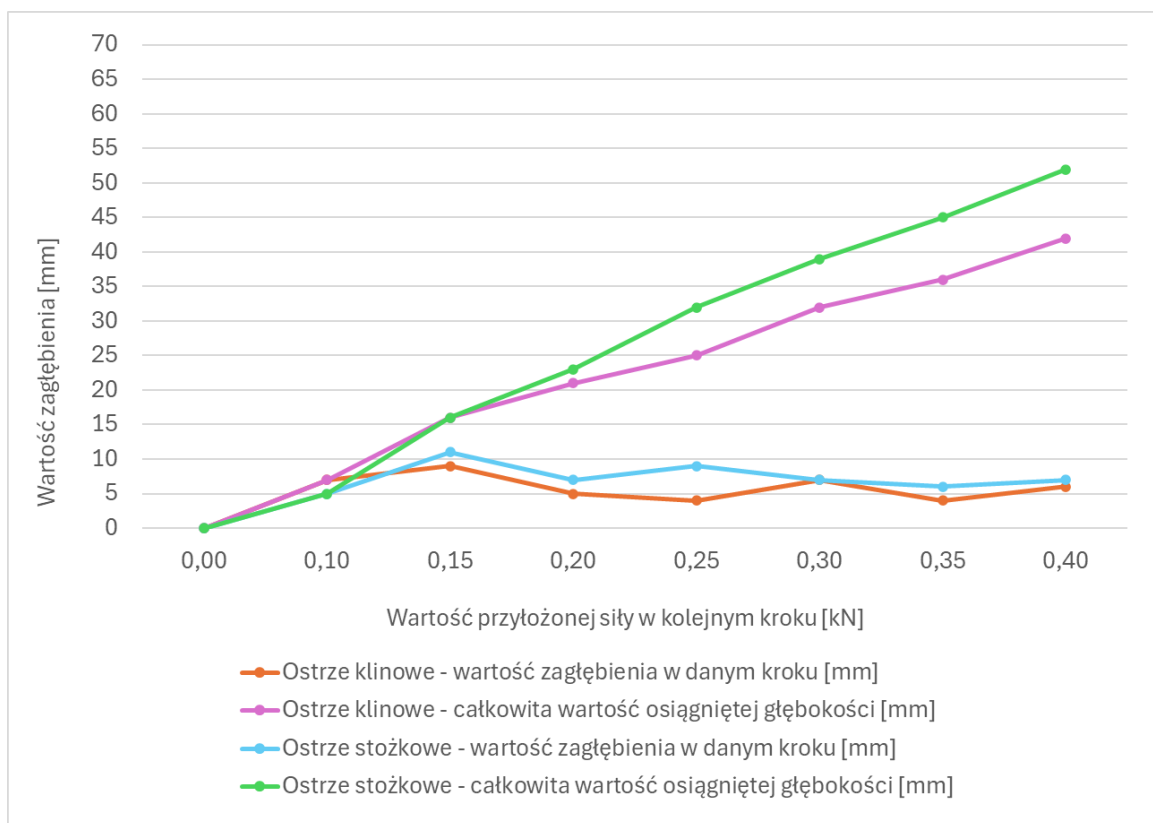
	Przyłożona siła nacisku [kN]	Wysokość płytki przymocowanej do czujnika od górnej krawędzi pojemnika [mm]	Wartość zagłębienia w danym kroku [mm]	Całkowita wartość osiągniętej głębokości [mm]	Wysokość płytki przymocowanej do czujnika od górnej krawędzi pojemnika [mm]	Wartość zagłębienia w danym kroku [mm]	Całkowita wartość osiągniętej głębokości [mm]
		ostrze klinowe			ostrze stożkowe		
1	2	3	4	5	6	7	8
próba 1	0,00	483	0	0	364	0	0
	0,10	476	7	7	355	9	9
	0,15	469	7	14	344	11	20
	0,20	465	4	18	335	9	29
	0,25	456	9	27	324	11	40
	0,30	451	5	32	316	8	48
	0,35	441	10	42	309	7	55
	0,40	434	7	49	303	6	61
próba 2	0,00	475	0	0	359	0	0
	0,10	468	7	7	354	5	5
	0,15	459	9	16	343	11	16
	0,20	454	5	21	336	7	23
	0,25	450	4	25	327	9	32
	0,30	443	7	32	320	7	39
	0,35	439	4	36	314	6	45
	0,40	433	6	42	307	7	52
próba 3	0,00	473	0	0	367	0	0
	0,10	466	7	7	361	6	6
	0,15	459	7	14	356	5	11
	0,20	454	5	19	348	8	19
	0,25	449	5	24	340	8	27
	0,30	443	6	30	336	4	31
	0,35	438	5	35	329	7	38
	0,40	432	6	41	322	7	45

Analizując zebrane dane, można zauważyć, że w niemal każdym kolejnym kroku narzędzie w wersji stożkowej przy danej sile, penetrowało głębiej, niż narzędzie w wersji klinowej. Całkowita głębokość osiągnięta przez narzędzie z ostrzem klinowym przy przyłożonej sile 40 kN wynosiła odpowiednio 49, 42 i 41 mm dla pierwszego, drugiego i trzeciego testu. Dla ostrza stożkowego wynosiła ona odpowiednio 61, 52 i 45 mm.

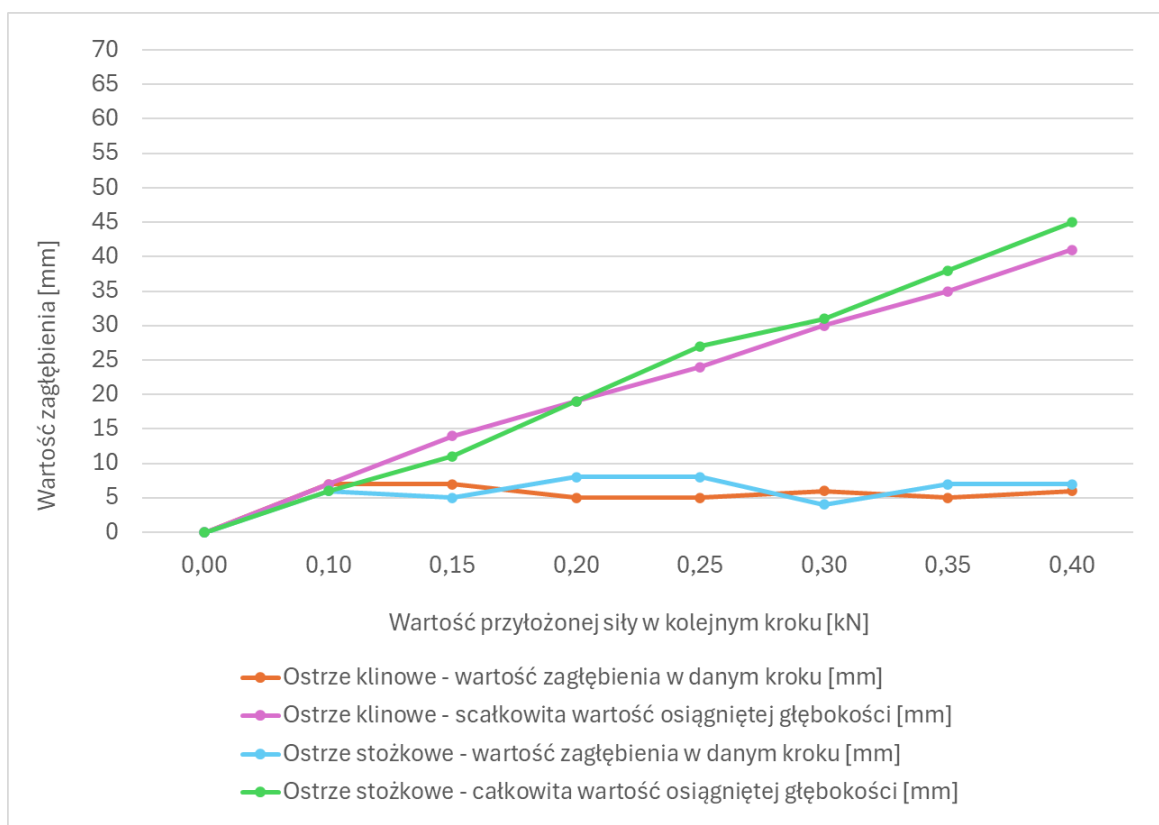
Zebrane wartości przedstawiono na wykresach (Rys. 8.1 ÷ Rys. 8.3).



Rys. 8.1. Wartość zagłębienia narzędzia z ostrzem klinowym oraz stożkowym; pojedyncze kroki oraz wartości skumulowane – próba pierwsza [opracowanie własne]



Rys. 8.2. Wartość zagłębienia narzędzia z ostrzem klinowym oraz stożkowym; pojedyncze kroki oraz wartości skumulowane – próba druga [opracowanie własne]

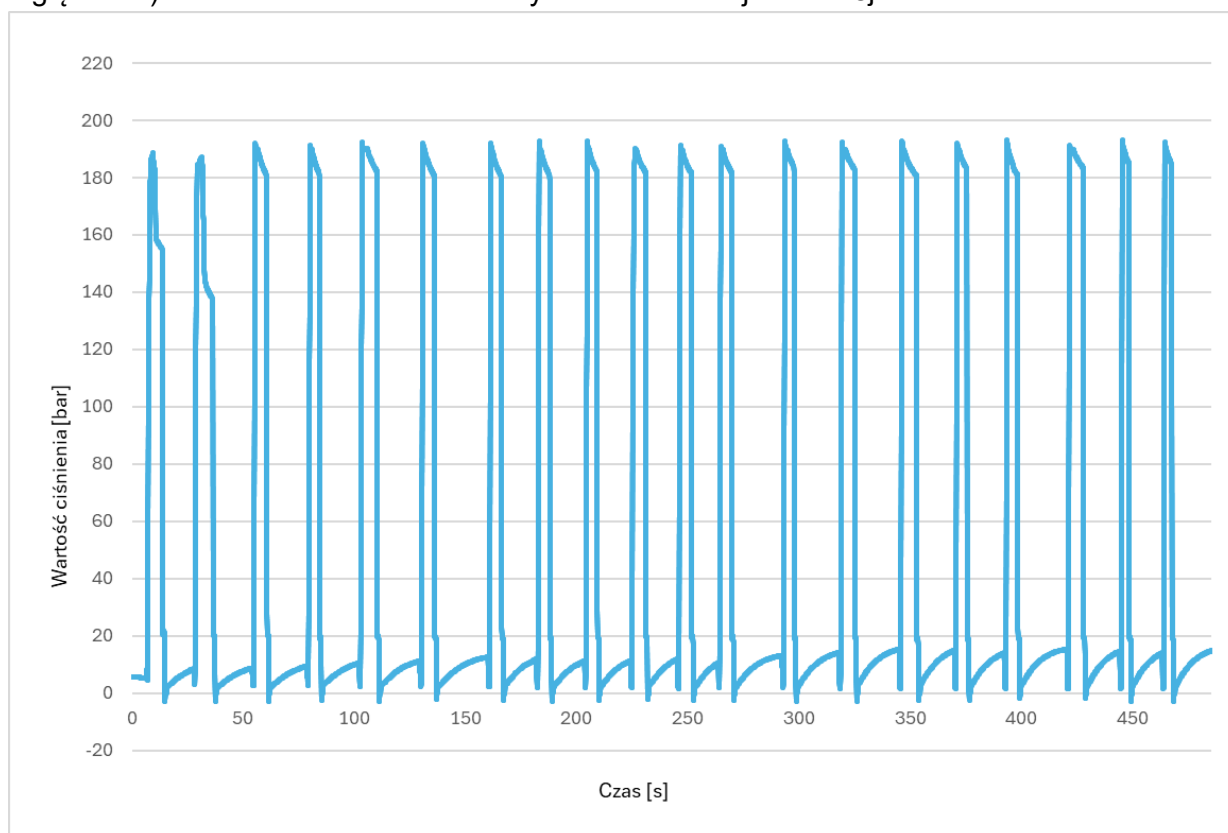


Rys. 8.3. Wartość zagłębienia narzędzia z ostrzem klinowym oraz stożkowym; pojedyncze kroki oraz wartości skumulowane – próba trzecia [opracowanie własne]

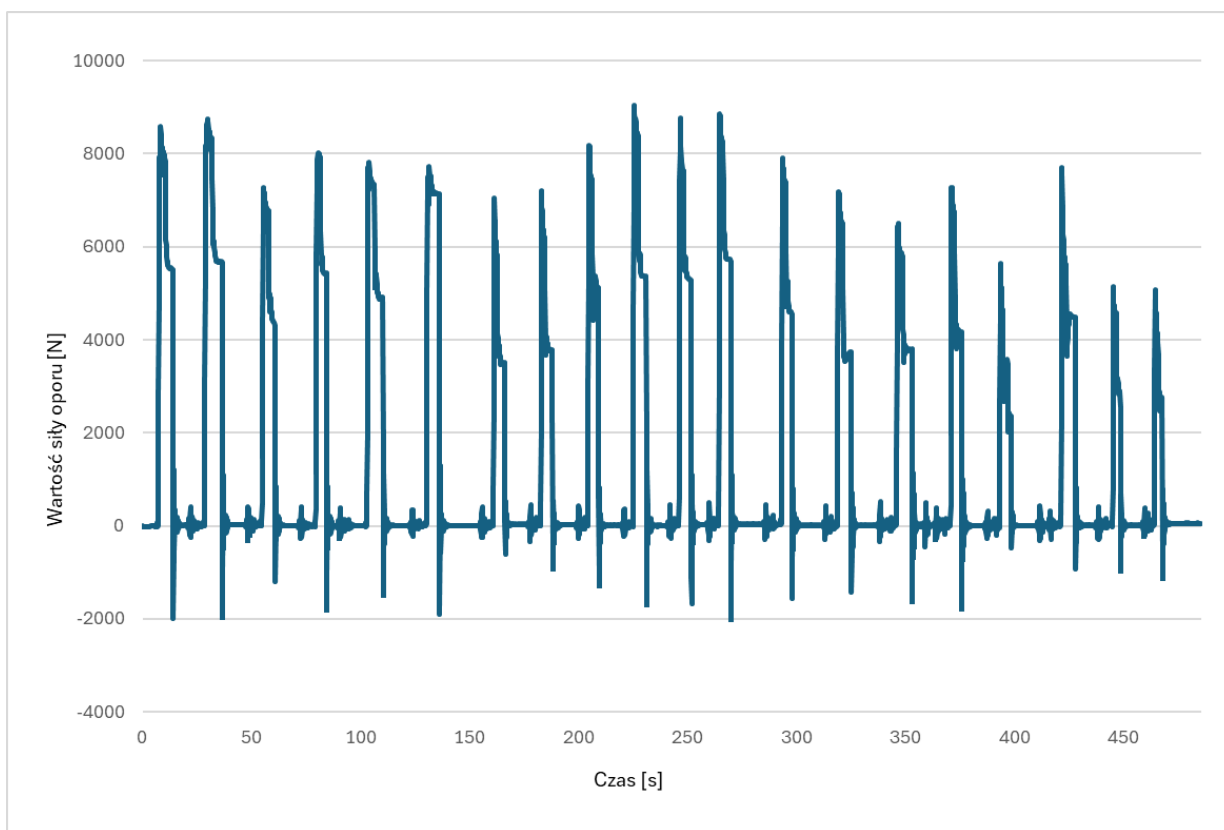
Przeprowadzone testy pozwoliły zaobserwować nieco odmienne charakterystyki penetracji obu wersji narzędzia do sadzenia. Widoczną tendencję można zaobserwować w przypadku linii na wykresie, która odzwierciedla całkowitą głębokość osiągniętą przez narzędzie. W całym zakresie testu, tj. od przyłożenia siły 0,1 kN do 0,4 kN, narzędzie z ostrzem stożkowym było skuteczniejsze. Narzędzie wyposażone w ostrze klinowe osiągnęło głębokość od 41 do 49 mm (w zależności od kolejnego testu penetracji) przy obciążeniu 0,4 kN. Narzędzie wyposażone w ostrze stożkowe osiągnęło głębokość od 45 do 61 mm przy podobnym obciążeniu (również w zależności od kolejnego testu). Dla zwiększenia czytelności wykresów zachowano tę samą skalę na osi pionowej reprezentującej wartość zagłębienia oraz ten sam kolor linii wykresu reprezentującej daną wartość.

8.2. Badania polowe

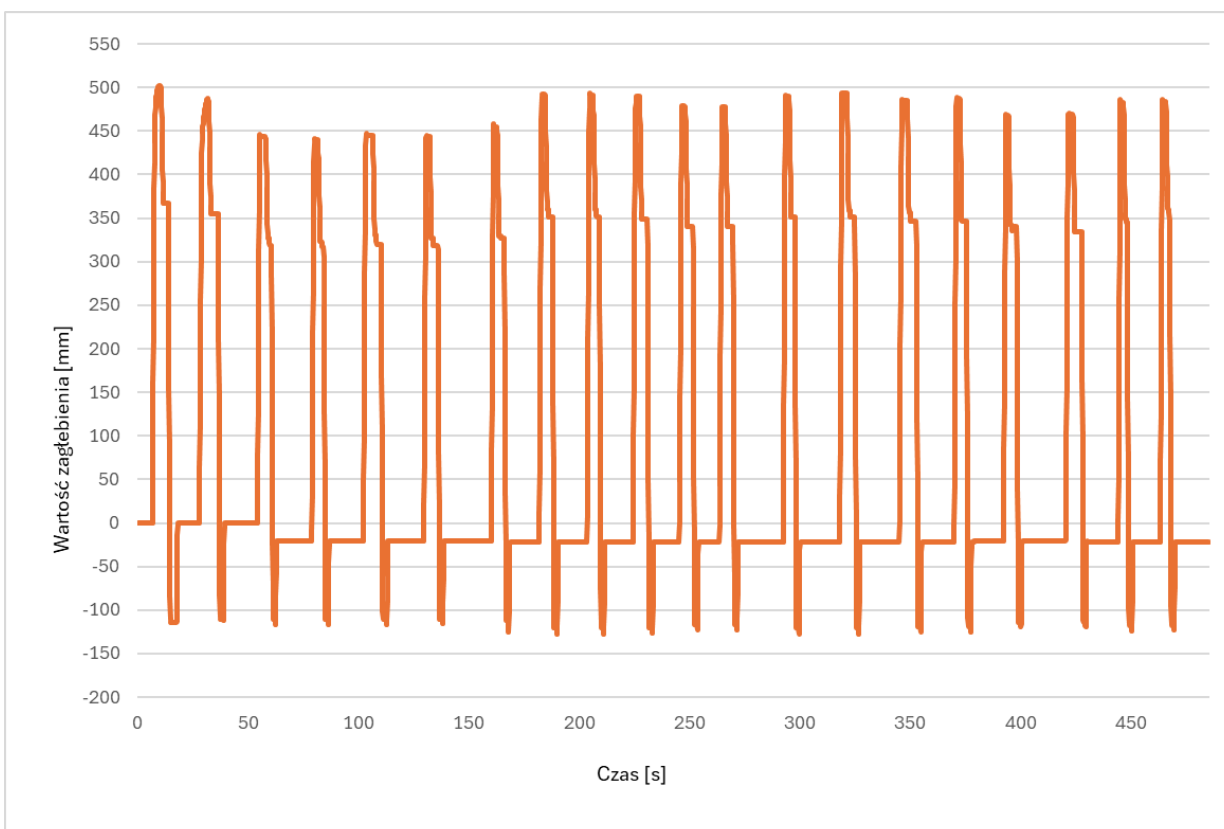
Otrzymane wyniki wykonanych badań przedstawiono na kolejnych przykładowych wykresach. Zaprezentowano rozkład ciśnienia w układzie hydraulicznym podczas pracy, osiągniętą wartość siły pochodzącej od oporu gleby oraz głębokość, na jaką obniżone zostało narzędzie podczas zagłębienia z najwyższego punktu (Rys. 8.4 ÷ Rys. 8.15). W tym przypadku, jak przy prezentacji danych z badań laboratoryjnych – zastosowano tę samą skalę osi pionowej dla przedstawienia danej zmiennej (wartość ciśnienia, wartość oporu gleby oraz wartość zagłębienia) oraz ten sam kolor linii na wykresie dla danej zmiennej.



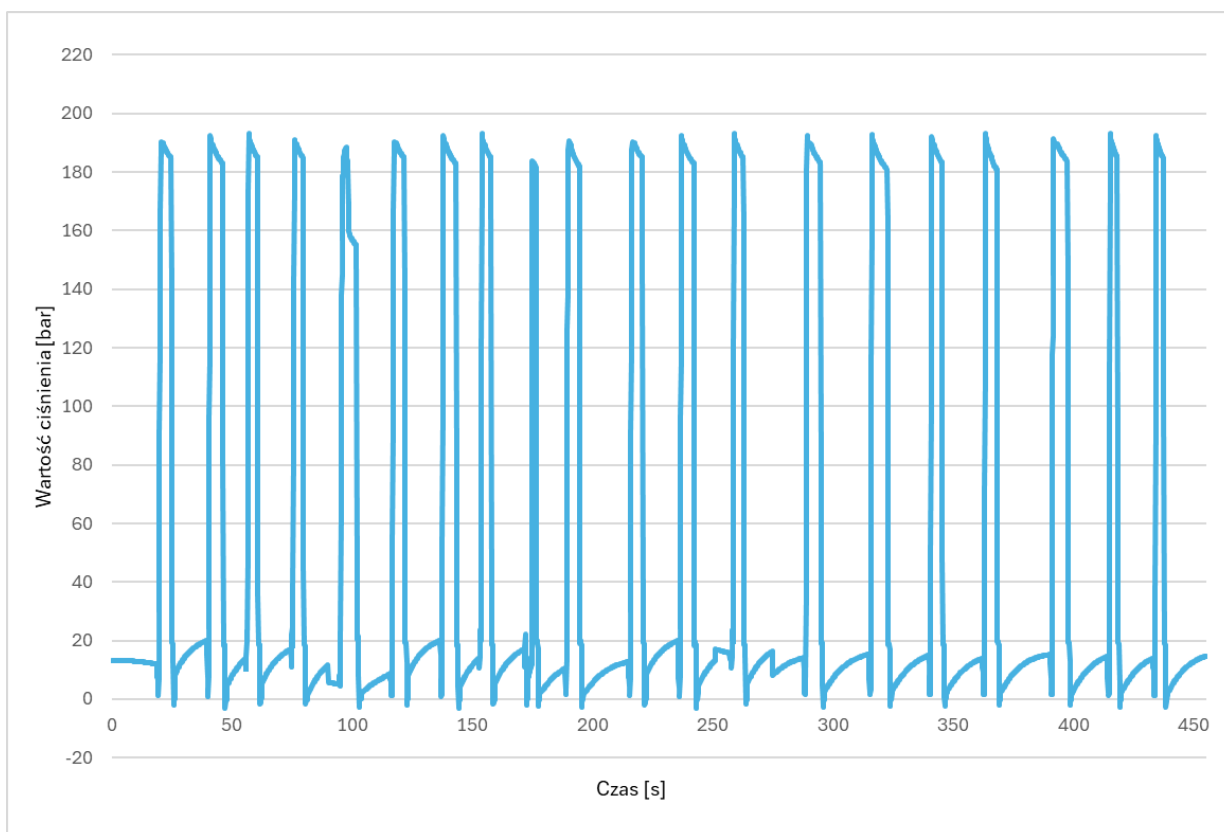
Rys. 8.4. Wartość ciśnienia w układzie hydraulicznym podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne]



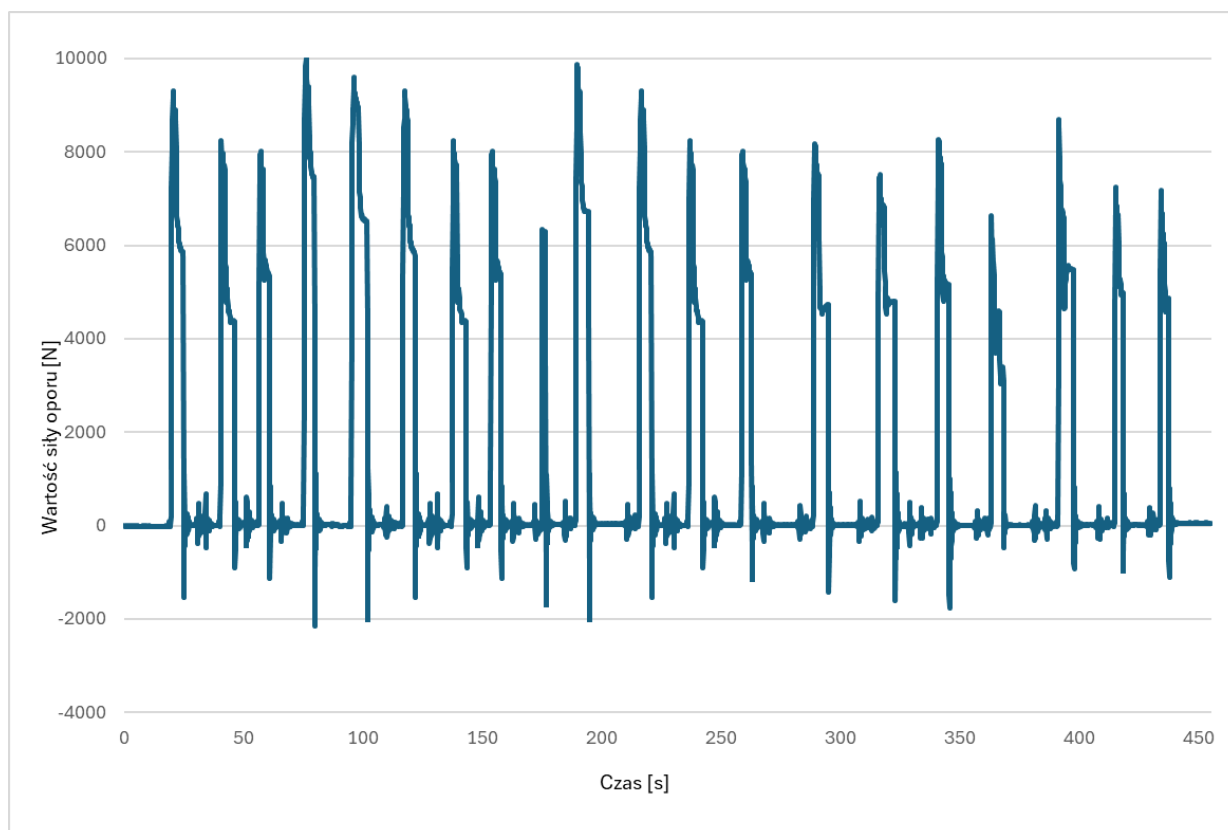
Rys. 8.5. Wartość siły pochodzącej od oporu gleby podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne]



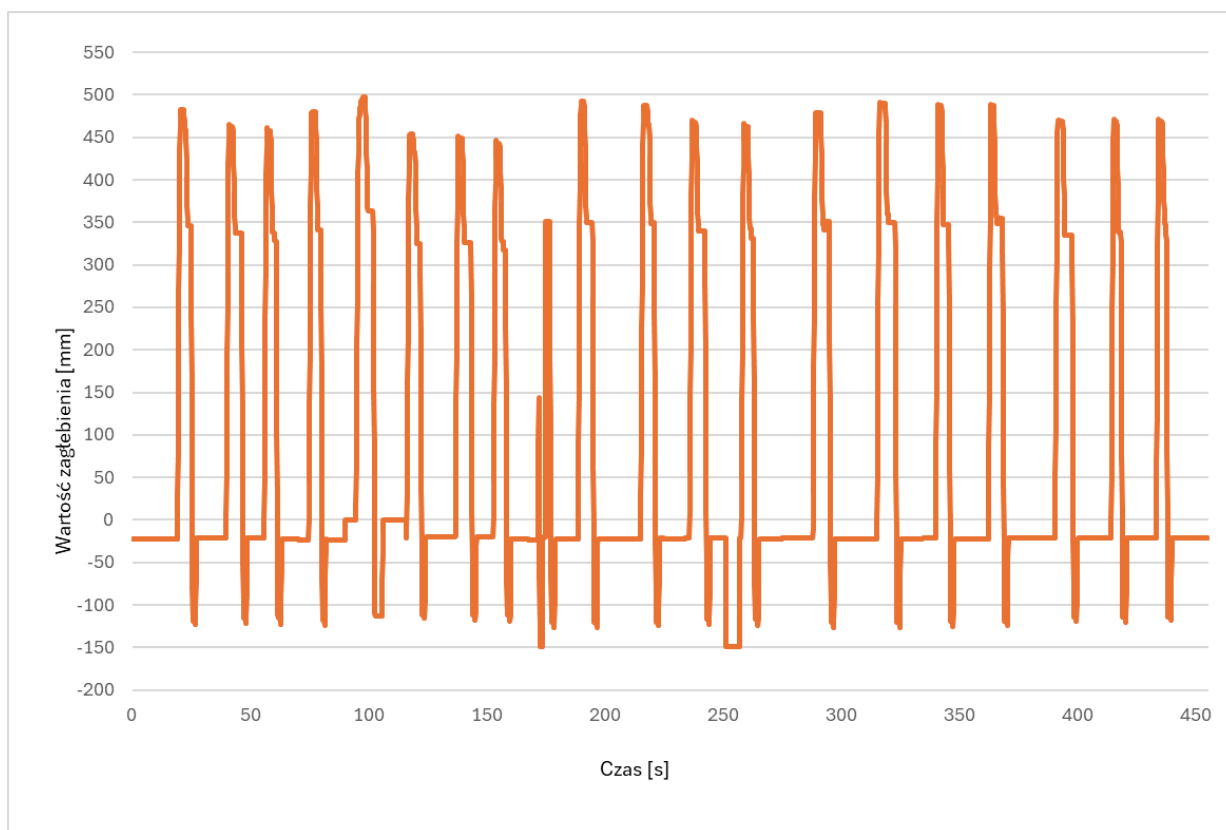
Rys. 8.6. Wartość osiągniętej głębokości względnej podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne]



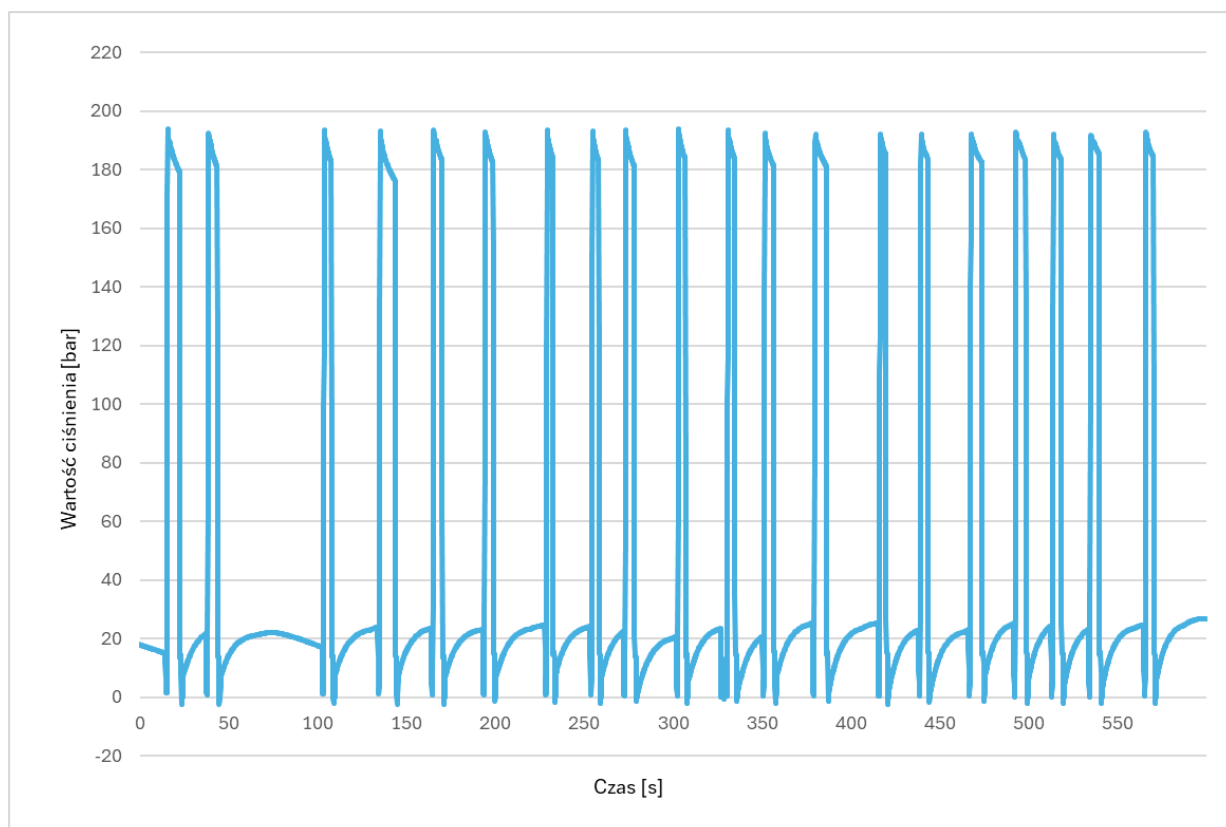
Rys. 8.7. Wartość ciśnienia w układzie hydraulicznym podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne]



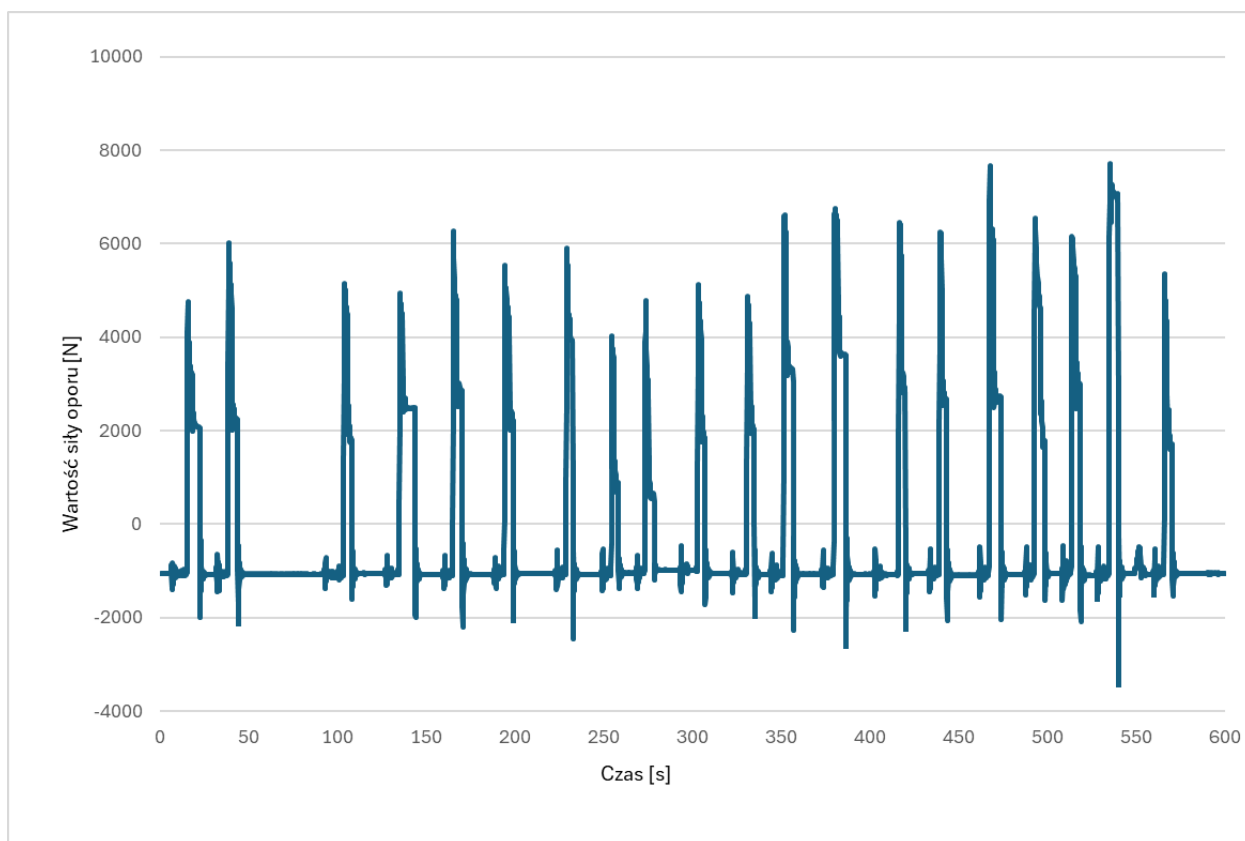
Rys. 8.8. Wartość siły pochodzącej od oporu gleby podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne]



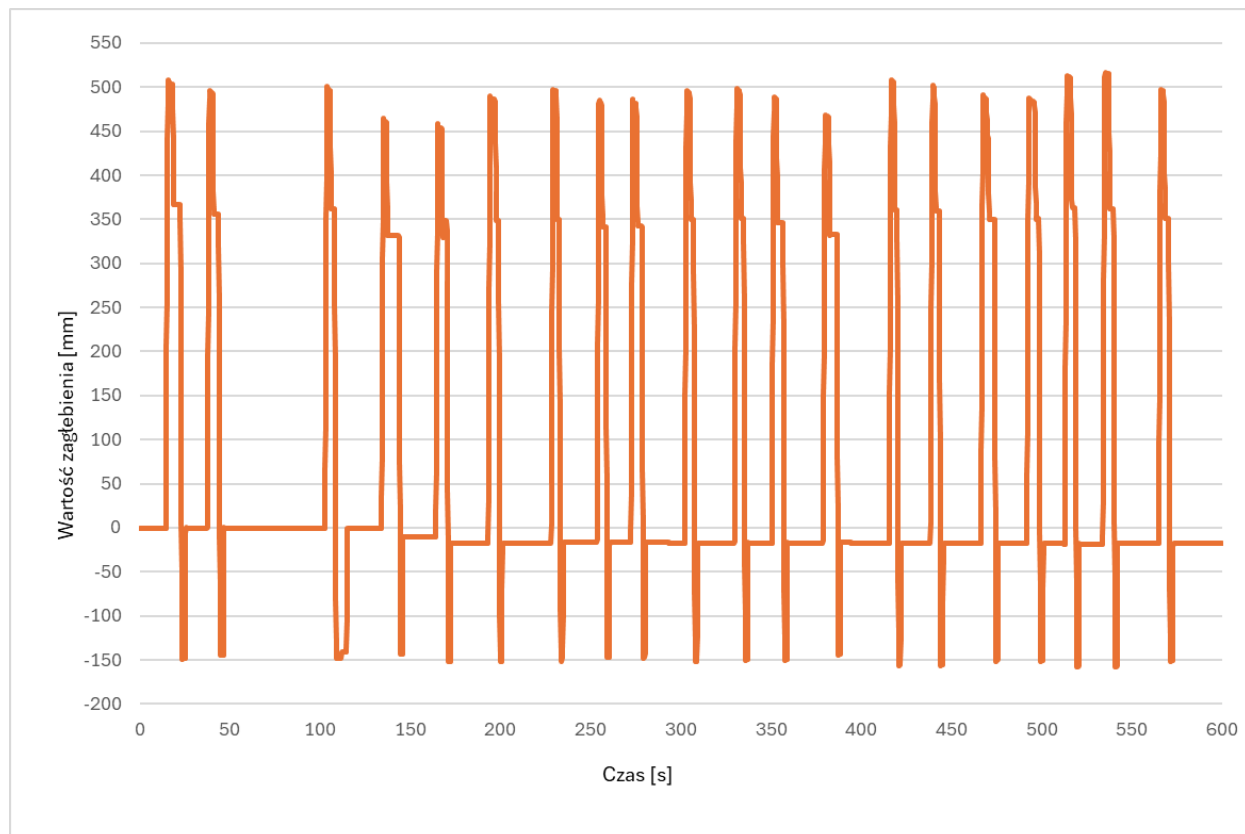
Rys. 8.9. Wartość osiągniętej głębokości względnej podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne]



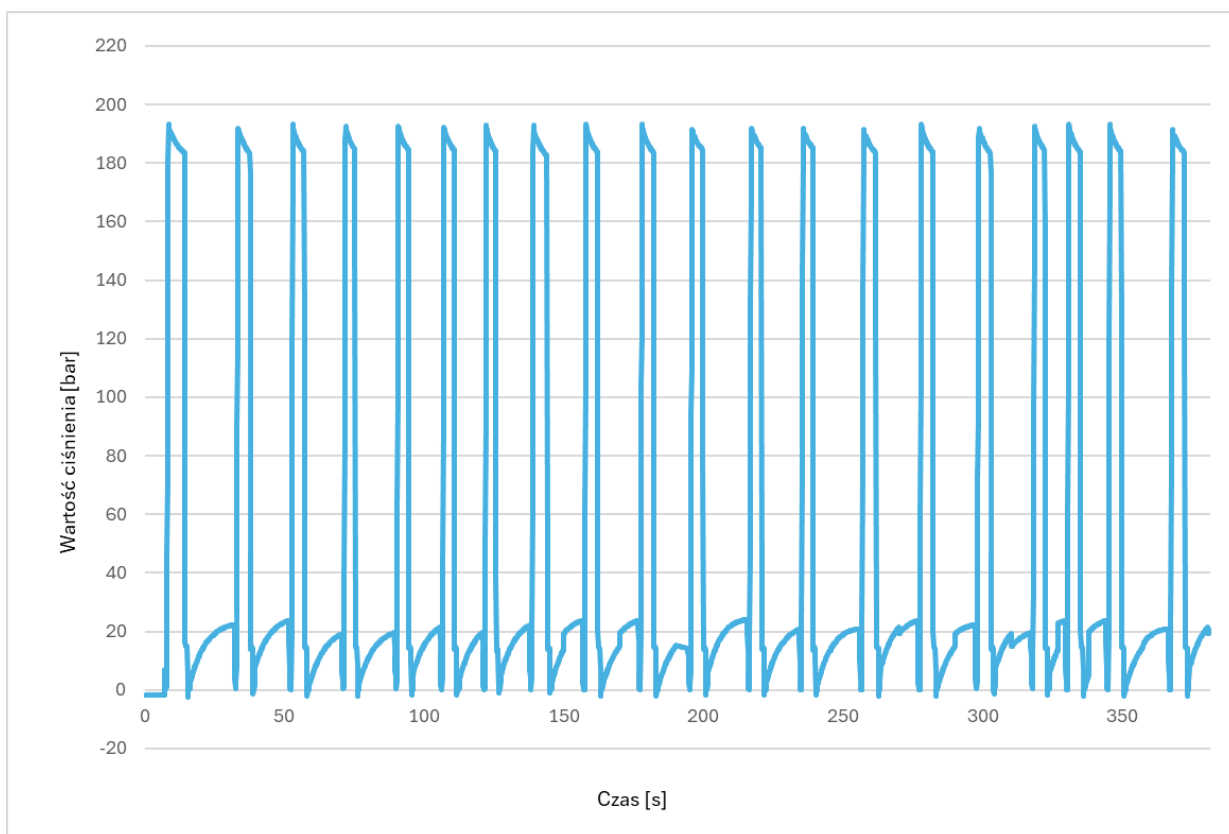
Rys. 8.10. Wartość ciśnienia w układzie hydraulicznym podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne]



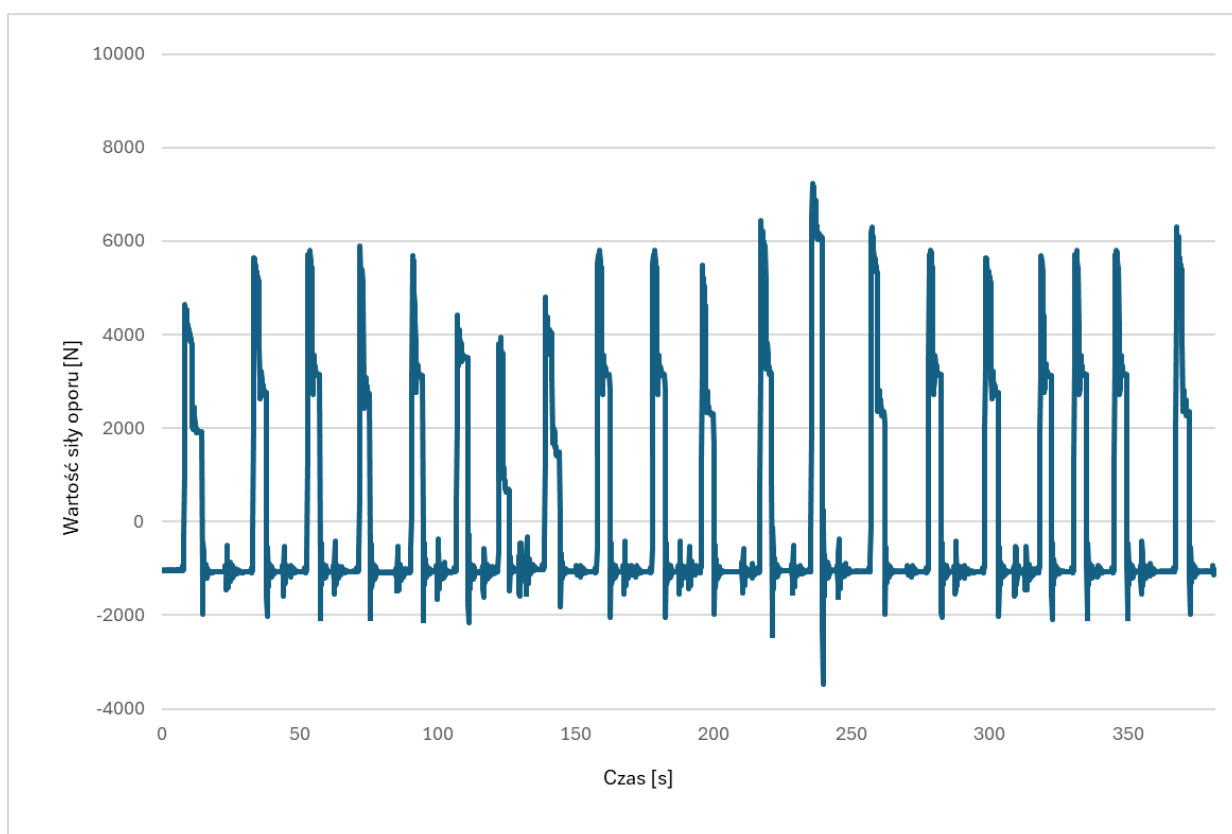
Rys. 8.11. Wartość siły pochodzącej od oporu gleby podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne]



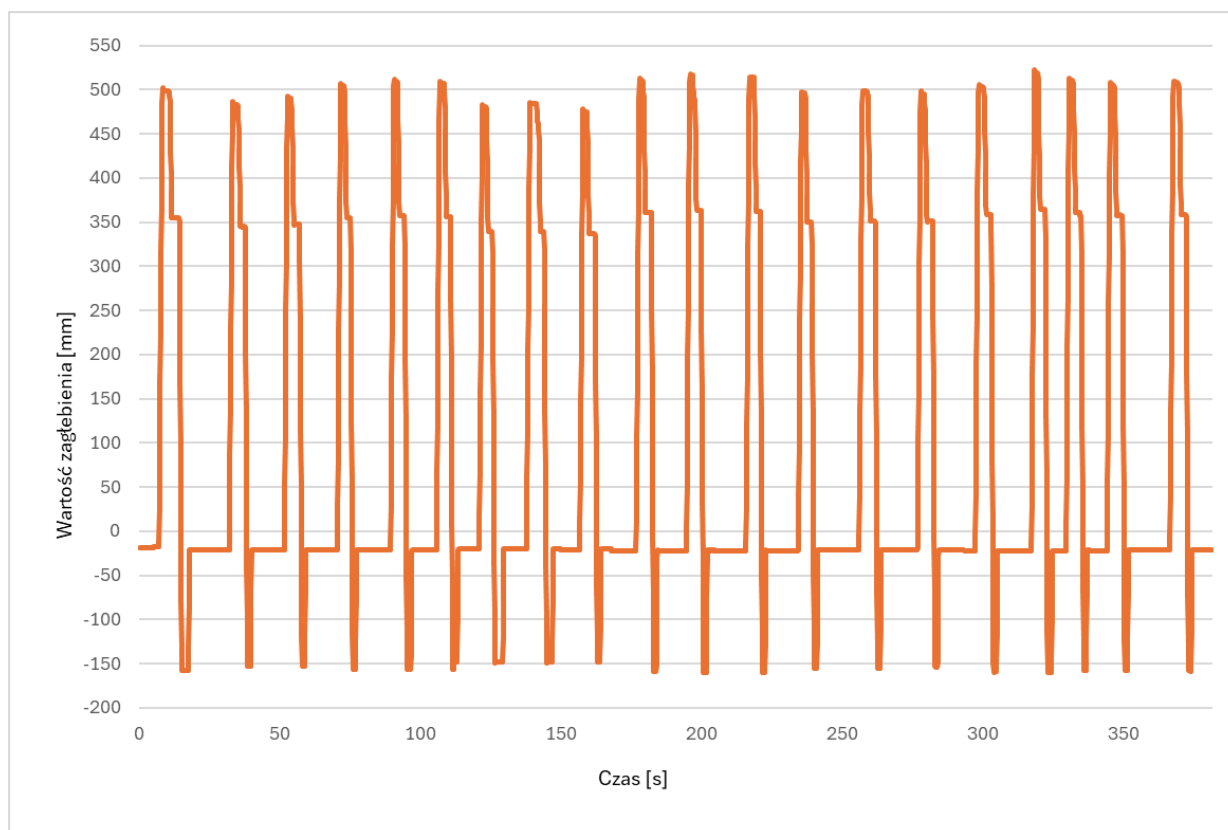
Rys. 8.12. Wartość osiągniętej głębokości względnej podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne]



Rys. 8.13. Wartość ciśnienia w układzie hydraulicznym podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne]



Rys. 8.14. Wartość siły pochodzącej od oporu gleby podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne]



Rys. 8.15. Wartość osiągniętej głębokości względnej podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne]

Z otrzymanych wykresów osiągniętej głębokości pracy narzędzia odczytać można, iż całkowite obniżenie narzędzia względem punktu początkowego praktycznie dla każdej próby zagłębienia mieści się w przedziale 450 - 510 mm. Nadmienić tutaj należy, iż wartość efektywnego zagłębienia w glebie jest nieco mniejsza, ponieważ mierzone wartości obniżania narzędzia do momentu zetknięcia się z glebą zawierają długość drogi do pokonania od poziomu zawieszania w górnym punkcie, aż do momentu, w którym narzędzie zetknie się z powierzchnią gleby.

Jeżeli chodzi o przebieg zmian wartości ciśnienia w układzie to zauważyć można, iż każdy krok zagłębienia narzędzia, niezależnie od tego, w którą wersję ostrza było ono wyposażone, powiązany jest z osiąganiem tej samej wartości ciśnienia. Oznacza to, że podczas prowadzenia badań, przy każdym zagłębieniu osiągane było maksymalne ciśnienie w układzie na poziomie 185 barów. Na taką wartość ustawiony był zawór przelewowy, który nie dopuszczał do zwiększania wartości poziomu ciśnienia w układzie.

Z kolei analizując wykresy reprezentujące przebiegi zmian wartości siły pochodzącej od oporu gleby dla każdego z czterech przejazdów zauważyć można, że narzędzie wyposażone w ostrze stożkowe generowało wyraźnie mniejsze wartości. Różnice dochodziły do 5500 N w przypadku czwartego z kolei pomiaru (kolejne pomiary w każdym przejeździe wykonywano w tym samym obszarze poletka doświadczalnego).

Poniżej zamieszczono dwie tabele. Tabela 8.2 zawiera dane uzyskane dla dwóch przejazdów z ostrzem w kształcie klina, natomiast Tabela 8.3 zawiera dane uzyskane dla dwóch przejazdów z ostrzem w kształcie stożka. Kolumny w tabelach oznaczone numerami od 1÷4 zawierają następujące dane pomiarowe:

1. wysokość ramy od powierzchni ziemi zmierzona w miejscu sadzenia [mm],
2. odległość wierzchołka narzędzia od ramy w górnym położeniu narzędzia [mm],

3. wartość obniżenia narzędzia od poziomu początkowego do pełnego zagłębienia [mm] (maksymalna wartość odczytana z uzyskanych wykresów zagłębienia),
4. efektywna wartość zagłębienia narzędzia w glebie [mm] (od wartości z kolumny 3 odjęta jest wartość z kolumny 1 i dodana wartość z kolumny 2).

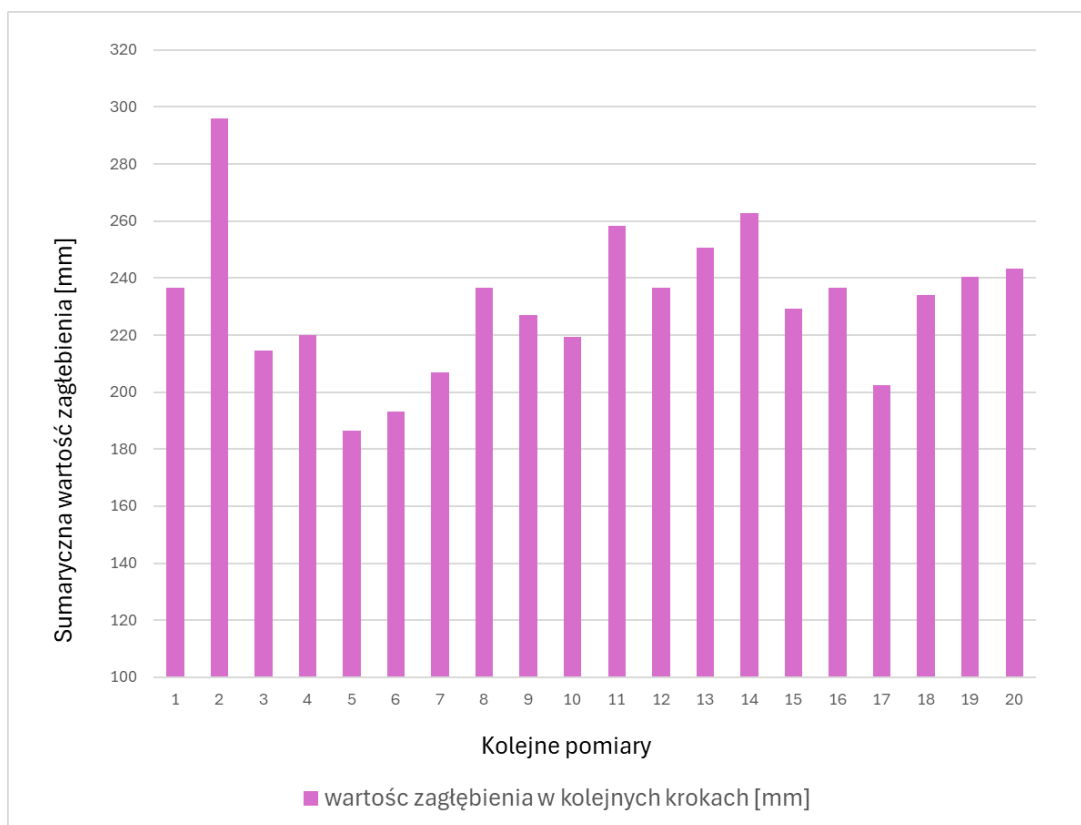
Tabela 8.2. Wartości zagłębienia narzędzia w wersji pierwszej z podziałem na wysokość ramy od powierzchni gleby w miejscu sadzenia [opracowanie własne]

Lp.	Wyniki pomiarów dla ostrza klinowego							
	1	2	3	4	1	2	3	4
	przejazd bez sadzenia sadzonek				przejazd z sadzeniem sadzonek			
1	570	304	502	236	570	304	483	217
2	495	304	487	296	560	304	466	210
3	535	304	446	215	565	304	461	200
4	525	304	441	220	550	304	480	234
5	565	304	448	187	575	304	497	226
6	555	304	444	193	585	304	454	173
7	555	304	458	207	570	304	451	185
8	560	304	493	237	565	304	447	186
9	570	304	493	227	555	304	351	100
10	575	304	490	219	540	304	492	256
11	525	304	479	258	555	304	488	237
12	545	304	477	236	565	304	470	209
13	545	304	492	251	570	304	466	200
14	535	304	494	263	555	304	479	228
15	560	304	485	229	580	304	491	215
16	555	304	488	237	575	304	488	217
17	570	304	468	202	570	304	489	223
18	540	304	470	234	550	304	470	224
19	550	304	486	240	570	304	472	206
20	545	304	484	243	545	304	469	228

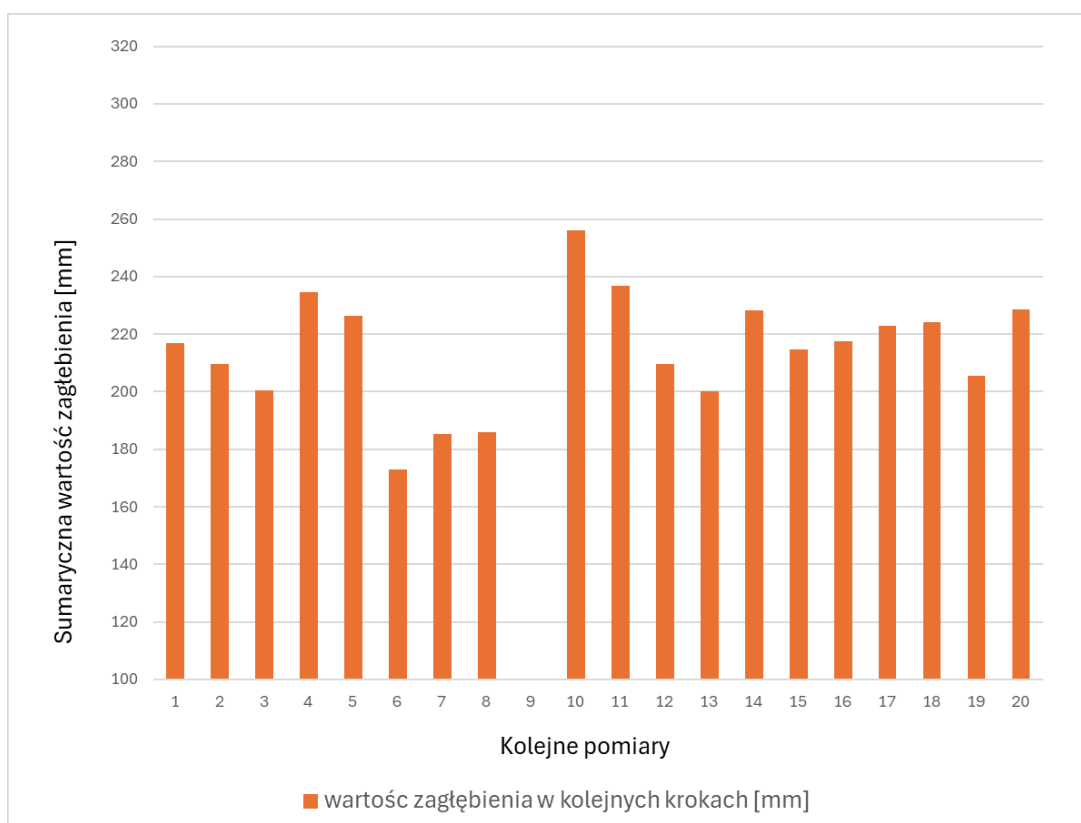
Tabela 8.3. Wartości zagłębienia narzędzia w wersji drugiej z podziałem na wysokość ramy od powierzchni ziemi w miejscu sadzenia, wartość zagłębienia narzędzia od najwyższego położenia oraz sumaryczna wartość zagłębienia [opracowanie własne]

Lp.	Wyniki pomiarów dla ostrza stożkowego							
	1	2	3	4	1	2	3	4
	przejazd bez sadzenia sadzonek				przejazd z sadzeniem sadzonek			
1	570	304	508	242	580	304	503	227
2	540	304	496	260	575	304	486	215
3	540	304	501	265	560	304	493	237
4	550	304	465	219	550	304	507	261
5	540	304	459	223	565	304	512	251
6	595	304	490	199	585	304	509	228
7	585	304	495	214	575	304	483	212
8	585	304	485	204	550	304	486	240
9	580	304	486	210	580	304	478	202
10	575	304	496	225	570	304	513	247
11	565	304	498	237	565	304	517	256
12	555	304	487	236	560	304	515	259
13	530	304	467	241	570	304	497	231
14	550	304	508	262	590	304	499	213
15	545	304	502	261	585	304	498	217
16	555	304	491	240	565	304	506	245
17	565	304	487	226	550	304	522	276
18	545	304	513	272	555	304	513	262
19	550	304	516	270	545	304	508	267
20	570	304	498	232	565	304	509	248

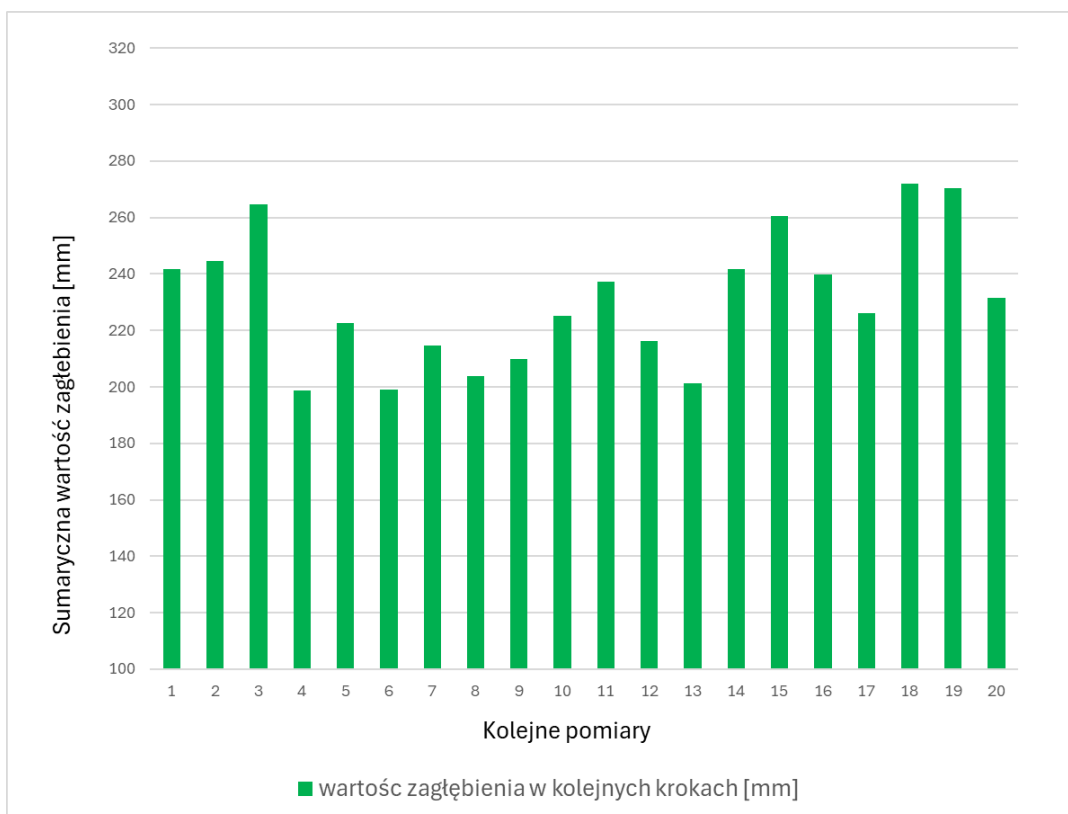
Poniżej zaprezentowano wykresy, na których przedstawiono wartości osiąganych głębokości poniżej poziomu powierzchni gleby podczas zagłębiania narzędzia z klinowym kształtem ostrza w obu przejazdach (Rys. 8.16 ÷ Rys. 8.17) oraz ze stożkowym kształtem ostrza, również w obu przejazdach (Rys. 8.18 ÷ Rys. 8.19). W przypadku wykresu na Rys. 8.17 pomiar nr 9 zawiera wartość zagłębienia poniżej 100 mm, stąd nie jest widoczny na wykresie.



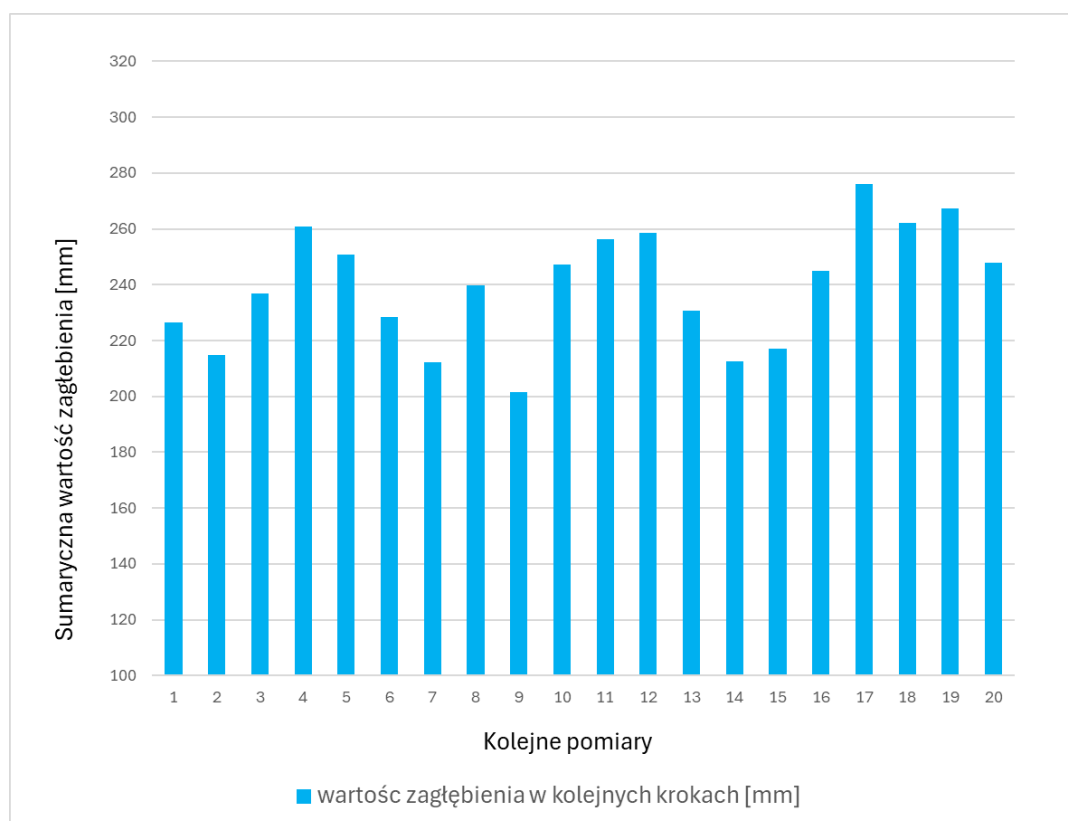
Rys. 8.16. Wartość zagłębienia poniżej poziomu gleby podczas zagłębiania narzędzia z ostrzem klinowym w pierwszym przejeździe [opracowanie własne]



Rys. 8.17. Wartość zagłębienia poniżej poziomu gleby podczas zagłębiania narzędzia z ostrzem klinowym w drugim przejeździe [opracowanie własne]

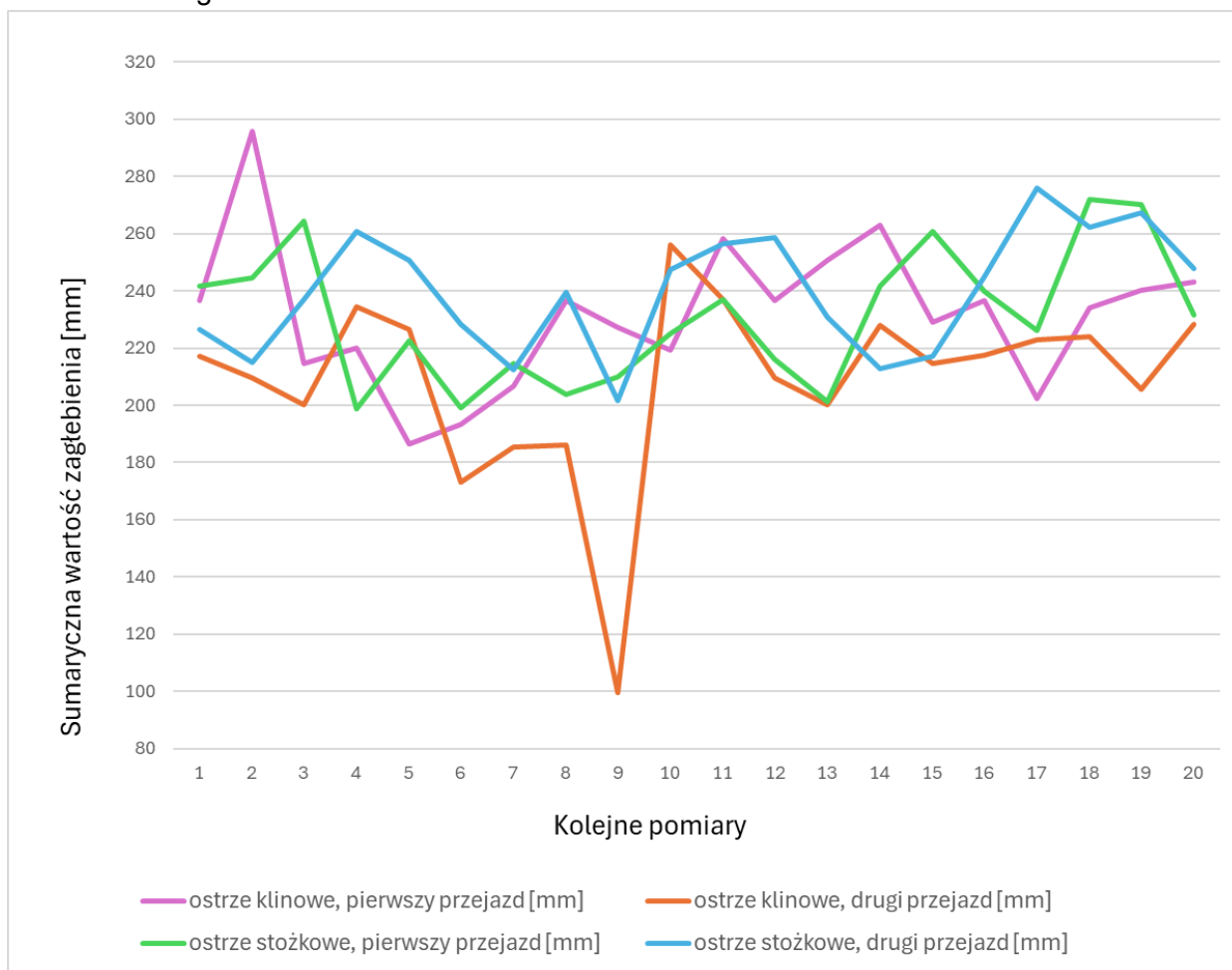


Rys. 8.18. Wartość zagłębienia poniżej poziomu gleby podczas zagłębienia narzędzia z ostrzem stożkowym w pierwszym przejeździe [opracowanie własne]



Rys. 8.19. Wartość zagłębienia poniżej poziomu gleby podczas zagłębienia narzędzia z ostrzem stożkowym w drugim przejeździe [opracowanie własne]

Na Rys. 8.20 przedstawiono wykres zbiorczy, na który naniesiono maksymalną wartość każdego pojedynczego zagłębienia. Pozwala on na porównanie wartości zagłębienia dla narzędzia z jedną i drugą wersją ostrza w danym obszarze poletka doświadczalnego. Każdy z przejazdów wykonywano na tej samej długości i w tym samym obszarze poletka doświadczalnego.



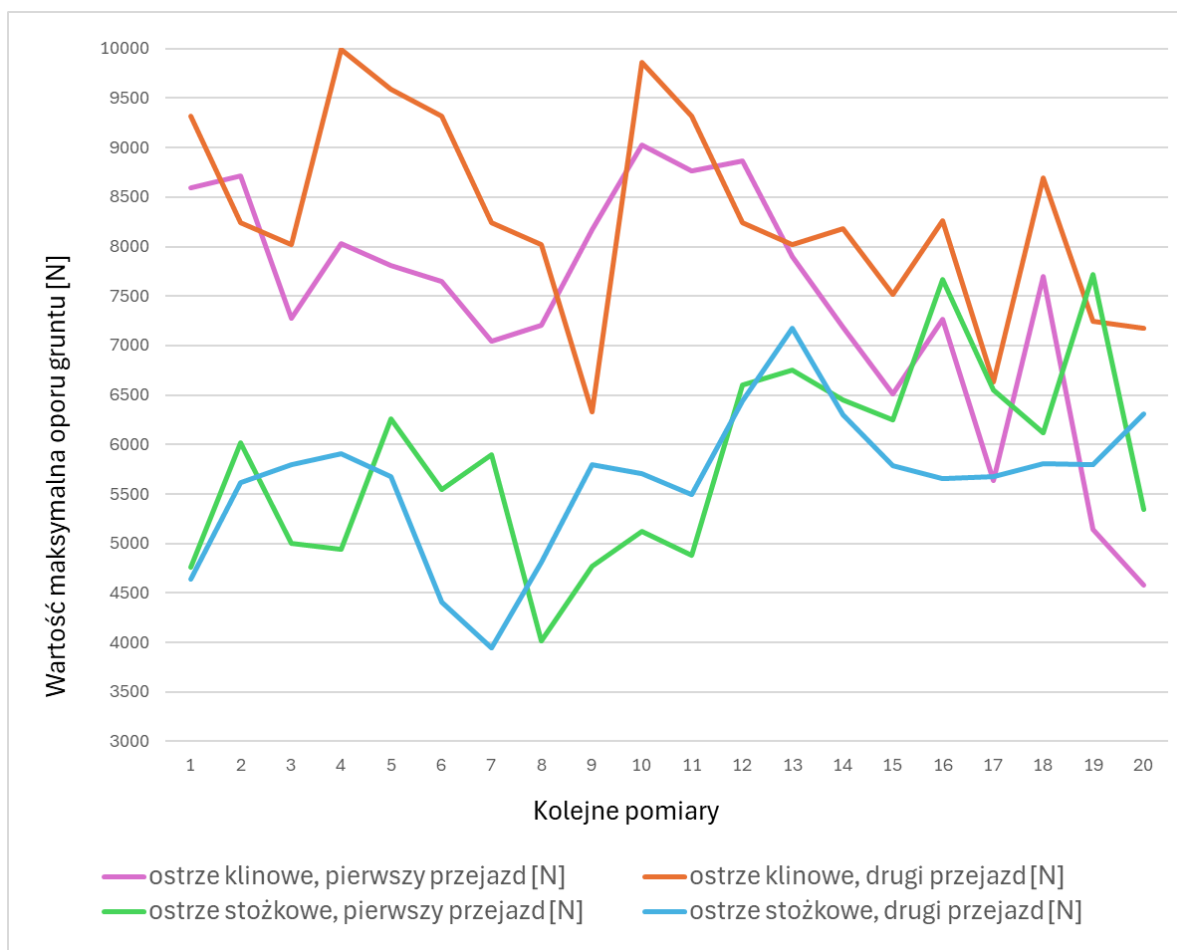
Rys. 8.20. Wartość zagłębienia poniżej poziomu gleby dla narzędzia z dwiema wersjami ostrza dla obu przejazdów [opracowanie własne]

W Tabeli 8.4. Wartość maksymalna oporu gleby uzyskana w kolejnej próbie zagłębienia narzędzia klinowego i stożkowego [opracowanie własne] zestawiono komplet pomiarów dotyczących wartości oporu gruntu dla narzędzia zagłębianego z obiema wersjami ostrza.

Tabela 8.4. Wartość maksymalna oporu gleby uzyskana w kolejnej próbie zagłębienia narzędzia klinowego i stożkowego [opracowanie własne]

Lp.	Szczytowa wartość oporu gleby w danym kroku (N)			
	Wyniki pomiarów dla ostrza klinowego		Wyniki pomiarów dla ostrza stożkowego	
	przejazd bez sadzenia sadzonek	przejazd z sadzeniem sadzonek	przejazd bez sadzenia sadzonek	przejazd z sadzeniem sadzonek
1	8591	9318	4763	4644
2	8714	8243	6016	5620
3	7276	8022	5006	5798
4	8027	9998	4945	5904
5	7809	9590	6264	5681
6	7649	9318	5545	4410
7	7041	8243	5900	3949
8	7210	8022	4018	4809
9	8170	6335	4773	5798
10	9032	9864	5118	5708
11	8765	9318	4879	5494
12	8864	8244	6604	6440
13	7899	8017	6752	7178
14	7184	8184	6455	6303
15	6514	7514	6254	5791
16	7263	8263	7665	5652
17	5633	6633	6556	5681
18	7694	8694	6120	5803
19	5147	7247	7714	5794
20	4577	7180	5346	6311

Na rysunku Rys. 8.21 zwizualizowano wartości przedstawione w Tabeli 8.4 celem pokazania w sposób graficzny, jak kształtuje się przebieg osiąganych wartości dla obu wersji ostrza w obu wykonanych przejazdach.



Rys. 8.21. Przebieg wartości maksymalnej dla siły pochodzącej od oporu gleby osobno dla każdego z ostrzy i dla każdego przejazdu [opracowanie własne]

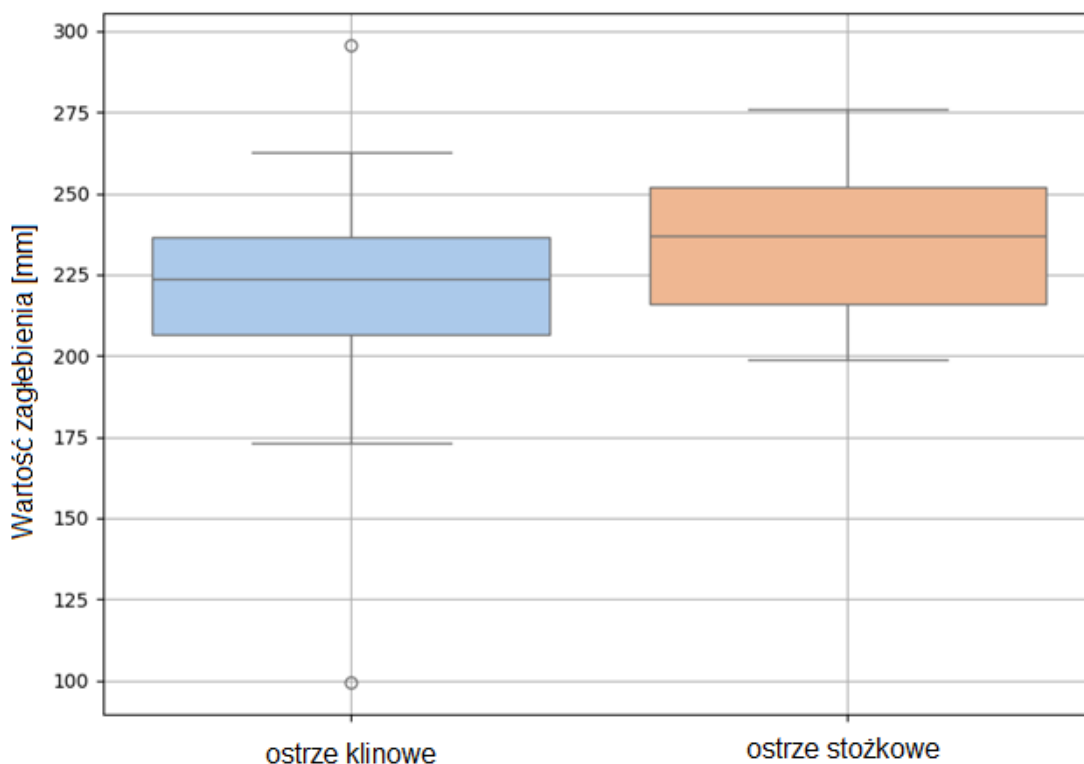
8.3. Statystyczne opracowanie wyników badań polowych

Wykonano analizę statystyczną otrzymanych wyników badań polowych. Badania te stanowią podstawę niniejszej pracy. Badania laboratoryjne przeprowadzono dodatkowo, celem wstępnej oceny porównawczej obu wersji ostrza, stąd w ich przypadku z analizy statystycznej zrezygnowano. Analizie poddano otrzymane podczas prowadzenia badań wartości zagłębienia obu wersji narzędzia oraz wartości generowanych sił oporu od gleby. W obu przypadkach przyjęto próbę o wartości 40, ponieważ potraktowano jako jedną, wspólną próbę z zasadzeniem sadzonek oraz bez ich sadzenia. Fakt sadzenia lub nie sadzonek nie miał wpływu na osiągnięte zagłębienie w ziemi lub osiąganą wartość oporu gleby. W Tabeli 8.5 przedstawiono obliczone wartości statystyczne dla pozyskanych wartości.

Tabela 8.5. Statystyka wartości zagłębienia narzędzia wyposażonego w ostrze klinowe oraz stożkowe

Rodzaj ostrza	klinowe	stożkowe
Średnia $\bar{x}$	220	235
Mediana Me	223	237
Odchylenie standardowe s	30,8139	22,4352
Test t-Studenta (próba zależna) t	-3,0051	
Poziom istotności α	0,05	
Wartość p	0,0046	

Na podstawie testu t-Studenta dla prób zależnych stwierdzono, że różnica między średnimi wartościami pomiarów zagłębienia obu wersji ostrza jest statystycznie istotna. Wartość $p = 0,0046 < 0,05$, wskazuje na odrzucenie hipotezy zerowej, co oznacza, że pomiary wykonane narzędziem z ostrzem stożkowym dają istotnie większe wartości zagłębienia, niż pomiary z ostrzem klinowym. Graficzne przedstawienie rozkładu wartości zagłębienia dla obu wersji ostrza przedstawiono na Rys. 8.22. Porównanie rozkładu wartości zagłębienia dla ostrza w kształcie stożka i w kształcie klina



Rys. 8.22. Porównanie rozkładu wartości zagłębienia dla ostrza w kształcie stożka i w kształcie klina [opracowanie własne]

Wizualnie potwierdza to wynik testu t-Studenta: Ostrze stożkowe ma istotnie większe wartości zagłębienia, niż ostrze klinowe.

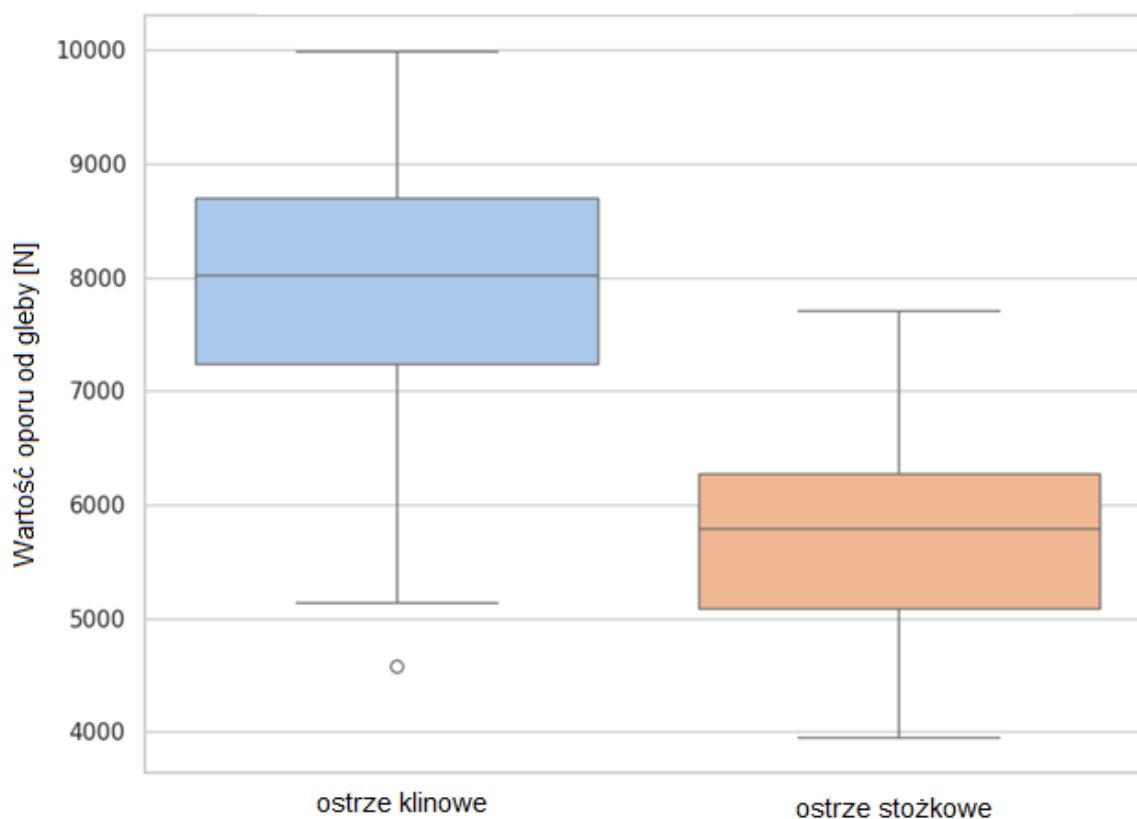
W

Tabela 8.5. Statystyka wartości zagłębienia narzędzia wyposażonego w ostrze klinowe oraz stożkowe obliczone wartości statystyczne dla pozyskanych wartości oporu gleby.

Tabela 8.6. Statystyka wartości osiągniętego oporu gleby narzędzi wyposażonych w ostrza: klinowe oraz stożkowe

Rodzaj ostrza	klinowe	stożkowe
Średnia $\bar{x}$	7883	5737
Mediana Me	8022	5793
Odchylenie standardowe s	1198,5951	863,2200
Test t-Studenta (próba zależna) t	8,0648	
Poziom istotności α	0,05	
Wartość p	$7,76 \cdot 10^{-10}$	

Na podstawie testu t-Studenta dla prób zależnych stwierdzono, że różnica między średnimi wartościami pomiarów zagłębienia obu wersji ostrza jest statystycznie istotna. Wartość $p = 7,76 \cdot 10^{-10} < 0,05$, wskazuje na odrzucenie hipotezy zerowej, co oznacza, że pomiary wykonane narzędziem z ostrzem stożkowym dają istotnie mniejsze wartości oporu gruntu, niż pomiary z ostrzem klinowym. Graficzne przedstawienie rozkładu wartości siły pochodzącej od oporu gleby dla obu wersji ostrza przedstawiono na Rys. 8.23.



Rys. 8.23. Porównanie rozkładu wartości siły pochodzącej od oporu gleby dla ostrza w kształcie stożka i w kształcie klina [opracowanie własne]

Wykres potwierdza wynik testu t-Studenta: ostrze klinowe wykazuje istotnie większe wartości oporu gleby, niż ostrze stożkowe.

9. PRACE WDROŻENIOWE

9.1. Istniejące rozwiązanie jako baza

Działania prowadzone w ramach niniejszego doktoratu w pewnym stopniu wykorzystują istniejące na rynku rozwiązanie konstrukcyjne, które częściowo jest chronione przez patent pt. „Kostur do sadzenia sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym” (Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej Patent No. PL 242910 B1 [130]. Do patentu tego prawo mają Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny w Poznaniu oraz Uniwersytet Przyrodniczy w Krakowie. Prace prowadzone w ramach doktoratu wdrożeniowego (Umowa nr DWD/5/0354/2021) oraz wyniki z nimi związane są własnością Sieci Badawczej Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego, zatem nie ma konfliktu interesów na tym polu.

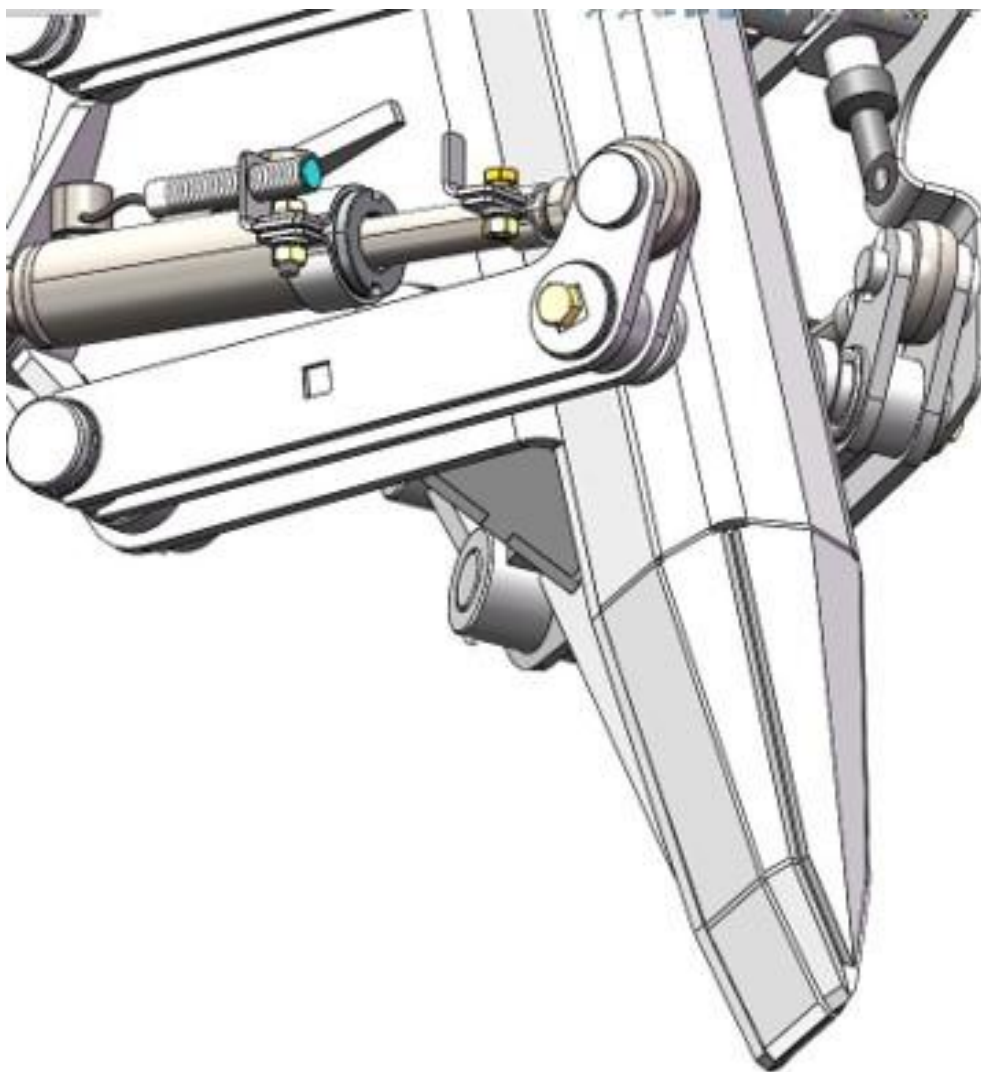
Jako podstawę do prowadzenia prac związanych z realizacją doktoratu przyjęto konstrukcję narzędzia sadzącego wraz jego kinematyką i zasadą działania. Powstałe koncepcje narzędzia sadzącego, które były rozważane, analizy oraz badania prowadzone z zastosowaniem narzędzia bazowego są tworem nowym.

W procesie analizowania możliwości prowadzenia badań nad opracowywaną nową konstrukcją oraz ich możliwego zakresu pod uwagę brane były także zasoby sprzętowe Łukasiewicz-PIT oraz dostępna zarówno w Instytucie, jak i w Politechnice Poznańskiej aparatura pomiarowa. W efekcie tych rozważań powstały analizowane w niniejszej dysertacji koncepcje nowej wersji narzędzia sadzącego i jego ostrza.

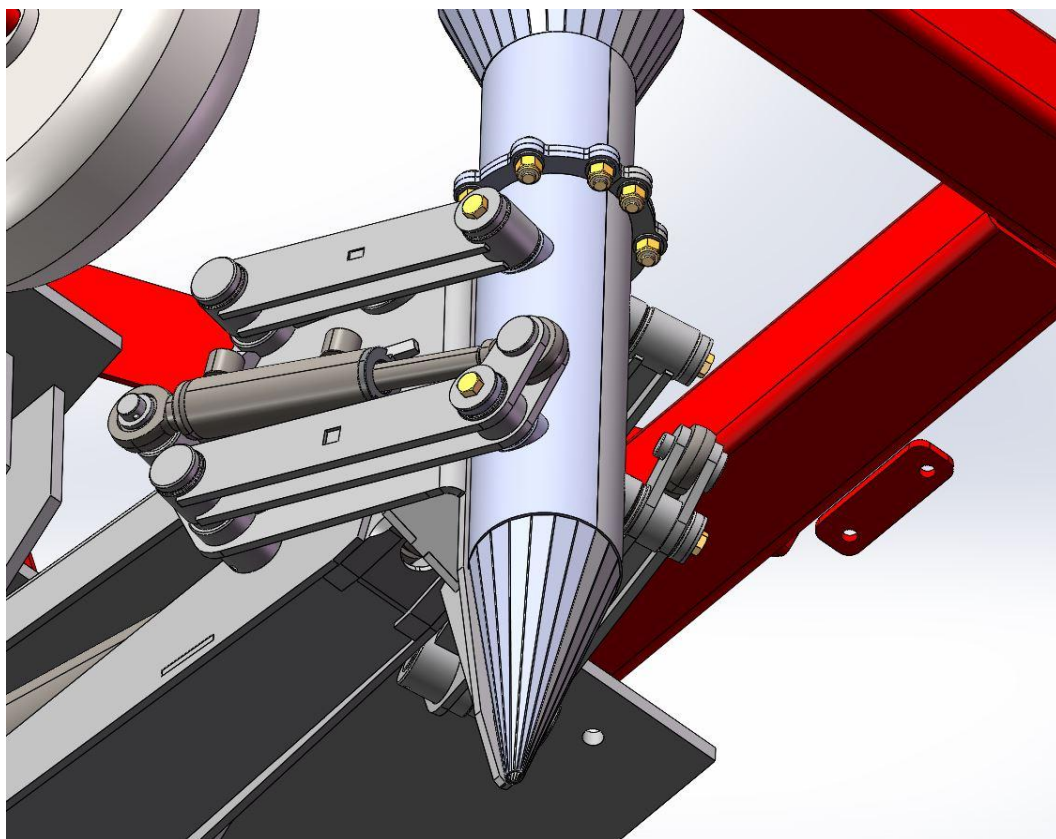
9.2. Modyfikacja służąca wdrożeniu

Realizując działania związane z niniejszą pracą doktorską dokonano wyboru jednej z powstałych koncepcji narzędzia sadzącego sadzonki drzew z zakrytym systemem korzeniowym celem wykonania kolejnych etapów pracy zmierzających do wdrożenia jej efektów. Zasadnicza cecha narzędzia i jego ostrza, która odróżnia opracowany i przebadany model od jego pierwowzoru polega na zmienionej geometrii ostrza. W efekcie przeprowadzonych badań ustalono, że ostrze w kształcie stożka zauważalnie lepiej może wykonywać proces sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym. Poza różnicą polegającą na zmianie kształtu końcówki wgłębnej z klinowej na stożkową (Rys. 9.1 oraz Rys. 9.2) wprowadzono również zmianę w rurze podającej sadzonkę. Rura ta w narzędziu ze stożkowym ostrzem ma większą średnicę (59÷82 mm) (Rys. 9.3), niż w wersji z ostrzem klinowym (60 mm) (Rys. 9.4), co pozwala na łatwiejsze przemieszczanie się sadzonki w jej wnętrzu. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wykorzystania urządzenia do pracy z sadzonkami, które posiadają nieco większą, bardziej rozbudowaną koronę.

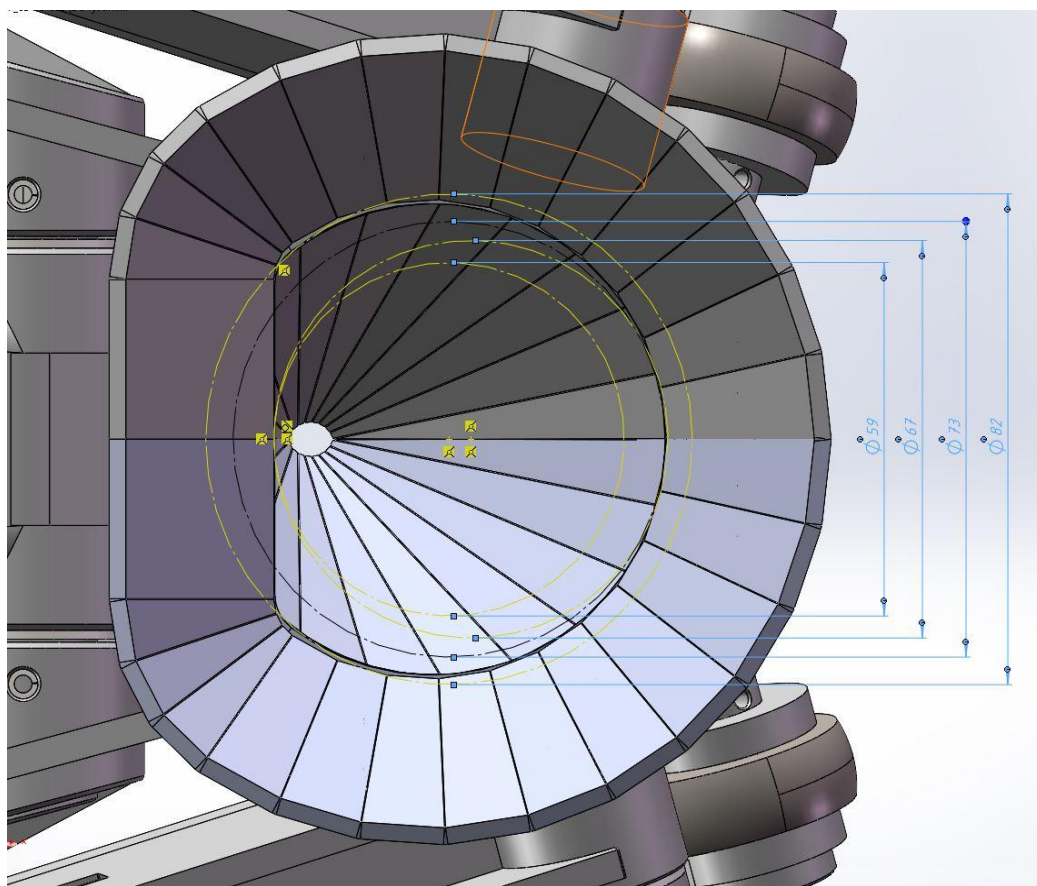
Te dwie zasadnicze modyfikacje wprowadzone w konstrukcji narzędzia, a następnie poddane badaniom laboratoryjnym i polowym mogą być z powodzeniem wdrożone zarówno, jako moduł wspomnianego robota, jak i narzędzie niezależne agregowane, np. z ciągnikiem rolniczym.



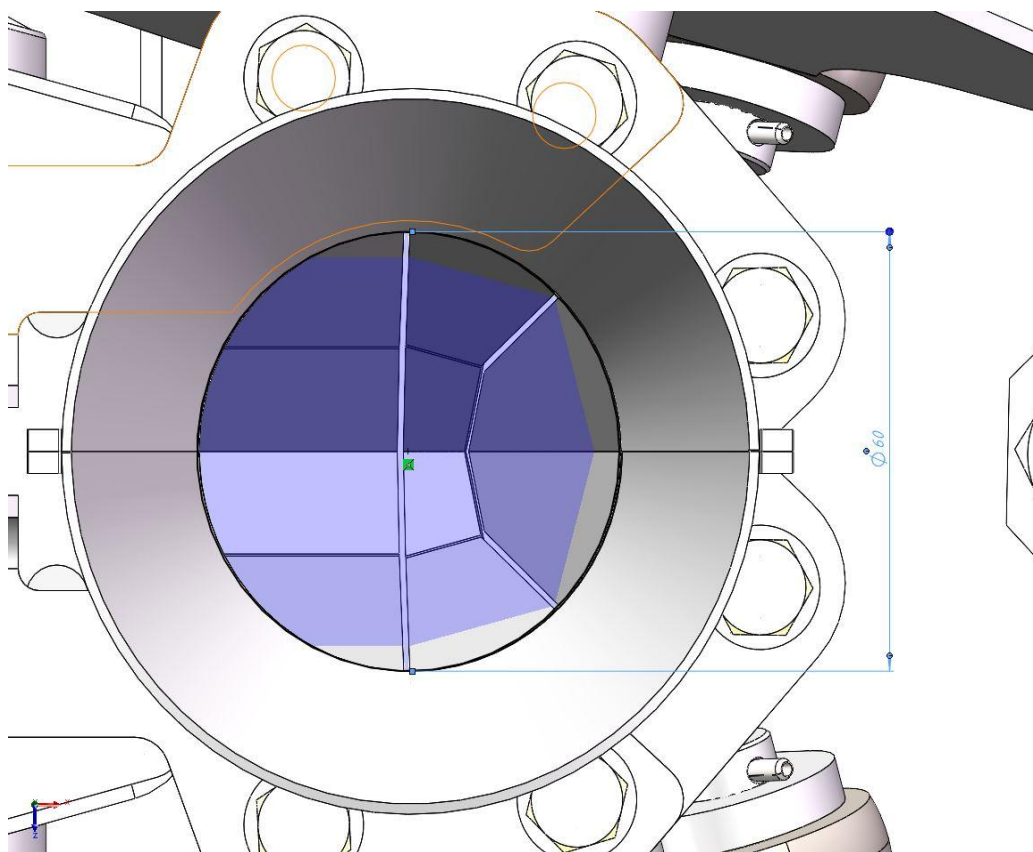
Rys. 9.1. Narzędzie sadzące z ostrzem w kształcie klina i rurą przelotową o mniejszej średnicy



Rys. 9.2. Narzędzie sadzące z ostrzem w kształcie stożka i rurą przelotową o większej średnicy



Rys. 9.3. Przekrój rury przelotowej (wnętrza narzędzia) w przypadku ostrza z końcówką stożkową



Rys. 9.4. Przekrój rury przelotowej (wnętrza narzędzia) w przypadku ostrza z końcówką klinową

W celu przygotowania i ułatwienia prowadzenia procesu wdrożenia opracowanej koncepcji narzędzia sadzącego sadzonki drzew z zakrytym systemem korzeniowym wykonana została kompletna dokumentacja techniczna modelu narzędzia z ostrzem stożkowym, stanowiąca

Załącznik 1. **Dokumentacja techniczna** niniejszej pracy, a także instrukcja montażu narzędzia (**Załącznik 2**).

9.3. Możliwości wdrożenia i przeznaczenie opracowanego narzędzia sadzącego

Podjęte zostały rozmowy, co do możliwości wdrożenia wyników badań oraz opracowanej konstrukcji z potencjalnie zainteresowanym podmiotem. Podmiotem tym jest Ośrodek Techniki Leśnej w Jarocinie. Ośrodek jest jednostką wydzieloną w strukturze Lasów Państwowych i podlega bezpośrednio Dyrektorowi Generalnemu Lasów Państwowych. Jest jednym z siedmiu zakładów o zasięgu krajowym i jedynym zakładem produkującym maszyny leśne. Z uwagi na fakt, że Lasy Państwowe są podmiotem poważnie zainteresowanym usprawnieniem procesu sadzenia drzew, istnieje potencjalnie duża szansa na wdrożenie wyników badań nowej wersji narzędzia właśnie w Ośrodku Techniki Leśnej w Jarocinie. Sadzenie drzewek w szkółkach leśnych odbywa się w sposób ciągły, tj. drzewka sadzone są przez cały rok. Liczba sadzonek w szkółkach leśnych liczona jest w milionach sztuk. Każda oszczędność, wynikająca z mniejszego zapotrzebowania czasu na sadzenie, czy prowadzenia prac serwisowych, a także uproszczenie lub przyspieszenie wykonania nowego egzemplarza narzędzia są mocno pożądane. Istotne znaczenie ma tutaj także coraz większa potrzeba zastępowania pracą maszyn wysiłku ludzi, których coraz trudniej jest zaangażować do ciężkiej pracy fizycznej przy sadzeniu lasu. Opracowane i przebadane w ramach realizacji badań prowadzących do powstania dysertacji doktorskiej narzędzie sadzące wychodzi naprzeciw temu zapotrzebowaniu.

W **Załącznik 3.** do niniejszej rozprawy zamieszczono oświadczenie potencjalnego zainteresowanego technologią, wykonawcy, tj. jednostki OTL z Jarocina.

9.4. Identyfikacja klientów

W procesie projektowania i wdrażania innowacyjnych rozwiązań technicznych, takich jak narzędzie do sadzenia sadzonek drzewek, kluczowe znaczenie ma precyzyjna identyfikacja grupy docelowej odbiorców. Pozwala to nie tylko na dostosowanie funkcjonalności urządzenia do rzeczywistych potrzeb użytkowników, ale również na efektywne planowanie strategii komercjalizacji i wdrożenia rynkowego.

- **Segmentacja rynku**

Z uwagi na charakter i skalę zastosowania opracowywanego narzędzia, jego głównymi odbiorcami będą podmioty działające w sektorze leśnym i rolniczym, w szczególności będą to duże przedsiębiorstwa leśne realizujące zmechanizowane nasadzenia na terenach zalesianych, rekultywowanych lub objętych programami odnowy biologicznej.

Do grona tego zaliczyć można także firmy usługowe świadczące usługi sadzenia drzew na zlecenie instytucji publicznych, samorządów oraz inwestorów prywatnych, instytucje zarządzające terenami zielonymi, takie jak zarządy parków narodowych, lasów miejskich czy jednostki odpowiedzialne za zalesianie terenów zdegradowanych oraz duże gospodarstwa rolne, które wdrażają praktyki agroekologiczne, w tym zalesianie gruntów rolnych w ramach programów wspieranych przez UE.

- **Charakterystyka klientów**

Klientów docelowych charakteryzuje, m.in. wysoki poziom profesjonalizacji, ponieważ dysponują wykwalifikowaną kadrą techniczną oraz zapleczem maszynowym, co umożliwia wdrożenie zaawansowanych technologii. Ponadto cechą charakterystyczną jest skala działania – operują na dużych obszarach, co uzasadnia inwestycję w zautomatyzowane narzędzia zwiększające efektywność pracy, a także otwartość na innowacje – są zainteresowani rozwiązaniami poprawiającymi wydajność, ergonomię i jakość sadzenia, szczególnie w kontekście rosnących wymagań środowiskowych i regulacyjnych. Ponadto w omawianym obszarze istnieje również potrzeba optymalizacji kosztów – klienci poszukują narzędzi, które pozwolą na redukcję kosztów pracy ludzkiej oraz zwiększenie precyzji i powtarzalności procesu sadzenia.

- **Współpraca z klientem w procesie projektowym**

W ramach prac badawczo-rozwojowych prowadzonych przez Sieć Badawczą Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, istotnym elementem była współpraca z potencjalnymi użytkownikami końcowymi. Konsultacje branżowe, wizyty terenowe oraz testy prototypów umożliwiły, m.in.: walidację założeń projektowych w rzeczywistych warunkach pracy, pozyskanie informacji zwrotnej dotyczącej ergonomii, niezawodności i funkcjonalności urządzenia oraz dostosowanie konstrukcji narzędzia do specyficznych wymagań operacyjnych klientów.

9.5. Kryteria wyceny produktu

W procedurze ustalania ceny narzędzia do sadzenia drzewek należy uwzględnić zarówno koszty wytworzenia, jak i wartość postrzeganą przez klienta, specyfikę rynku docelowego oraz strategię wdrożeniową przyjętą przez właściciela rozwiązania – Sieć Badawczą Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny. Wycena powinna być elastyczna i umożliwiać różne modele sprzedaży lub licencjonowania, dostosowane do potrzeb dużych przedsiębiorstw.

Główne kryteria wyceny

Koszty produkcji jednostkowej

- koszty materiałowe,
- koszty montażu i testowania,
- koszty logistyki i magazynowania.

Koszty rozwoju i wdrożenia

- nakłady poniesione na badania i rozwój,
- koszty opracowania dokumentacji technicznej,
- koszty pilotażowych wdrożeń i testów terenowych.

Wartość dodana dla klienta

- oszczędność czasu i kosztów pracy ludzkiej,
- zwiększenie precyzji i powtarzalności sadzenia,
- możliwość integracji z innymi maszynami lub systemami zarządzania gospodarstwem/leśnictwem.

Pozycjonowanie rynkowe

- porównanie z konkurencyjnymi rozwiązaniami,
- poziom innowacyjności i unikalność funkcji,
- potencjał eksportowy i skalowalność rozwiązania.

Model sprzedaży

- sprzedaż bezpośrednia (jednorazowa opłata).
- leasing lub wynajem sezonowy,
- licencjonowanie technologii dla producentów maszyn,
- model sprzedaży, np. z pakietem przeglądów i wsparcia technicznego.

Skala zamówienia

- rabaty ilościowe dla dużych zamówień,
- możliwość dostosowania funkcji do indywidualnych potrzeb klienta (wersje standardowe i premium).

Rekomendacje dotyczące strategii cenowej

Zaleca się przyjęcie strategii wartości dodanej, w której cena odzwierciedla korzyści ekonomiczne i operacyjne osiągane przez klienta. W początkowej fazie wdrożenia możliwe jest również zastosowanie strategii penetracyjnej, polegającej na oferowaniu atrakcyjnej ceny w celu szybkiego zdobycia rynku i pozyskania referencyjnych klientów, przy czym istotna jest tutaj potencjalna wartość prognozowanej sprzedaży. W kontekście narzędzia będącego przedmiotem niniejszej pracy raczej nie można mówić o produkcji wielkoseryjnej.

9.6. Sposoby wdrożenia

Wdrożeniem objęte mogą być wszystkie wyniki oraz wnioski zawarte w niniejszej pracy. Pierwszym aspektem, który może zostać zastosowany we wdrożeniu są wyniki badań symulacyjnych, bazujące na analizie MES. Wnioski płynące z tej analizy mogą posłużyć za podstawę dalszych badań i analiz kolejnych wersji ostrza, bądź całego narzędzia. Istnieje możliwość opracowania narzędzia o innym kształcie, wykonanego z innego materiału, jeżeli np. zajdzie potrzeba zastosowania go w innych warunkach pracy.

W podobnym obszarze dalszych prac wykorzystane mogą zostać wyniki badań samego ostrza w postaci fizycznej, które prowadzone były równolegle, jako testy syntetyczne w warunkach laboratoryjnych oraz jako testy rzeczywiste w realnych warunkach pracy na polu.

Finalnie zaś wdrożeniem objęte może zostać nowoopracowane narzędzie sadzące, w które wyposażony zostać może automat sadzący, będący załącznikiem do rozpoczęcia prowadzenia prac opisanych w tejże rozprawie. Ostrze to wraz z kompletnym narzędziem sadzącym może zostać

zastosowane także, jako część układu sadzącego, a która to część zagregowana zostanie, np. z ciągnikiem rolniczym, który pełnić będzie rolę jednostki napędowej i nośnika narzędzia podczas procesu sadzenia drzewek. Nadmienić należy, iż konstrukcja narzędzia sadzącego w postaci ostrza z dwoma odchylanymi elementami i elementem stałym jest chroniona prawem patentowym, dlatego możliwość wykorzystania zastosowanych rozwiązań technicznych powinna zostać uzgodniona z beneficjentem patentu [130].

11. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

11.1. Wnioski dotyczące tezy pracy

Na podstawie wykonanych badań wykazano, zgodnie z założoną tezą, która brzmiała: ***konstrukcja i działanie narzędzia sadzącego mają wpływ na przebieg procesu sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym***, iż konstrukcja układu sadzącego jest na tyle istotna, że zmiana geometrii, kształtu lub kinematyki pracy może wpływać na poprawność procesu sadzenia. Uzyskane wyniki wskazują, iż nawet tylko sama zmiana kształtu ostrza wpłynęła zarówno na obciążenie całego układu podczas pracy, na zagłębianie narzędzia oraz na płynność przemieszczania się sadzonki we wnętrzu narzędzia.

W związku z tezą postawioną na początku pracy sformułowano również szczegółowe pytania badawcze. Wykonane badania pozwoliły także znaleźć odpowiedź na te pytania.

- *czy konstrukcja podzespołów roboczych rozchylanego kostura w postaci stałego, przedniego ostrza i rozchylanych skrzydeł bocznych jest odpowiednia do prawidłowej realizacji procesu sadzenia sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym?* Wnioskować można, że konstrukcja podzespołów roboczych rozchylanego kostura w postaci stałego, przedniego ostrza i rozchylanych skrzydeł bocznych jest odpowiednia do prawidłowej realizacji procesu sadzenia sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym. Wynika to z faktu, iż podczas prowadzonych badań zarówno w przypadku narzędzia z ostrzem klinowym, jak i narzędzia z ostrzem stożkowym drzewka były sadzone w sposób poprawny. Jednakże wykonywanie tego procesu w sposób sprawniejszy i mniej obciążający cały układ było realizowane przez ostrze stożkowe.
- *czy parametry rośliny mają istotny wpływ na przebieg i jakość procesu ich sadzenia?* Gatunek sadzonych drzew i związane z nim parametry rośliny mają istotny wpływ na przebieg i jakość procesu ich sadzenia. Zasadniczo już na etapie przygotowania do badań stwierdzono, że dwuletnie sadzonki drzew liściastych w okresie, kiedy dojrzałe są liście nie są możliwe do wysadzenia przez narzędzie tego typu. Mocno rozrośnięta korona drzewka uniemożliwia przelot sadzonki przez wnętrze narzędzia. Było to powodem wykluczenia tego rodzaju sadzonek z badań zasadniczych.
- *jaki jest wpływ konstrukcji sadzącej na poprawność procesu sadzenia sadzonek?* Wpływ konstrukcji sadzącej na poprawność procesu wysadzania sadzonek jest istotny. Zmiana końcówki wgłębnej narzędzia powoduje bowiem zarówno zmianę oporów pochodzących od gleby podczas zagłębiania, jak i zmianę polegającą na możliwości sprawniejszej penetracji gruntu przez osiągnięcie większego zagłębienia w glebie.

11.2. Wnioski poznawcze

Analiza wyników uzyskanych podczas prowadzenia badań oraz poczynione obserwacje pozwoliły sformułować następujące wnioski poznawcze:

- Opracowano nową wersję ostrza wykorzystując dotychczasowy układ sadzący wraz z kinematyką. Zaobserwowano, że różnica w poprawności pracy obu wersji narzędzia sadzącego jest znacząca. Tylko zmiana kształtu końcówki ostrza pozwoliła na zmniejszenie oporów od gruntu i usprawnienie procesu zagłębiania, nawet pomimo zwiększenia średnicy narzędzia.
- Podczas prowadzenia prac związanych z opracowaniem nowej wersji narzędzia wykonano również badania laboratoryjne. Wyniki otrzymane na tej drodze zostały potwierdzone przez rezultaty otrzymane podczas wykonywania badań polowych. Wnioskować zatem można, że w celu poznania wstępnej charakterystyki pracy nowej

wersji ostrza wystarczające byłoby wykonanie prostszych i tańszych badań w warunkach laboratoryjnych.

- Wartości zagłębienia w glebie w przypadku ostrza stożkowego były w skrajnych przypadkach 10÷20% większe, niż w przypadku ostrza klinowego, zależnie od kolejnej próby i lokalnych właściwości gleby - zarówno w badaniach laboratoryjnych, jak i polowych.
- Wartość oporu gruntu (Rys. 8.21) w przypadku narzędzia wyposażonego w ostrze stożkowe w pierwszym przejeździe podczas prób polowych wynosiła średnio około 5200 N, natomiast w przypadku ostrza klinowego średnio około 8300 N. Ostrze klinowe generowało więc w przybliżeniu 59% większe opory gruntu. W trakcie drugiego przejazdu różnica była mniejsza; przeciętnie średnio 6200 N w przypadku ostrza stożkowego i średnio 7400 N w przypadku ostrza klinowego. Narzędzie z ostrzem klinowym generowało zatem w tym przypadku opory gruntu większe o około 19%. Wykonana analiza statystyczna wykazała, że pomiary wykonane dla narzędzia z ostrzem stożkowym dają istotnie mniejsze wartości oporu gruntu, niż pomiary z ostrzem klinowym (Tabela 8.6).
- Wartość zagłębienia się narzędzia (Rys. 8.20) w przypadku narzędzia wyposażonego w ostrze stożkowe w pierwszym przejeździe podczas prób polowych wynosiła średnio około 240 mm, natomiast w przypadku ostrza klinowego średnio około 220 mm. W trakcie drugiego przejazdu zagłębienie wynosiło średnio - odpowiednio dla ostrza stożkowego 250 mm oraz dla ostrza klinowego 230 mm. Analiza statystyczna wykonana również w tym przypadku pokazała, że różnica między średnimi wartościami pomiarów zagłębienia obu wersji ostrza jest statystycznie istotna.
- Obserwacje poczynione podczas wykonywania badań polowych pozwoliły na ocenę poprawności przemieszczania się sadzonki przez narzędzie wyposażone w obie wersje ostrza. Większa średnica rury w przypadku ostrza stożkowego pozwoliła uniknąć zacięć podczas prowadzenia procesu sadzenia, natomiast w przypadku narzędzia wyposażonego w ostrze klinowe kilkakrotnie sadzonka wymagała popchnięcia, by umożliwić jej przemieszczenie przez narzędzie.

11.3. Wnioski użytkowe i dotyczące wdrożenia

Przeprowadzone badania z użyciem dwóch wersji narzędzia pozwoliły stwierdzić, iż narzędzie o średnicy większej zakończone ostrzem stożkowym umożliwia bardziej płynne sadzenie drzewek. Na podstawie zrealizowanych badań, poczynionych obserwacji i otrzymanych wyników stwierdzono, że:

- zarówno w przypadku ostrza klinowego, jak i stożkowego dodatkowym, niezbędnym do prawidłowego przeprowadzenia całego procesu sadzenia narzędziem jest zespół kół dociskowych. Koła te pozwalają dognieść miejsce, w którym posadzone zostało drzewko, usunąć kieszenie powietrzne, a tym samym ustabilizować drzewko w pozycji pionowej i zwiększyć prawdopodobieństwo przyjęcia się sadzonki w glebie.
- Badania prowadzone na potrzeby niniejszej pracy trwały kilka tygodni w okresie letnim. Istnieje potrzeba prowadzenia analogicznych badań w dłuższym horyzoncie czasowym w porze wiosennej, jesiennej oraz zimowej, by w pełni umożliwić ocenę udatności uprawy założonej za pomocą określonej wersji ostrza.
- Należy zauważyć, iż ostrze stożkowe, pomimo geometrii ułatwiającej penetrację, może mieć również tendencję do szybszego zużycia końcówki wgłębnej ze względu na bardziej agresywny charakter swojej pracy.

- Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji potrzeb rynkowych i możliwości wytwórczych różnych podmiotów zainteresowanych tematyką niniejszej pracy wiadomo, że przynajmniej jeden podmiot jest zainteresowany wdrożeniem wyników tejże pracy. Podmiotem tym jest jednostka wchodząca w struktury Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe, a zajmująca się ogólnie pojętą techniką leśną. Wnioskować można, iż jest to dobra rekomendacja, ponieważ odbiorcą wyników niniejszej pracy będzie największe przedsiębiorstwo w Polsce, które zajmuje się gospodarką leśną (Załącznik 3).

11.4. Wnioski dotyczące dalszych badań

Na podstawie przeprowadzonych badań określono kierunki, mogące stanowić bazę do kontynuacji badań:

- Sugeruje się prowadzenie dalszych badań z zastosowaniem innego kształtu narzędzia i/lub układu sadzącego ze zmienioną kinematyką pracy.
- Warto spojrzeć na ten problem w szerszej perspektywie, tj. analizować sadzenie sadzonek drzewek przez aspekt kompletnej maszyny, w miejsce analizy samodzielnego narzędzia sadzącego. Podyktowane jest to faktem, że do pełnego wykorzystania narzędzia będącego przedmiotem niniejszej pracy potrzebna jest jednostka napędowa, która musi mieć możliwość zagregowania opracowanego narzędzia sadzącego do prowadzenia prac nasadzeniowych.
- Również w przyszłości trudnością może być określenie realnego zapotrzebowania rynkowego i opracowanie stosownej, uniwersalnej platformy, ponieważ narzędzia tego typu nie są produktem masowym i kierowane są do ściśle określonej, wąskiej grupy odbiorców.
- Warto rozważyć także zbadanie różnych wersji narzędzia pod kątem ich trwałości, ze szczególnym uwzględnieniem wytrzymałości na ścieranie oraz z uwzględnieniem użycia do jego budowy różnych materiałów konstrukcyjnych, np. stali Hardox 600.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamczyk, F., Szaroleta, M., Michalak, T., Talarczyk, W., & Wąchalowski, G. (2018). Badania nad możliwościami i sposobami wysadzania sadzonek drzew w aspekcie pełnej automatyzacji tego procesu. Etap 1: Analiza sposobów i możliwości automatycznego wysadzania sadzonek drzew oraz opracowanie modelu wirtualnego 3D głowicy wysadzającej z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania PIMR (Raport z zadania etap 1; s. 1–33). Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych.
- [2] Adamczyk, F., Tylek, P., Sowa, J., Walczyk, J., & Tadeusiewicz, R. (2019). The Concept of Construction of a Mobile Automatic Device for Forest Regeneration Tasks and Afforestation of Former Farmland and Reclaimed Areas (s. 13–18).
- [3] Adamczyk, F., Wojciechowski, J., Lewicki, R., Zawada, M., Kromulski, J., Weymann, S., & Mac, J. (2019). Opracowanie funkcjonalności i warunków granicznych automatu oraz metodyki badań eksperymentalnych modeli badawczych podzespołów i prototypu urządzenia (Raport z zadania zadanie 1; s. 1–39). Sieć Badawcza Łukasiewicz - Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych.
- [4] Adamides, G., Katsanos, C., Constantinou, I., Christou, G., Xenos, M., Hadzilacos, T., & Edan, Y. (2017). Design and development of a semi-autonomous agricultural vineyard sprayer: Human-robot interaction aspects. *Journal of Field Robotics*, 34, 20. <https://doi.org/10.1002/rob.21721>
- [5] Akinsunmade, A. (2020). Wykorzystanie metody konduktometrycznej i georadarowej do identyfikacji stopnia ugniecenia wierzchniej warstwy gruntu. *PRZEGŁĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1, 139–143. <https://doi.org/10.15199/48.2020.02.33>
- [6] Almquist, J., & Brandt, A. (2014). Utveckling av automatiserat magasin för planteringsaggregat. Institutionen för produkt- och produktionsutveckling.
- [7] Aniszewska, M. (2010). Przegląd wybranych przesadzarek do drzew. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 05, 18–21.
- [8] A/S, M. (b.d.). Sadzarka Egedal, typ JT, instrukcja obsługi. MASKINFABRIK A/S.
- [9] Bardzajn, W., & Kowalkowski, W. (2016). Wpływ pory sadzenia i technologii produkcji sadzonek na wzrost sosny zwyczajnej w doświadczeniu w Nadleśnictwie Oleśnica. *Sylwan*, 160(2), 127–134.
- [10] Bernadzki, E., & in, i. (2006). Opracowanie zbiorowe pod redakcją Eugeniusza Bernadzkiego. *Lasy i leśnictwo krajów Unii Europejskiej* (A. Arkuszewska, Z. Święcicki, & T. Zygmunt, Red.). Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- [11] Billingsley, J., Visala, A., & Dunn, M. (2008). Robotics in Agriculture and Forestry. W *Springer Handbook of Robotics* (s. 1065–1077). https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_47
- [12] Bisht, V., Salgado, R., & Prezzi, M. (2021). Analysis of Cone Penetration Using the Material Point Method (s. 765–771). https://doi.org/10.1007/978-3-030-64514-4_81
- [13] BV, T. T. A. (2022, maj). Nursery equipment information from the manufacturer. W *Tuinbouw Technisch Atelier BV*. <http://www.tta.eu/products/transplanting/>
- [14] Chudy, R. (2016). Sadzenie express. *Monitor Leśny*, 1–8.
- [15] Danielak, M., Weymann, S., Sobocki, S., Mac, J., Wojciechowski, J., Adamczyk, F., & Szychta, M. (2020). Raport z zadania: Budowa układów sterowania elementami opracowanych modeli badawczych wybranych zespołów roboczych mobilnego automatu (zadanie 5; s. 1–59). Sieć Badawcza Łukasiewicz - Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych.

- [16] Drapalyuk, M., Stasyuk, V., & Zelikov, V. (2022). New designs of universal planting machines for planting seedlings with open and closed root. *Forestry Engineering Journal*, 11, 112–123. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10>
- [17] Dvořák, J., Bystrický, R., Hošková, P., Hrib, M., Jarkovská, M., Kováč, J., Krilek, J., Natov, P., & Natovová, L. (2011). The use of harvester technology in production forests.
- [18] Dvořák, J., & Walczyk, J. (2013). Productivity of timber harvest with the use of a harvester and a chainsaw. *Sylvan*, 157(3), 171–176.
- [19] Engelbrektsson, J., & Stoltz, N. (2014). Comparing the net present value of manual versus mechanized tree planting in southern and northern Sweden. *Kandidatarbeten i skogsvetenskap*, 11, 1–29.
- [20] Ersson, B. T. (2014). Concepts for Mechanized Tree Planting in Southern Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences. https://www.slu.se/globalassets/ew/org/inst/sbt/utbildning/avslutade-phd/ersson_bt_140919.pdf
- [21] Ersson, B. T., Bergsten, U., & Lindroos, O. (2011). The Cost-Efficiency of Seedling Packaging Specifically Designed for Tree Planting Machines. *Silva Fennica*, 45. <https://doi.org/10.14214/sf.108>
- [22] Ersson, B. T., Bergsten, U., & Lindroos, O. (2014). Reloading mechanized tree planting devices faster using a seedling tray carousel. *Silva Fennica*, 48. <https://doi.org/10.14214/sf.1064>
- [23] Ersson, B. T., Jundén, L., Bergsten, U., & Servin, M. (2013). Simulated productivity of one- and two-armed tree planting machines. *Silva Fennica*, 47. <https://doi.org/10.14214/sf.958>
- [24] Ersson, B. T., Laine, T., & Saksa, T. (2018). Mechanized Tree Planting in Sweden and Finland: Current State and Key Factors for Future Growth. *Forests*, 9, 370. <https://doi.org/10.3390/f9070370>
- [25] Ersson, B. T., Sundblad, L.-G., & Manner, J. (2022). Cost analysis of seedling supply systems adapted for mechanized tree planting: A case study from southern Sweden. *Silva Fennica*, 56. <https://doi.org/10.14214/sf.10663>
- [26] Fraszewski, D. (1994). Rozwój sosny zwyczajnej na słabych siedliskach borowych zdegradowanych pożarzyskami. *Sylvan*, 138(06), 95–100.
- [27] Gach, S., Kuczewski, J., & Waszkiewicz, C. (1991). *Maszyny Rolnicze. Elementy Teorii Obliczeń*. SGGW.
- [28] Gallis, C. (2013). Increasing Productivity and Controlling of Work Fatigue in Forest Operations by Using Prescribed Active Pauses: A Selective Review. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 34(1), 103–113.
- [29] Ghaffariyan, M., Stampfer, K., & Sessions, J. (2009). Comparison of three methods to determine optimal road spacing of Forwarder-type logging operations. *Journal of Forest Science*, 55, 423–431.
- [30] Giefig, F., Grzywiński, W., & Kosak, J. (2003). Physical work load of workers during planting using different types of dibbles. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 6(1). <http://www.ejpau.media.pl/volume6/issue1/forestry/art-02.html>
- [31] Grodecki, J. (2007). Usługi leśne—Co dalej? (Cz.1). *Drwal. Pismo Przedsiębiorców Leśnych*, 12, 14–15.
- [32] Grzywiński, W. (2007). *Ergonomia i ochrona pracy w leśnictwie*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu.
- [33] Grzywiński, W., & Hołota, R. (2006). Subjective assessment of the fatigue of forest workers based on japanese questionnaire. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 5(1), 27–37.

- [34] Grzywiński, W., Jelonek, T., & Tomczak, A. (2019). Obciążenie fizyczne na stanowiskach leśniczego i podleśniczego. *Sylvan*, 163(10), 811–819.
- [35] Grzywiński, W., Mederski, P. S., & Bembenek, M. (2014). Porównanie metod określania wydatku energetycznego na przykładzie leśnictwa. *Leśne Prace Badawcze*, 75(4), 417–421. <https://doi.org/DOI: 10.2478/frp-2014-0038>
- [36] Hallongren, Laine, T., Rantala, Saarinen, Strandström, M., Hämäläinen, & Poikela. (2014). Competitiveness of mechanized tree planting in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.881542>
- [37] Hansson, L., Sten, G., Rossander, M., Lideskog, H., Manner, J., van Westendorp, R., Li, S., Eriksson, A., Wallner, A., Rönnqvist, M., Flisberg, P., Edlund, B., Möller, B., & Karlberg, M. (2024). Autoplant—Autonomous Site Preparation and Tree Planting for a Sustainable Bioeconomy. *Forests*, 15, 263. <https://doi.org/10.3390/f15020263>
- [38] Harasimowicz, H. (2001). Porównanie wysokości sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) 1/0 i 2/0 w uprawach leśnych. *Przegląd Leśniczy*, 11(5), 8–9.
- [39] Hauke-Kowalska, M., & Wesoły, W. (2009). Szkółkarstwo leśne od A do Z.
- [40] Hemming, J., Bac, W., van Tuijl, B., Barth, R., Bontsema, J., Pekkeriet, E., & van Henten, E. (2014). A robot for harvesting sweet-pepper in greenhouses. 1–8. <https://www.geysec.es/geystiona/adjs/comunicaciones/304/C01140001.pdf>
- [41] Horvat, D., Zečić, Ž., & Šušnjar, M. (2007). Morphological characteristics and productivity of skidder ECOTRAC 120V. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 28, 11–25.
- [42] Ignaciuk, S., & Zarajczyk, J. (2020). Assessment of selected parameters of sowing quality of vistula parsley seeds with a precision seed drill with a pneumatic seeding system. *Agricultural Engineering*, 24(2), 77–88. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2020-0019>
- [43] Ilmurzyński, E. (1969). Szczegółowa hodowla lasu. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- [44] Ośrodek Techniki Leśnej w. (b.d.). Sadzarka GNKp, instrukcja obsługi. Ośrodek Techniki Leśnej w Jarocinie.
- [45] Johnston, K., Cheung, I. C., Henderson, F., Queen, G., & Lida, K. (2016). Enhancement of Forestry Tree Planting Machine. University of Strathclyde, ME519 Group Project, Mechanical and Aerospace Engineering. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/38462/Enhancement%20of%20%20Forestry%20Tree%20Planting%20MachineRUO%20.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- [46] Józefaciuk, J., & Nowacka, W. (1999). Ćwiczenia z ergonomii i ochrony pracy. SGGW.
- [47] Juliszewski, T., Kiełbasa, P., Zagórda, M., Tomecka, S., Karczewski, J., & Akinniyi, A. (2019). Porównanie wyników badania zagęszczenia gleby uprawnej metodą penetrometryczną i georadarową. *Przegląd Elektrotechniczny*, 95(1), 12–16. <https://doi.org/10.15199/48.2019.01.04>
- [48] Kamiński, J. R. (2007). Analiza parametrów energetycznych ciągnika Ursus 1134. *Inżynieria Rolnicza*, R. 11, nr 3 (91)(3 (91)), 67–73.
- [49] Kankaanhuhta, V. (2014). Quality management of forest regeneration activities [PhD Thesis]. <https://doi.org/10.14214/df.174>
- [50] Kocel, J. (2013). Firmy leśne w Polsce. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- [51] Kocjan, H. (2001). Wpływ różnych sposobów sadzenia na wzrost sosny zwyczajnej [*Pinus sylvestris* L.] w 25-letnim drzewostanie w warunkach siedliskowych boru suchego. *Sylvan*, 145(08), 45–52.
- [52] Kolb, P. (b.d.). Hand Planting Container and Bare-root Tree Seedlings. MSU Extension Forestry Specialist. <https://www.montana.edu/extension/forestry/publications/Hand%20planting%20trees.pdf>

- [53] Kormanek, M., & Dvořák, J. (2021). Ground Pressure Changes Caused by MHT 8002HV Crawler Harvester Chassis. *Croatian journal of forest engineering*, 42. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.844>
- [54] Kormanek, M., & Dvořák, J. (2022). Use of Impact Penetrometer to Determine Changes in Soil Compactness After Entracon Sioux EH30 Timber Harvesting. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 43(2), 325–337. <https://doi.org/DOI:10.5552/crojfe.2022.1054>
- [55] Kormanek, M., & Lasota, J. (2014). Soil compaction studies of selected forest habitats using the dynamic cone penetrometer. *Trendy Lesnickej a environmentalnej techniky a jej aplikacie vo Vyrobnym Procese*, 48–56.
- [56] Kormanek, M., Małek, S., Banach, J., & Durło, G. (2020). Automatyzacja procesu produkcji oraz kontrola parametrów sadzonek hodowanych w szkółkach kontenerowych. W *Nowoczesne Technologie i inżynieria w zrównoważonym użytkowaniu lasu—Monografia* (s. 339–362). Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.
- [57] Kostencki, P., Stawicki, T., & Królicka, A. (2021). Wear of the working parts of agricultural tools in the context of the mass of chemical elements introduced into soil during its cultivation. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(2), 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.11.001>
- [58] Kowalski, S., & in, i. (2007). Opracowanie zbiorowe pod redakcją Stefan Kowalskiego. *Ektomikoryzy—Nowe biotechnologie w polskim szkółkarstwie leśnym*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- [59] Krzaczek, P. (2009). Ocena parametrów energetycznych ciągnika rolniczego JOHN DEERE 6820 z wykorzystaniem diagnostyki pokładowej. *Inżynieria Rolnicza*, R. 13, nr 8(8), 91–98.
- [60] Küpferle, J., Röttger, A., Theisen, W., & Alber, M. (2016). The RUB Tunneling Device – A newly developed test method to analyze and determine the wear of excavation tools in soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 59, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.06.006>
- [61] Laine, T. (2017). Mechanized tree planting in Finland and improving its productivity. *Dissertationes Forestales*, 2017. <https://doi.org/10.14214/df.239>
- [62] Laine, T., Kärhä, K., & Hynönen, A. (2016). A survey of the Finnish mechanized tree-planting industry in 2013 and its success factors. *Silva Fennica*, 50. <https://doi.org/10.14214/sf.1323>
- [63] Laine, T. & Rantala. (2013). Mechanized tree planting with an excavator-mounted M-Planter planting device. *International Journal of Forest Engineering*, 24. <https://doi.org/10.1080/14942119.2013.844884>
- [64] Laine, T., & Saarinen, V.-M. (2014). Comparative study of the Risutec Automatic Plant Container (APC) and Bracke planting devices. *Silva Fennica*, 48. <https://doi.org/10.14214/sf.1161>
- [65] Legesse, A. A., Paramasivam, V., & Selvaraj, S. K. (2021). Design of manually operated multiple-seed planting machine for an Ethiopian environment. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7375–7379. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1119>
- [66] Lejman, K., & Owsiak, Z. (1996a). Analiza parametrów stożka zwężłościomierza. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, zeszyt 425, 121–126.
- [67] Lemecha, M., Napiórkowski, J., & Konat, Ł. (2017). Analysis of wear and tear of working elements with a replaceable cutting Edge in an brasive of soil mass. *Tribologia*, 3, 101–109. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.6144>

- [68] Luoranen, J., & Viiri, H. (2016). Deep planting decreases risk of drought damage and increases growth of Norway spruce container seedlings. *New Forests*, 47. <https://doi.org/10.1007/s11056-016-9539-3>
- [69] Manner, J., & Ersson, B. T. (2021). Mechanized tree planting in Nordic forestry: Simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. *Journal of Forest Science*, 67, 242–246. <https://doi.org/10.17221/203/2020-JFS>
- [70] Mosleh, M., Gharahbagh, E., & Rostami, J. (2013). Effects of relative hardness and moisture on tool wear in soil excavation operations. *Wear*, 302, 1555–1559. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.041>
- [71] Musielski, D., & Kęska, W. (2007). Maszyna do badania przebiegu oporów pracy narzędzi pracujących w gruncie w warunkach polowych. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 52(1), 27–29.
- [72] Napiórkowski, J. (2005). Zużyciowe oddziaływanie gleby na elementy robocze narzędzi rolniczych. *Inżynieria Rolnicza*, R. 9, nr 12, 3–171.
- [73] Napiórkowski, J., & Kołakowski, K. (2010). Wpływ rodzaju warstwy wierzchniej na przebieg zużywania dłut lemieszki płużnych. *Inżynieria Rolnicza*, R. 14, nr 4(4), 171–178.
- [74] Neruda, J., Simanov, V., Klvač, R., Skoupý, A., Kadlec, J., Zemánek, T., & Nevrla, P. (2022). Technika a technologie v lesnictví.
- [75] Niemcewicz, A. (1999). Wybrane zagadnienia mechanizacji w zagospodarowaniu lasu (przygotowanie gleby, sadzenie i pielęgnacja na zrębach zupełnych i gruntach porolnych). 338–344.
- [76] Nieuwenhuis, M., & Egan, D. (2002). An Evaluation and Comparison of Mechanised and Manual Tree Planting on Afforestation and Reforestation Sites in Ireland. *International Journal of Forest Engineering*, 13, 11–23.
- [77] Nosal, S., & Hernes, J. (2011). Badania eksploatacyjne odporności na ścieranie blach wykładzinowych stosowanych w kole czerpakowym koparki typu SRs 1200. *Tribologia*, 4, 219–228.
- [78] Nowak, P. (2021). Limited space for trees in the urban planning of the city (on the example of selected locations in Szczecin and Goleniów). *Przestrzeń i Forma*, 47, 123–146.
- [79] Owsiak, Z., & Lejman, K. (2008). Przyrosty zwięzłości gleby lekkiej ugniatanej wielokrotnie i wielośladowo. *Inżynieria Rolnicza*, R. 12, nr 5(103)(5(103)), 153–160.
- [80] Paris, B., Vandorou, F., Balafoutis, A. T., Vaiopoulos, K., Kyriakarakos, G., Manolakos, D., & Papadakis, G. (2022). Energy use in open-field agriculture in the EU: A critical review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112098. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112098>
- [81] Pinto, J., Marshall, J., Dumroese, R. K., Davis, A., & Cobos, D. (2011). Establishment and growth of container seedlings for reforestation: A function of stocktype and edaphic conditions. *Forest Ecology and Management*, 261, 1876–1884. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.010>
- [82] Rantala, J., Harstela, P., Saarinen, V.-M., & Tervo, L. (2009). A Techno-Economic Evaluation of Bracke and M-Planter Tree Planting Devices. *Silva Fennica*, 43. <https://doi.org/10.14214/sf.186>
- [83] Risutec. (2022a, maj). Softwood planting machines. W Risutec.fi. <http://www.risutec.fi/en/products/softwood>
- [84] Risutec. (2022b, czerwiec). Planting device information from the manufacturer. W Risutec.fi. <http://www.risutec.fi/en/products/risutec-pm100>

- [85] Sabo, A., & Poršinsky, T. (2005). Skidding of fir roundwood by Timberjack 240C from selective forests of Gorski Kotar. *Croatian Journal of Forest Engineering* (crojfe@sumfak.hr); Vol.26 No.1, 26.
- [86] Santiago, J.-L., Rivas, E., Sanchez, B., Buccolieri, R., & Martin, F. (2017). The Impact of Planting Trees on NO_x Concentrations: The Case of the Plaza de la Cruz Neighborhood in Pamplona (Spain). *Atmosphere*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/atmos8070131>
- [87] Shamshiri, R., Weltzien, C., Hameed, I., Yule, I., Grift, T., Balasundram, S., Pitonakova, L., Ahmad, D., & Chowdhary, G. (2018). Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11, 1–14. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4278>
- [88] Sobocki, S., Adamczyk, F., Tylek, P., Szaroleta, M., Żurowski, K., Kormanek, M., Szewczyk, G., Tabor, S., Zwierzyński, M., Kaźmierczak, M., & Mac, J. (2023). A Seedling Collection Unit of a Mobile Automatic Device for Forest Tree Planting—An Extended Operating Concept. *MDPI*, 14(12), 1–19. <https://doi.org/10.3390/f14122420>
- [89] Sobocki, S., Adamczyk, F., Tylek, P., Szaroleta, M., Żurowski, K., Mac, J., & Motyl, M. (2024, 20.09). Nowa koncepcja zespołu podawania sadzonek w automacie sadzącym RoboFoR. X Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Użytkowanie maszyn rolniczych i leśnych - badania naukowe i dydaktyka”, Zakopane.
- [90] Sowa, J. M., & Kulak, D. (2000). Związki techniki pracy z poziomem techniki z poziomem wydatku energetycznego operatorów pilarek spalinowych (M. Suwała & S. Rządowski, Red.; s. 425–432).
- [91] Stelzer, H. (2019, czerwiec). How to Plant Forest Tree Seedlings. Extension University of Missouri. <https://extension.missouri.edu/publications/g5008>
- [92] Szabla, K., & Pabian, R. (2009). Szkółkarstwo kontenerowe. Nowe technologie i techniki w szkółkarstwie leśnym. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- [93] Szaroleta, M. (2022). Market overview in terms of the offered solutions of equipment and machines for planting seedlings with a covered root system. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 67(1), 9–14. <https://doi.org/10.53502/XJHQ3832>
- [94] Szaroleta, M., Legutko, S., Kapela, D., Rogacki, R., & Mac, J. (2024). Laboratory Tests of Two Versions of a Planting Tool for Seedlings with a Covered Root System – Comparison, Part 1. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 69(2), 19–26. <https://doi.org/10.53502/jraae-196537>
- [95] Szaroleta, M., Legutko, S., Kapela, D., Rogacki, R., Szulc, T., & Adamczyk, F. (2024, 20.09). Wpływ konstrukcji narzędzia sadzącego na przebieg procesu sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym. X Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Użytkowanie maszyn rolniczych i leśnych - badania naukowe i dydaktyka”, Zakopane.
- [96] Szychta, M., Smela, A., Kapela, D., Szaroleta, M., Szulc, T., Sobocki, S., Mac, J., Wojciechowski, J., & Adamczyk, F. (2020). Badania symulacyjne zachowań kinematycznych i wyznaczenie funkcji wymuszeń; opracowanie modeli obliczeniowych i przeprowadzenie analiz inżynierskich konstrukcji nośnych mobilnego automatu (Raport z zadania zadanie 3; s. 1–74). Sieć Badawcza Łukasiewicz - Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych.
- [97] Szychta, M., Wojciechowski, J., Sobocki, S., Danielak, M., Weymann, S., Wąchalowski, G., Kapela, D., Szaroleta, M., & Adamczyk, F. (2021). Współdział w opracowaniu dokumentacji oraz kompletacja napędów i sterowania hydraulicznego oraz pneumatycznego (Raport z zadania zadanie 8; s. 1–38). Sieć Badawcza Łukasiewicz - Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych.

- [98] Szychta, M., Wojciechowski, M., Sobocki, S., Danielak, M., Weymann, S., Kaźmierczak, M., Domagała, P., Zawada, M., Mac, J., Szulc, T., Szaroleta, M., & Adamczyk, F. (2021). Badania eksploatacyjne wybranych zespołów roboczych automatu oraz platformy automatu w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych (Raport z zadania zadanie 9; s. 1–27). Sieć Badawcza Łukasiewicz - Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych.
- [99] Szyguła, J., Barzdajn, W., & Kowalkowski, W. (2012). Wpływ sposobu sadzenia na wzrost uprawy sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) założonej na gruncie porolnym. *Sylvan*, 156(2), 89–99. <https://doi.org/10.26202/sylvan.2011032>
- [100] Szymański, S. (1982). Wzrost niektórych gatunków drzew leśnych w pierwszych 10 latach życia na siedlisku boru mieszanego świeżego. *Sylvan*, 7, 11–29.
- [101] Ślósarczyk, W. (b.d.). Tarcie w niektórych parach kinematycznych—Klin. Tarcie w łożyskach. Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Pobrano 3 lipiec 2022, z <https://home.agh.edu.pl/~wslosar/osmy.html>
- [102] Tadeusiewicz, R., Tylek, P., Adamczyk, F., Pietrzykowski, M., Szewczyk, G., Szychta, M., Kiełbasa, P., Sobocki, S., Danielak, M., Juliszewski, T., Sowa, J., Walczyk, J., & Gościańska-Łowińska, J. (2022). RoboFoR – automat do sadzenia drzew. Podstawowe moduły i właściwości funkcjonalne. *Nauka Tech. Technol.*, 6, 119–136. https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9_7
- [103] Tylek, P., Pietrzykowski, M., Walczyk, J., Juliszewski, T., & Kwaśniewski, D. (2017). Root Biomass and Morphological Characterization of Energy Willow Stumps. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 38, 47–54.
- [104] Tylek, P., Szewczyk, G., Kormanek, M., Leszczyński, K., Wojciechowski, J., Adamczyk, F., Szychta, M., Sobocki, S., & Szaroleta, M. (2023). Mobile automatic device for forest regeneration and afforestation of former agricultural and reclaimed areas. W *Mobilné energetické prostriedky – Hydraulika – Životné prostredie – Ergonómia mobilných strojov* (s. 191–200). Technická Univerzita vo Zvolene.
- [105] Tylek, P., Walczyk, J., Sowa, J., Szewczyk, G., Kormanek, M., Pietrzykowski, M., Juliszewski, T., Kiełbasa, P., Szychta, M., Adamczyk, F., Szczepaniak, J., Szulc, T., & Tadeusiewicz, R. (2020). Koncepcja automatycznej sadzarki do sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym. W *Nowoczesne Technologie i inżynieria w zrównoważonym użytkowaniu lasu—Monografia* (s. 451–464). Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.
- [106] Tylek, P., Wojciechowski, J., Adamczyk, F., Szychta, M., Walczyk, J., Szewczyk, G., Kiełbasa, P., Kormanek, M., & Mateusiak, Ł. (2021). Drive and hydraulic control of the planting module of the automatic forestry planter (s. 242–250).
- [107] Vanags, C., Minasny, B., & Mcbratney, A. (2012). The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical resistance. *Open Journal of Soil Science*, Vol.2(No.2).
- [108] Więsik, J., & Aniszewska, M. (2011). Urządzenia techniczne w produkcji leśnej—Tom I – Urządzenia do hodowli i ochrony lasu: T. I. SGGW.
- [109] Wojciechowski, J., Mac, J., Zawada, M., Danielak, M., Adamczyk, F., Sobocki, S., Kaźmierczak, M., Szaroleta, M., & Szychta, M. (2022). Ocena jakości procesów agrotechnicznych; celowana promocja automatu (Raport z zadania zadanie 11; s. 1–30). Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny.
- [110] Wojciechowski, J., Mac, J., Zawada, M., Danielak, M., Adamczyk, F., Sobocki, S., Kaźmierczak, M., Szaroleta, M., Szychta, M., Kapela, D., & Domagała, P. (2022). Badania eksperymentalne platformy automatu z zastosowaniem metod tensometrii oporowej, weryfikacja modeli obliczeniowych, ocena trwałości konstrukcji (Raport z zadania zadanie 12; s. 1–58). Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny.

- [111] Woś, B., Szulc, T., Szychta, M., Szczepaniak, J., Wojciechowski, J., Danielak, M., Adamczyk, F., Tadeusiewicz, R., Juliszewski, T., Kielbasa, P., Pietrzykowski, M., Sowa, J., Walczyk, J., Kormanek, M., Szewczyk, G., & Tylek, P. (2022). Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 44, 1–14. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2023.1722>
- [112] Zachara, T., & Gil, W. (2020). Zagadnienia hodowli lasu na łamach „Sylwana” w latach 1820–2020. *Sylwan*, 164(12), 996–1010. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2020119>
- [113] Zarządzenie Nr 99 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych. Katalogi norm czasu pracy dla prac leśnych. (2022, marzec). Ośrodek Rozwojowo - Wdrożeniowy Lasów Państwowych w Bedoniu. https://www.lasy.gov.pl/pl/informacje/zamowienia-publiczne-zarzadzania-decyzje/copy_of_zarzadzania-i-decyzje-do-19-stycznia-2010-r/1981_2004/z99-2003
- [114] https://tech-rol.eu/images/2022/TROL_2-2022/03-TROL_2-2022_art-3.pdf
- [115] Kostur sadzący. (2025). [Sklep]. Chinagros.En.Made-in-China. <https://chinagros.en.made-in-china.com/productimage/WSpxJzYToLrA-2f1j00tFZQsuMhagrz/China-Seeding-Tool-Handheld-Transplanter-Stainless-Steel-Planter-Machine-Seedling-Machine-Seeder-Vegetable-Seed-Planter.html>
- [116] Zbytek, Z., & Talarczyk, W. (2008). Wpływ parametrów roboczych wielofunkcyjnego narzędzia uprawowo-pielęgnacyjnego na obciążenia eksploatacyjne. *Inżynieria Rolnicza*, 5(103), 385–393.
- [117] Sadzarka leśna. (b.d.). Pobrano 21 maj 2025, z <https://www.sadzarkalesna.pl/>
- [118] Sadzarka leśna jednorzędowa. (b.d.). F.H.U.P. A-Z MOT-LEŚNIK WOJCIECH MAGDZIARZ. Pobrano 21 maj 2025, z <https://lesnik.trz.pl/katalog10/sadzarki-lesne>
- [119] Experimental Seedling Planting. (b.d.). American Sugar Cane League - Experimental Seedling Planting. Pobrano 22 maj 2025, z <https://www.amscl.org/experimental-seedling-planting-2021/>
- [120] PL-10 tree planting machine. (b.d.). Pobrano 22 maj 2025, z <https://www.damcon.com/machine/pl-10-compact-plant-machine/>
- [121] Fother Gills—Sadzarka. (b.d.). [Sklep]. Pobrano 22 maj 2025, z <https://www.fothergills-trees.co.uk/products/christmas-tree-planting-machine>
- [122] Sadzarka ręczna pchana. (b.d.). Alibaba.com. Pobrano 4 luty 2024, z https://www.alibaba.com/product-detail/Hand-push-manual-sowing-machine-onion_60739784151.html
- [123] Risutec ASP-720. (b.d.). Pobrano 21 maj 2025, z <https://www.forsilvitech.com/article/mechanised-pitting-and-planting-with-the-risutec-asp-720/>
- [124] Risutec ASP-720. (b.d.). [Mp4]. Pobrano 5 kwiecień 2024, z Risutec ASP-720. (b.d.). Pobrano 21 maj 2025, z <https://www.forsilvitech.com/article/mechanised-pitting-and-planting-with-the-risutec-asp-720/>
- [125] TreeRover—A Tree Planting Robot. (b.d.). [Mp4]. Pobrano 24 styczeń 2024, z <https://www.youtube.com/watch?v=uPNf37S35oY>
- [126] Ręczny świder. (b.d.). [Mp4]. Pobrano 16 marzec 2025, z https://www.youtube.com/watch?v=x6Plcjl_muY
- [127] Bracke P11.a—Planter. (2012, maj 31). [Mp4]. <https://www.youtube.com/watch?v=bC8BAVWlies>
- [128] Bracke P11.a—Planter. (b.d.). Broszura Producenta. Pobrano 20 maj 2025, z <https://www.brackeforest.com/products/planters-seeders/165-bracke-p11-a-planting-machine>

- [129] M-Planter. (b.d.). Pobrano 10 marzec 2023, z <https://forstservice-brennholz.de/m-planter-pflanzaggregate/>
- [130] Szychta, M., Rogacki, R., Danielak, M., Kapela, D., Wojciechowski, J., Szulc, T., Adamczyk, F., Tylek, P., Walczyk, J., Szewczyk, G., & Kormanek, M. (2023). Wynalazek pn. „Kostur do sadzenia sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym” (Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej Patent No. PL 242910 B1).
- [131] Weremczuk, D., Weremczuk, J., & Weremczuk, R. (2008). Sadzarka karuzelowa do rozsady roślin z zakrytym systemem korzeniowym (Urząd Patentowy RP Patent No. Pat.197368).
- [132] Kormanek, M. (2008). The effect of load and number of passes of skidding tractors on compaction of forest soils. *Sylvan*, 10, 48–55.
- [133] Szaroleta, M., Adamczyk, F., Mandat, Ł., Rogacki, R., & Szulc, T. (2025). Carbon footprint generated during plant production – literature review and own research. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 70(1). <https://doi.org/10.53502/jraae-208461>

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Model CAD 3D robota przeznaczonego do sadzenia drzewek z zakrytym systemem korzeniowym [105]	7
Rys. 1.2. Model CAD 3D narzędzia sadzącego będącego składową (stanowiącego jeden z podzespołów) robota do sadzenia drzewek [105]	9
Rys. 2.1. Narzędzie do oceny zwięzłości gleby wraz z elementami składowymi (po lewej), przykładowe miejsce zastosowania narzędzia (po prawej) [56]	10
Rys. 2.2. Opór gleby na różnym podłożu podczas penetracji narzędziem [54]	11
Rys. 2.3. Przykład ręcznego kostura stosowanego do sadzenia drzewek [119].....	12
Rys. 2.4. Rodzaje klinów zastosowanych w prowadzonym badaniu [71]	14
Rys. 2.5. Wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań – przebieg siły oporu penetracji w funkcji głębokości penetracji [71]	14
Rys. 2.6. Przykład sadzarki przeznaczonej do przesadzania dużych, wieloletnich drzew, zamontowanej na samochodzie ciężarowym [7]	15
Rys. 2.7. Element roboczy pracujący w glebie wyposażony w kanał doprowadzający pod ciśnieniem powietrze do gleby [75].....	16
Rys. 2.8. Zobrazowanie zależności siły reakcji pochodzącej od ziemi od kąta rozwarcia zagłębianego stożka [opracowanie własne]	17
Rys. 2.9. Sadzarka GNKp [44].....	18
Rys. 2.10. Sadzarka Egedal podczas pracy z udziałem dwóch operatorów. Zilustrowano różne sposoby zainstalowania stanowisk roboczych [8]	19
Rys. 2.11. Kostur Huffa z wygiętym ostrzem [30].....	20
Rys. 2.12. Sadzarki wykorzystywane w Finlandii, od lewej: Bracke P11.a, M-Planter, Risutec TK-200 [62]	21
Rys. 2.13. Sadzarka dwurzędowa o oznaczeniu RZS-2 zawieszona na ciągniku podczas przygotowania do pracy [117].....	23
Rys. 2.14. Sadzarka leśna jednorzędowa [118]	24
Rys. 2.15. Ręczne urządzenie sadzące przedstawione w trzech fazach: faza zagłębiania zamkniętego narzędzia, faza zaopatrzenia narzędzia w sadzonkę, faza otwarcia szczęk i pozostawienia sadzonki w ziemi [115]	25
Rys. 2.16. Stożkowa końcówka ręcznego urządzenia sadzącego z otwartymi za pomocą cięgieł trzema szczękami [115].....	25
Rys. 2.17. Eksperymentalna sadzarka dwustanowiskowa podczas próby polowej [119]	26
Rys. 2.18. Stanowisko pracy operatora dwustanowiskowej eksperymentalnej sadzarki [119].....	27
Rys. 2.19. Sadzarka marki Damcon, wersja jednorzędowa [120]	28
Rys. 2.20. Sadzarka marki Damcon, wersja dwurzędowa [120].....	28
Rys. 2.21. Sadzarka marki Damcon, wersja czterorzędowa [120]	29
Rys. 2.22. Sadzarka Fothergills trees z operatorem podczas pracy [121].....	30
Rys. 2.23. Sadzarka Risutec ASP-720 zamontowana na koparce gąsienicowej, podczas pracy [83]	31
Rys. 2.24. Widok robota TreeRover [125].....	31
Rys. 2.25. Widok stopki dogniatającej miejsce sadzenia [125]	32
Rys. 2.26. Ręczny świder zamocowany do wkrętarki podczas wykonywania otworu w glebie [126]	32
Rys. 2.27. Sadzarka Bracke P11.a zamontowana na wysięgniku koparki podczas wykonywania operacji sadzenia [127].....	33
Rys. 2.28. Operator sadzarki Bracke P11.a podczas uzupełniania zasobnika sadzonkami [127] ..	34

Rys. 2.29. Sadzarka M-Planter zamocowana na wysięgniku koparki w chwili sadzenia sadzonki w ziemi [129]	35
Rys. 2.30. Zasobnik sadzarki M-Planter z częściowo uzupełnionym zasobem sadzonek [129]	35
Rys. 3.1. Schemat blokowy wskazujący składowe poszukiwania luki badawczej.....	39
Rys. 3.2. Schemat blokowy postępowania podczas realizacji kolejnych kroków pracy doktorskiej	40
Rys. 4.1. Średnia zwężłość ziemi po przejazdach forwardera T1010 bez ładunku [132]	41
Rys. 4.2. Model obliczeniowy CAD 3D układu sadzącego z nową wersją ostrza [opracowanie własne].....	43
Rys. 4.3. Siatka MES nałożona na model obliczeniowy układu sadzącego [opracowanie własne]	44
Rys. 4.4. Przypadek obliczeniowy LC_1 - wbijanie narzędzia sadzącego w kamień [opracowanie własne].....	45
Rys. 4.5. Przypadek obliczeniowy LC_2 - wbijanie narzędzia sadzącego w ziemię pozrębową [opracowanie własne]	45
Rys. 4.6. Przypadek obliczeniowy LC_3 - wleczenie zagłębionej części stałej w glebie [opracowanie własne].....	46
Rys. 4.7. Przypadek obliczeniowy LC_4 - rozchylenie szczęk w ziemi, siła 2500 N na stronę [opracowanie własne].....	46
Rys. 4.8. Przypadek obliczeniowy LC_5 - kombinacja obciążeń części stałej kostura [opracowanie własne].....	47
Rys. 4.9. Narzędzie sadzące w wersji pierwszej (po prawej) oraz w wersji drugiej (po lewej) [opracowanie własne].....	48
Rys. 4.10. Narzędzie sadzące w wersji pierwszej zamontowane na ramie [opracowanie własne]	49
Rys. 4.11. Zbiornik wypełniony ziemią, przeznaczony do zagłębiania w nim narzędzia sadzącego [opracowanie własne]	50
Rys. 4.12. Czujnik siły DEE 5J37303 (po lewej) oraz miernik AXIS FB00 (po prawej)	50
Rys. 4.13. Zestaw pomiarowy miernika oraz czujnika z dołączoną płytką dociskową. [opracowanie własne].....	51
Rys. 4.14. Narzędzie sadzące z ostrzem zabezpieczonym przed otwarciem podczas zagłębiania [opracowanie własne].....	51
Rys. 4.15. Model funkcjonalny narzędzia sadzącego zamocowany do ramy pośredniej umożliwiającej zagregowanie z ciągnikiem rolniczym [opracowanie własne]	52
Rys. 4.16. Rama z narzędziem sadzącym połączona pośrednio z ciągnikiem z użyciem ramy pomiarowej [opracowanie własne].....	53
Rys. 4.17. Model CAD 3D ramy pomiarowej w widoku izometrycznym – rozmieszczenie czujników typu S w konstrukcji [133]	54
Rys. 4.18. Model CAD 3D ramy pomiarowej w przekroju – rozmieszczenie czujników typu S w konstrukcji [opracowanie własne] [133]	54
Rys. 4.19. Czujnik typu S o oznaczeniu H3-C3-5.0t-6B, o zakresie pomiarowym do 5t, który wchodzi w skład oprzyrządowania ramy pomiarowej [133]	55
Rys. 4.20. Czujnik ciśnienia Wika o zakresie pomiarowym od 0 do 250 barów.....	55
Rys. 4.21. Miejsce pomiaru ciśnienia w układzie podczas zagłębiania narzędzia [opracowanie własne].....	56
Rys. 4.22. Czujnik linkowy, model Kubler D5.3501.A331.0000.....	56
Rys. 4.23. Czujnik typu linkowego zamontowany do ramy podczas prowadzenia badań w warunkach rzeczywistych (linia niebieska) [opracowanie własne].....	57
Rys. 4.24. Skrzynka pomiarowa HBM QuantumX MX840B (widok części zasilającej) [opracowanie własne].....	57

Rys. 4.25. Skrzynka pomiarowa HBM QuantumX MX840B (widok od frontu) [opracowanie własne].....	58
Rys. 4.26. Pole doświadczalne, na którym prowadzono badania w warunkach rzeczywistych [opracowanie własne].....	58
Rys. 4.27. Pole doświadczalne po uprawie agregatem uprawowym na głębokości 15 cm [opracowanie własne].....	59
Rys. 4.28. Obciążenie ciągnika marki Kubota o masie 47 kg zastosowane podczas prowadzenia badań [opracowanie własne].....	59
Rys. 4.29. Obciążniki ciągnika marki Kubota o masie jednostkowej 47 kg w liczbie sześciu sztuk, po 3 sztuki na stronę ramy [opracowanie własne].....	60
Rys. 4.30. Sadzonki dwuletnie iglaste (sosna) – przedstawienie szerokości korony sadzonek [opracowanie własne].....	61
Rys. 4.31. Sadzonki dwuletnie iglaste (sosna) – przedstawienie wysokości sadzonek [opracowanie własne].....	61
Rys. 4.32. Sadzonki dwuletnie iglaste – przedstawienie wysokości sadzonek w przybliżeniu [opracowanie własne].....	62
Rys. 4.33. Sadzonki trzyletnie liściaste – przedstawienie szerokości korony sadzonek [opracowanie własne].....	62
Rys. 4.34. Sadzonki trzyletnie liściaste (dąb) – przedstawienie wysokości sadzonek [opracowanie własne].....	63
Rys. 4.35. Sadzonki trzyletnie liściaste (buk) – przedstawienie wysokości sadzonek [opracowanie własne].....	63
Rys. 4.36. Przejazd z zawieszonym agregatem uprawowym celem spulchnienia i ujednolicenia gleby [opracowanie własne].....	64
Rys. 4.37. Ustawianie ramy pomiarowej oraz ramy pośredniej równoległe do podłoża w punkcie startowym [opracowanie własne].....	64
Rys. 5.1. Narzędzie sadzące w postaci obrotowego wiertła; widok z przodu (po lewej), widok izometryczny (po prawej) [opracowanie własne].....	66
Rys. 5.2. Narzędzie sadzące w postaci obrotowego wiertła; widok w przekroju końcówki wgłębnej [opracowanie własne].....	67
Rys. 5.3. Narzędzie sadzące z ostrzem w postaci klina z unoszonymi ramionami zamontowane na mechanizmie przegubowym pozwalającym na ustawienie narzędzia pod kątem względem powierzchni gleby; pozycja sadzenia (po lewej), pozycja początkowa (po prawej) [opracowanie własne].....	68
Rys. 5.4. Narzędzie sadzące w formie rury cylindrycznej z płytką wgłębną pełniącą rolę zaślepki dla sadzonki; widok z profilu (z lewej), widok izometryczny (po prawej) [opracowanie własne].....	68
Rys. 5.5. Koncepcja narzędzia wykorzystująca kinematykę pracy pierwowzoru wyposażoną w rurę o większym przekroju poprzecznym oraz końcówkę wgłębną w kształcie stożka; widok z przodu (po lewej), widok z profilu (po prawej) [opracowanie własne].....	69
Rys. 5.6. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_1a, widok izometryczny z przodu [opracowanie własne].....	72
Rys. 5.7. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_1b, widok ostrza sadzącego [opracowanie własne].....	72
Rys. 5.8. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_1c, widok izometryczny z tyłu [opracowanie własne].....	73
Rys. 5.9. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_2a, widok izometryczny z przodu [opracowanie własne].....	73

Rys. 5.10. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_2b, widok ostrza sadzącego [opracowanie własne]	74
Rys. 5.11. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_2c, widok narzędzia sadzącego z tyłu [opracowanie własne]	74
Rys. 5.12. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_3a, widok izometryczny z przodu [opracowanie własne]	75
Rys. 5.13. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_3b, widok izometryczny z tyłu [opracowanie własne]	75
Rys. 5.14. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_3c, widok narzędzia sadzącego z tyłu [opracowanie własne]	76
Rys. 5.15. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_4a, widok izometryczny z przodu [opracowanie własne]	76
Rys. 5.16. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_4b, widok narzędzia z przodu [opracowanie własne]	77
Rys. 5.17. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_4c, widok izometryczny z tyłu [opracowanie własne]	77
Rys. 5.18. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_5a, widok izometryczny z przodu [opracowanie własne]	78
Rys. 5.19. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_5b, widok ostrza z przodu [opracowanie własne]	78
Rys. 5.20. Naprężenia na modelu układu sadzącego, przypadek obciążenia LC_5c, widok izometryczny z tyłu [opracowanie własne]	79
Rys. 7.1. Stanowisko pomiarowe; narzędzie sadzące zagłębione w zbiorniku wraz z zestawem pomiarowym [opracowanie własne]	82
Rys. 7.2. Wypoziomowana płytka dociskowa przyłożona do kołnierza narzędzia sadzącego [opracowanie własne]	83
Rys. 7.3. Dokonywanie pomiaru zagłębienia narzędzia sadzącego po zagłębieniu zadaną wartością siły [opracowanie własne]	83
Rys. 7.4. Narzędzie z ostrzem klinowym zamocowane na ramie pośredniej wraz z obciążnikami [opracowanie własne]	85
Rys. 7.5. Narzędzie z ostrzem klinowym zagłębione w glebie podczas otwierania szczęk [opracowanie własne]	85
Rys. 7.6. Narzędzie z ostrzem klinowym zagłębione w glebie z zamkniętymi szczękami [opracowanie własne]	86
Rys. 7.7. Narzędzie z ostrzem stożkowym zagłębione w glebie podczas otwierania szczęk [opracowanie własne]	86
Rys. 7.8. Narzędzie z ostrzem klinowym podczas zagłębienia, widok od lewej strony [opracowanie własne]	87
Rys. 7.9. Narzędzie z ostrzem stożkowym podczas zagłębienia, widok od prawej strony [opracowanie własne]	87
Rys. 7.10. Narzędzie z ostrzem stożkowym zagłębione w gruncie z zamkniętymi szczękami [opracowanie własne]	87
Rys. 7.11. Narzędzie z ostrzem stożkowym w momencie otwierania szczęk i wysadzania sadzonki sosnowej, widok od frontu [opracowanie własne]	88
Rys. 7.12. Narzędzie z ostrzem stożkowym w momencie otwierania szczęk i wysadzania sadzonki sosnowej, widok od prawej strony [opracowanie własne]	88
Rys. 7.13. Sadzonka sosnowa po wysadzeniu narzędziem z ostrzem klinowym [opracowanie własne]	88

Rys. 7.14. Narzędzie z ostrzem klinowym w momencie pełnego zagłębienia [opracowanie własne]	89
Rys. 7.15. Narzędzie z ostrzem klinowym w momencie otwierania szczęk i wysadzania sadzonki sosnowej [opracowanie własne]	89
Rys. 7.16. Narzędzie sadzące zamontowane na ramie pośredniej wraz z kołami dociskowymi [opracowanie własne]	90
Rys. 7.17. Narzędzie sadzące zamontowane na ramie pośredniej wraz z kołami dociskowymi, widok z profilu [opracowanie własne]	90
Rys. 7.18. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym zagłębione w glebie [opracowanie własne]	91
Rys. 7.19. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym zagłębione w glebie, widok z profilu [opracowanie własne]	91
Rys. 7.20. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym zagłębione w glebie, widok z profilu z sadzonką sosnową wewnątrz narzędzia [opracowanie własne]	92
Rys. 7.21. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym zagłębione w glebie, widok z góry z sadzonką sosnową wewnątrz narzędzia [opracowanie własne]	92
Rys. 7.22. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym z otwartymi szczękami [opracowanie własne]	93
Rys. 7.23. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym, z otwartymi szczękami, widok z profilu z sadzonką sosnową wewnątrz narzędzia [opracowanie własne]	93
Rys. 7.24. Narzędzie sadzące z ostrzem stożkowym z otwartymi szczękami zaraz po wysadzeniu sadzonki w ziemi i dognieceniu kołami dociskowymi [opracowanie własne]	94
Rys. 7.25. Sadzonka sosnowa zaraz po wysadzeniu narzędziem z ostrzem stożkowym i dognieceniu kołami dociskowymi [opracowanie własne]	94
Rys. 7.26. Narzędzie z ostrzem klinowym zamontowane na ramie pośredniej [opracowanie własne]	95
Rys. 7.27. Narzędzie z ostrzem klinowym zagłębione w ziemi wraz z sadzonką sosnową umieszczoną wewnątrz [opracowanie własne]	95
Rys. 7.28. Narzędzie z ostrzem klinowym zagłębione w glebie wraz z sadzonką sosnową umieszczoną wewnątrz, widok z boku [opracowanie własne]	96
Rys. 7.29. Narzędzie z ostrzem klinowym z otwartymi szczękami w momencie wysadzania sadzonki sosnowej w ziemi [opracowanie własne]	96
Rys. 7.30. Sadzonka sosnowa po wysadzeniu w glebie narzędziem wyposażonym w ostrze klinowe i dogniecioną kołami dociskowymi [opracowanie własne]	97
Rys. 7.31. Sadzonka sosnowa po wysadzeniu w ziemi narzędziem wyposażonym w ostrze klinowe i dogniecioną kołami dociskowymi, widok z góry [opracowanie własne]	97
Rys. 7.32. Sadzonki sosnowe osadzone w ziemi w szyku z użyciem narzędzia wyposażonego w ostrze klinowe [opracowanie własne]	98
Rys. 7.33. Sadzonka sosnowa w momencie otwierania szczęk narzędzia z ostrzem klinowym [opracowanie własne]	98
Rys. 8.1. Wartość zagłębienia narzędzia z ostrzem klinowym oraz stożkowym; pojedyncze kroki oraz wartości skumulowane – próba pierwsza [opracowanie własne]	100
Rys. 8.2. Wartość zagłębienia narzędzia z ostrzem klinowym oraz stożkowym; pojedyncze kroki oraz wartości skumulowane – próba druga [opracowanie własne]	101
Rys. 8.3. Wartość zagłębienia narzędzia z ostrzem klinowym oraz stożkowym; pojedyncze kroki oraz wartości skumulowane – próba trzecia [opracowanie własne]	101
Rys. 8.4. Wartość ciśnienia w układzie hydraulicznym podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne]	102

Rys. 8.5. Wartość siły pochodzącej od oporu gleby podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne].....	103
Rys. 8.6. Wartość osiągniętej głębokości względnej podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne].....	103
Rys. 8.7. Wartość ciśnienia w układzie hydraulicznym podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne].....	104
Rys. 8.8. Wartość siły pochodzącej od oporu gleby podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne].....	104
Rys. 8.9. Wartość osiągniętej głębokości względnej podczas pracy z ostrzem w wersji klinowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne].....	105
Rys. 8.10. Wartość ciśnienia w układzie hydraulicznym podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne]	105
Rys. 8.11. Wartość siły pochodzącej od oporu gleby podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne].....	106
Rys. 8.12. Wartość osiągniętej głębokości względnej podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (bez sadzenia sadzonek) [opracowanie własne].....	106
Rys. 8.13. Wartość ciśnienia w układzie hydraulicznym podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne]	107
Rys. 8.14. Wartość siły pochodzącej od oporu gleby podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne].....	107
Rys. 8.15. Wartość osiągniętej głębokości względnej podczas pracy z ostrzem w wersji stożkowej (z sadzeniem sadzonek) [opracowanie własne].....	108
Rys. 8.16. Wartość zagłębienia poniżej poziomu gleby podczas zagłębienia narzędzia z ostrzem klinowym w pierwszym przejeździe [opracowanie własne].....	111
Rys. 8.17. Wartość zagłębienia poniżej poziomu gleby podczas zagłębienia narzędzia z ostrzem klinowym w drugim przejeździe [opracowanie własne]	111
Rys. 8.18. Wartość zagłębienia poniżej poziomu gleby podczas zagłębienia narzędzia z ostrzem stożkowym w pierwszym przejeździe [opracowanie własne].....	112
Rys. 8.19. Wartość zagłębienia poniżej poziomu gleby podczas zagłębienia narzędzia z ostrzem stożkowym w drugim przejeździe [opracowanie własne]	112
Rys. 8.20. Wartość zagłębienia poniżej poziomu gleby dla narzędzia z dwiema wersjami ostrza dla obu przejazdów [opracowanie własne].....	113
Rys. 8.22. Porównanie rozkładu wartości zagłębienia dla ostrza w kształcie stożka i w kształcie klina [opracowanie własne].....	116
Rys. 8.23. Porównanie rozkładu wartości siły pochodzącej od oporu gleby dla ostrza w kształcie stożka i w kształcie klina [opracowanie własne].....	117
Rys. 9.1. Narzędzie sadzące z ostrzem w kształcie klina i rurą przelotową o mniejszej średnicy.	119
Rys. 9.2. Narzędzie sadzące z ostrzem w kształcie stożka i rurą przelotową o większej średnicy.....	120
Rys. 9.3. Przekrój rury przelotowej (wnętrza narzędzia) w przypadku ostrza z końcówką stożkową	120
Rys. 9.4. Przekrój rury przelotowej (wnętrza narzędzia) w przypadku ostrza z końcówką klinową	121
Rys. 10.1 Schemat układu hydraulicznego zasilania narzędzia sadzącego; układ zasilania siłownika zagłębienia (po lewej), układ zasilania siłowników szczęk (po prawej) [opracowanie własne]	125

SPIS TABEL

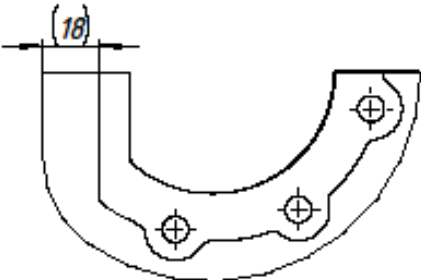
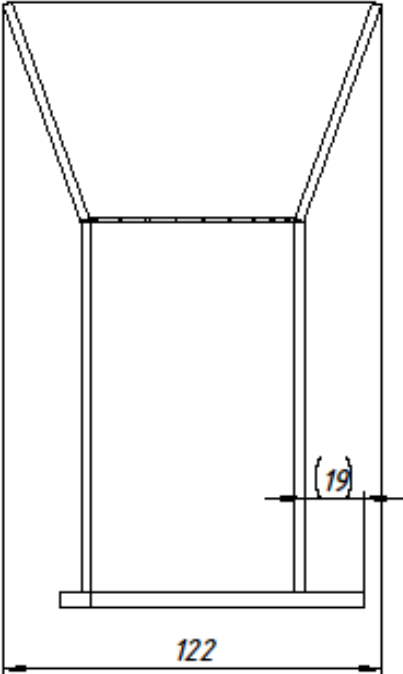
Tabela 2.1. Parametry techniczne sadzarki GNKp [44].....	18
--	----

Tabela 2.2. Parametry techniczne sadzarki Egedal [10]	19
Tabela 2.3. Zestawienie konstrukcji urządzeń sadzących z porównaniem kosztu sadzenia sadzonki (opracowanie własne).....	37
Tabela 4.1. Siły generowane w siłownikach hydraulicznych zespołu sadzącego [106]	43
Tabela 8.1. Wyniki testów sadzenia obydwoma typami ostrzy dla zmiennych wartości siły nacisku tłoka siłownika opuszczania zespołu sadzącego	99
Tabela 8.2. Wartości zagłębienia narzędzia w wersji pierwszej z podziałem na wysokość ramy od powierzchni ziemi w miejscu sadzenia [opracowanie własne].....	109
Tabela 8.3. Wartości zagłębienia narzędzia w wersji drugiej z podziałem na wysokość ramy od powierzchni ziemi w miejscu sadzenia, wartość zagłębienia narzędzia od najwyższego położenia oraz sumaryczna wartość zagłębienia [opracowanie własne]	110
Tabela 8.4. Wartość maksymalna oporu gleby uzyskana w kolejnej próbie zagłębienia narzędzia klinowego i stożkowego [opracowanie własne]	114
Tabela 8.5. Statystyka wartości zagłębienia narzędzia wyposażonego w ostrze klinowe oraz stożkowe	115
Tabela 8.6. Statystyka wartości osiągniętego oporu gleby narzędzi wyposażonych w ostrza: klinowe oraz stożkowe.....	116

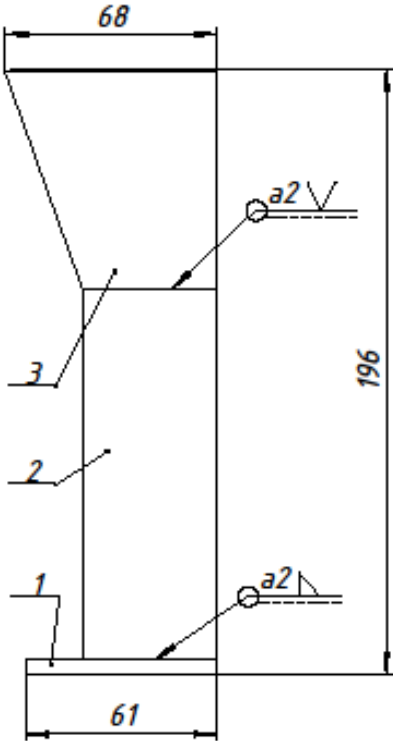
ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1. Dokumentacja techniczna

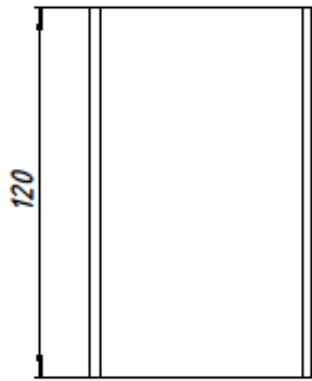
Załącznik ten zawiera komplet rysunków umożliwiających wykonanie ostrza w wersji stożkowej. Pozostałe rysunki, które uwzględniają kompletne narzędzie sadzące są do wglądu w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznańskim Instytucie Technologicznym lub w siedzibie Ośrodka Techniki Leśnej w Jarocinie.

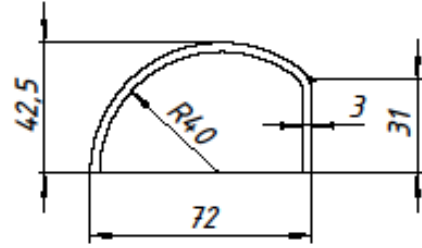



oczyścić ✓

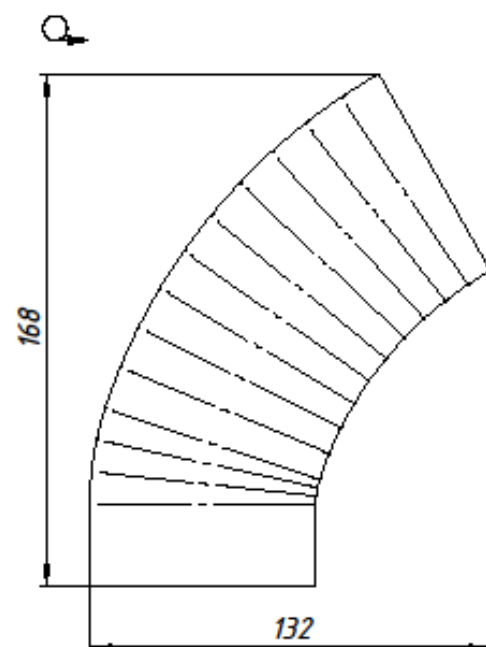
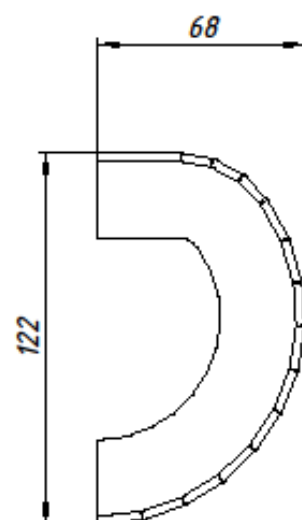
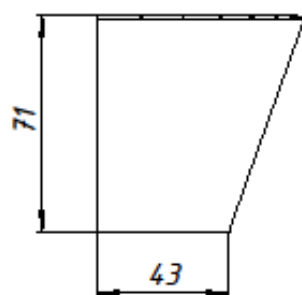


3	RBF_12-01-702	Lejek	1	
2	RBF_12-01-701	Rura wlotowa	1	
1	RBF_12-01-504	Płyta dolna	1	
Lp.	Numer	Wyszczególnienie	Ilość	Uwagi
Materiał			Masa 0.72 kg	Ilość na maszynę 1
Konstruował	M. Szaroleta		Podziałka 1:2 SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ - POZNAŃSKI INSTYTUT TECHNOLOGICZNY Centrum Technologii Rolniczej i Spożywczej Poznań	
Sprawdził	M. Szaroleta			
Kontr. tech.				
Zatwierdził				
Robofor			Część wymienną znakować	
Nazwa Kierownica			Nr rysunku RBF_02-01-700 OZBICZ. 0001 A4	





Nr. zmiany	Załącznik	Nr. karty	No. op.	Data	Nr. zmiany	Załącznik	Nr. karty	No. op.	Data
Materiał S355JR - 18G2								Masa 0.35 kg	Ilość na maszynie 2
Konstruował	M. Szaroleta				Podziałka 1:2	SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ - POZNAŃSKI INSTYTUT TECHNOLOGICZNY Centrum Technologii Rolniczej i Spożywczej Poznań			
Sprawdził	M. Szaroleta								
Kontr. tech.									
Zatwierdził	T. Szulc				Zastępuje	Zastąpiony			
RoboFoR					Część wymienną znakować				
Nazwa Rura wlotowa					Nr rysunku RBF_12-01-701				
					OZBYCZ. 0001 A4				



*Uwaga
drugi egzemplarz wykonać jako odbicie lustrzane*

Nr zlecenia	Data zlec.	Nr karty	Nr opisu	Data	Nr zlecenia	Data zlec.	Nr karty	Nr opisu	Data
Materiał								Masa	Ilość na maszynie
S355JR - 18G2								0.29 kg	2
Konstruował	M. Szaroleta				Podziałka	SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ - POZNAŃSKI INSTYTUT TECHNOLOGICZNY			
Sprawdził	M. Szaroleta				1:2	Centrum Technologii Rolniczej i Spożywczej			
Konfr. tech.						Poznań			
Zatwierdził	T. Szulc				Zastępuje	Zastąpiony			
RoboFoR					Część wymienna znakować				
Nazwa					Nr rysunku				Uwaga: odd.
Lejek					RBF_12-01-702				A4

Nr zlecenia	Zadanie	Nr karty	Pojęcie	Data	Nr zlecenia	Zadanie	Nr karty	Pojęcie	Data	
Materiał S355JR - 18G2								Masa 0.68 kg	Ilość na maszynę 2	
Konstruował	M. Szaroleta				Podziałka	SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ - POZNAŃSKI INSTYTUT TECHNOLOGICZNY Centrum Technologii Rolniczej i Spożywczej Poznań				
Sprawdził	M. Szaroleta				1:2.5					
Konfr. tech.										
Zatwierdził	T. Szulc									
RoboFoR					Zestępuje		Zestąpiony			
Część wymienną znakować										
Nazwa Ściana boczna					Nr rysunku RBF_12-01-601				Użytkownik A4	

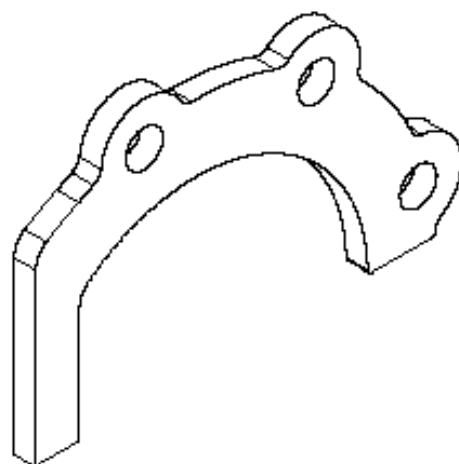
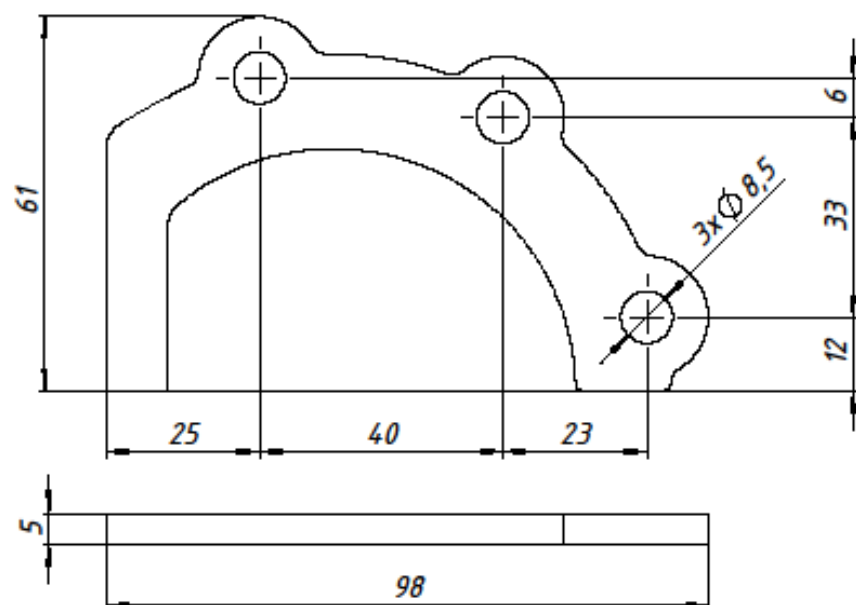
planować do powierzchni

Uwaga
drugi element wykonać jako odbicie lustrzane

Nr zlecenia	Data	Nr karty	Data	Nr zlecenia	Data	Nr karty	Data

Materiał		S355JR - 18G2		Masa	0.14 kg	Ilość na maszynie	2
Konstruował	M. Szaroleta	Nr zlecenia M. Szaroleta Kontr. tech. T. Szulc Data 	Podziałka	SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ - POZNAŃSKI INSTYTUT TECHNOLOGICZNY Centrum Technologii Rolniczej i Spożywczej Poznań			
Sprawdził	M. Szaroleta		1:2				
Konstr. tech.							
Zatwierdził	T. Szulc						
RoboFoR				Część wymienna znakować			
Nazwa				Nr rysunku		Uwaga	
Stożek				RBF_12-01-602		A4	

Nr zlecenia	Zlec. na	Nr karty	Pozycja	Data	Nr zlecenia	Zlec. na	Nr karty	Pozycja	Data	
Materiał								Masa	Ilość na maszynie	
S355JR - 18G2								0.12 kg	4	
Konstruował	M. Szaroleta				Podziałka	SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ - POZNAŃSKI INSTYTUT TECHNOLOGICZNY Centrum Technologii Rolniczej i Spożywczej Poznań				
Sprawdził	M. Szaroleta				1:1					
Kontr. tech.										
Zatwierdził	M. Szaroleta									
RoboFoR					Zestępuje		Zestąpiony			
Część wymienną znakować										
Nazwa					Nr rysunku		Oznak. doc.			
Sworzeń podcięty					RBF_12-01-603		A4			

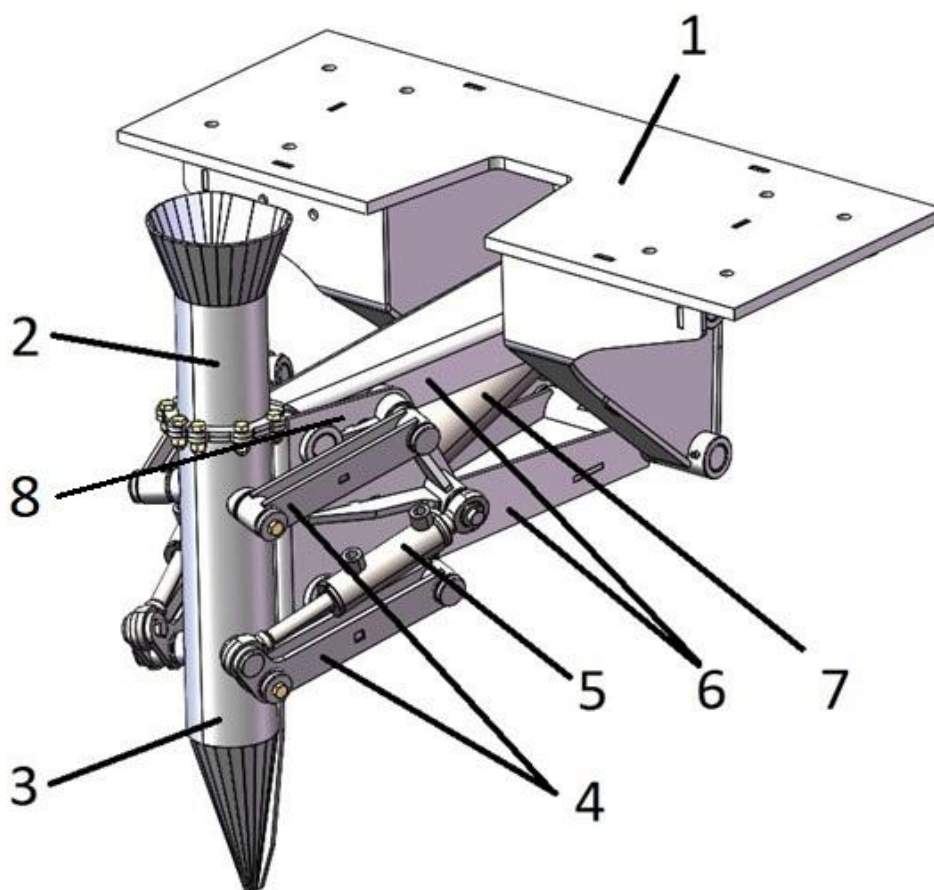


Nr. rysunku	Nr. karty	Nr. karty	Nr. karty	Nr. karty	Nr. rysunku	Nr. karty	Nr. karty	Nr. karty	Nr. karty
Materiał S355JR - 18G2								Masa 0.09 kg	Ilość na maszynę 2
Konstruował	D. Kapela				Podziałka 1:1	SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ - POZNAŃSKI INSTYTUT TECHNOLOGICZNY Centrum Technologii Rolniczej i Spożywczej Poznań			
Sprawdził	M. Szychla								
Kontr. tech.									
Zatwierdził	T. Szulc								
RoboFoR					Zestępuje		Zestępiony		Załącz. dod.
Nazwa					Część wymienną znakować				
Płyta dolna					Nr rysunku RBF_12-01-504				
									A4

Załącznik 2. Instrukcja obsługi i montażu opracowanego narzędzia sadzącego

Elementy składowe układu sadzącego

Układ sadzący jest zbudowany jest z ramy głównej (1), do której zamocowane są wahacze główne (6). Do tych wahaczy zamocowana jest rama (8), będąca częścią urządzenia sadzącego. Do ramy poprzez wahacze (4) zamocowane są ramiona urządzenia sadzącego (3). Z kolei do wspomnianych ramion zamocowany jest lejek (2) odpowiedzialny za wprowadzenie sadzonki do narzędzia sadzącego. Element (7) jest siłownikiem pozwalającym na ruch pionowy narzędzia sadzącego oraz jego zagłębianie w ziemi. Z kolei siłowniki (5) w liczbie dwóch sztuk odpowiadają za otwieranie i zamykanie ramion narzędzia sadzącego po zakończeniu procesu sadzenia.



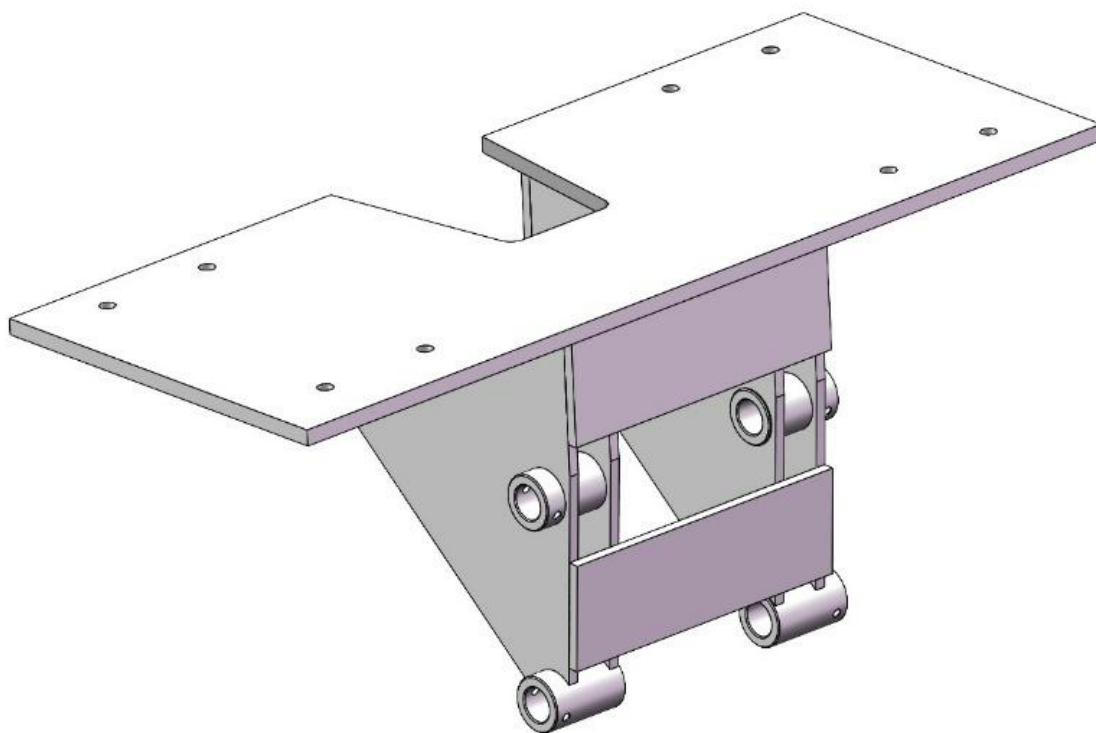
Rys. 1. Układ sadzący

Wykaz części składowych układu sadzącego

1. rama główna układu sadzącego,
2. lejek kostura,
3. narzędzie sadzące z końcówką stożkową,
4. wahacze ramion narzędzia sadzącego,
5. siłownik hydrauliczny otwierający i zamykający ramiona narzędzia sadzącego,
6. wahacze główne pomiędzy ramą a narzędziem sadzącym,
7. siłownik zagłębiający/wygłębiający narzędzia sadzącego
8. rama urządzenia sadzącego

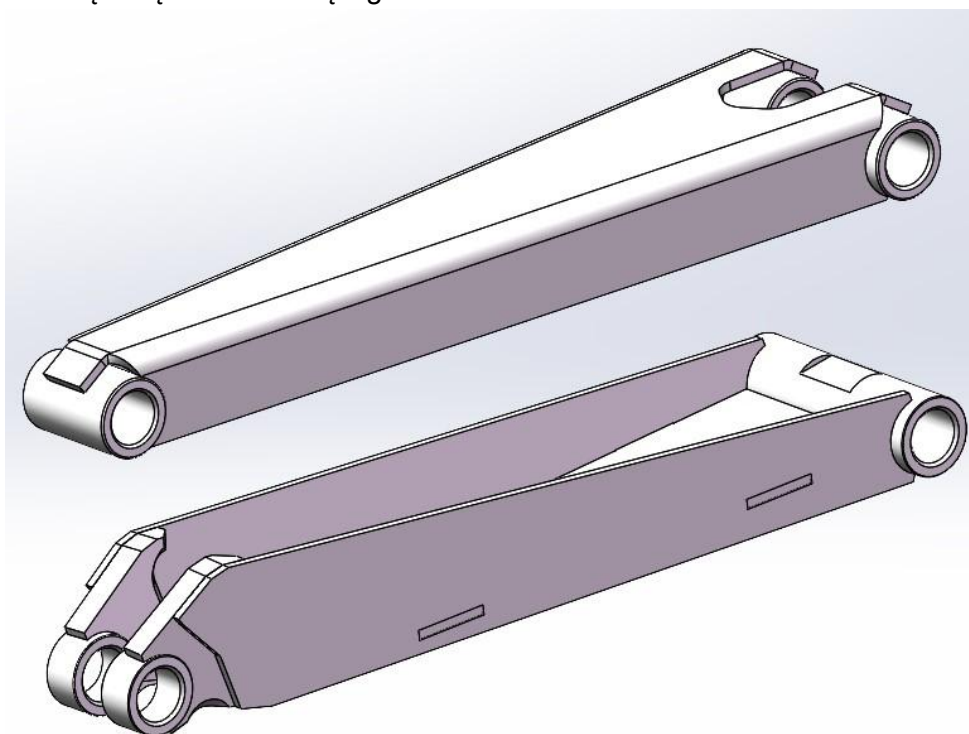
Montaż podzespołów układu

Montowanie układu należy rozpocząć od przygotowania ramy głównej układu (rys. 2)



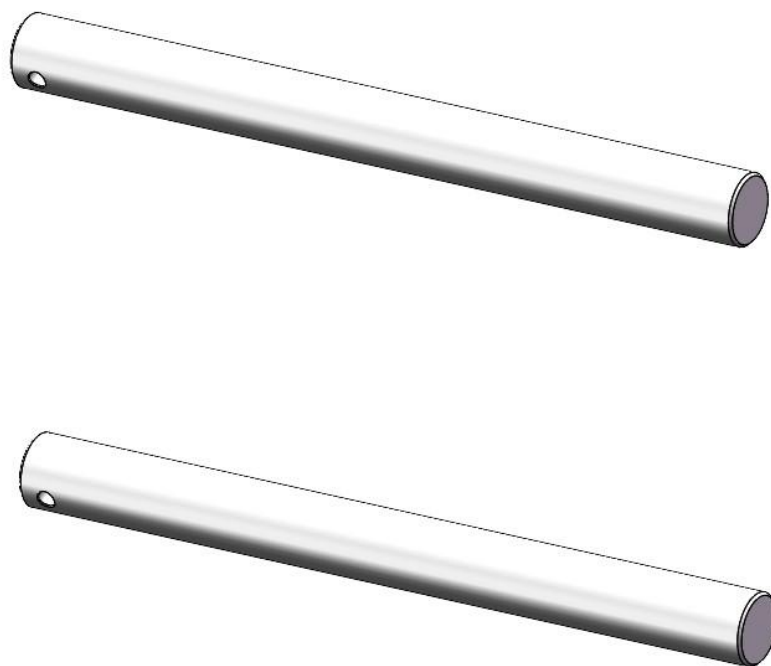
Rys. 2. Rama główna układu sadzącego

Do ramy należy zamocować w pierwszej kolejności wahacze główne (rys. 3), które połączą ramę główną z ramą urządzenia sadzącego.

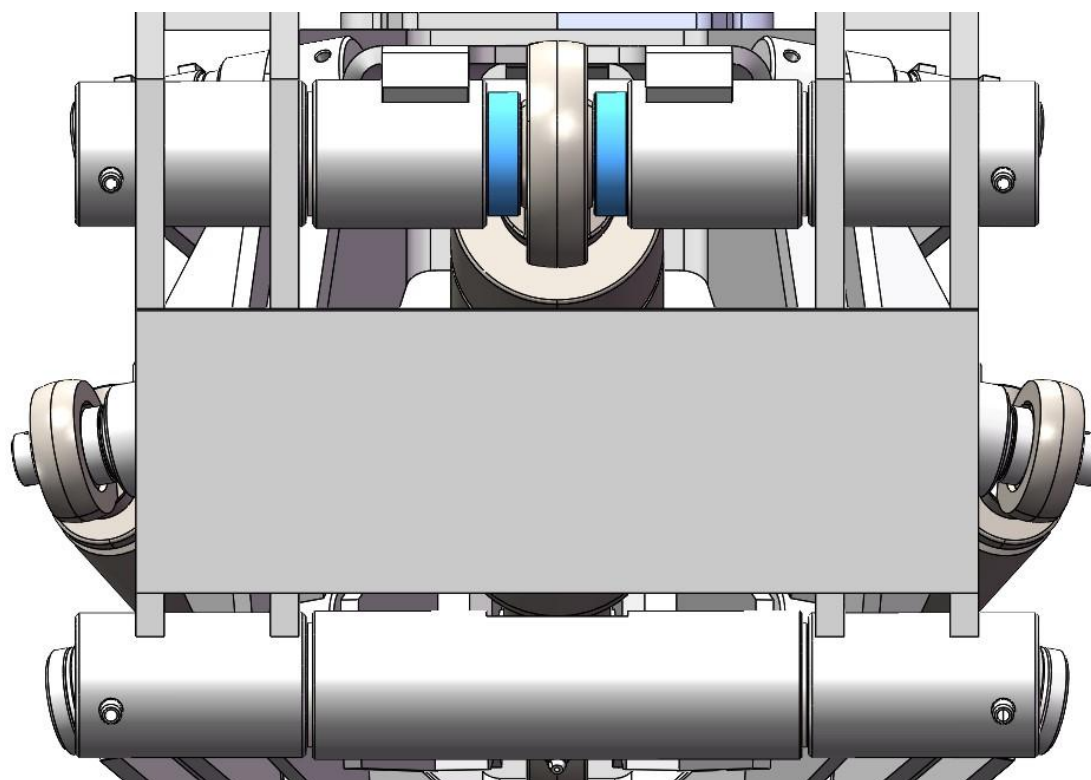


Rys. 3. Wahacze główne

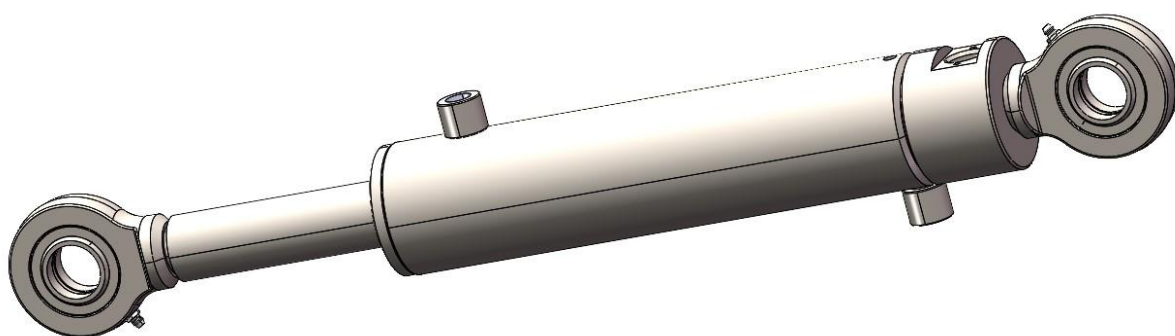
Wykorzystując sworznie (rys. 4) oraz tulejki dystansowe (rys. 5) połączyć wahacze główne oraz siłownik zagłębiający (rys. 6) z ramą. Istotne jest, by w tulejkach wahaczy znalazły się tuleje ślizgowe (rys. 7), a po montażu sworznie były zakołkowane (rys. 8).



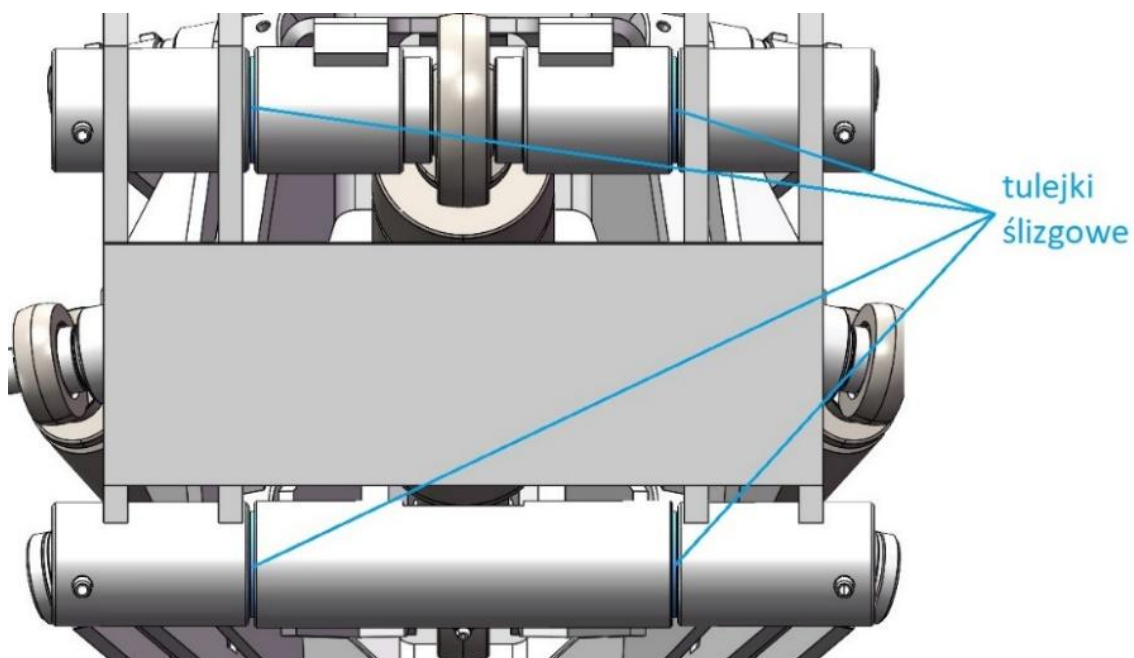
Rys. 4. Sworznie służące do połączenia wahaczy głównych z ramą główną



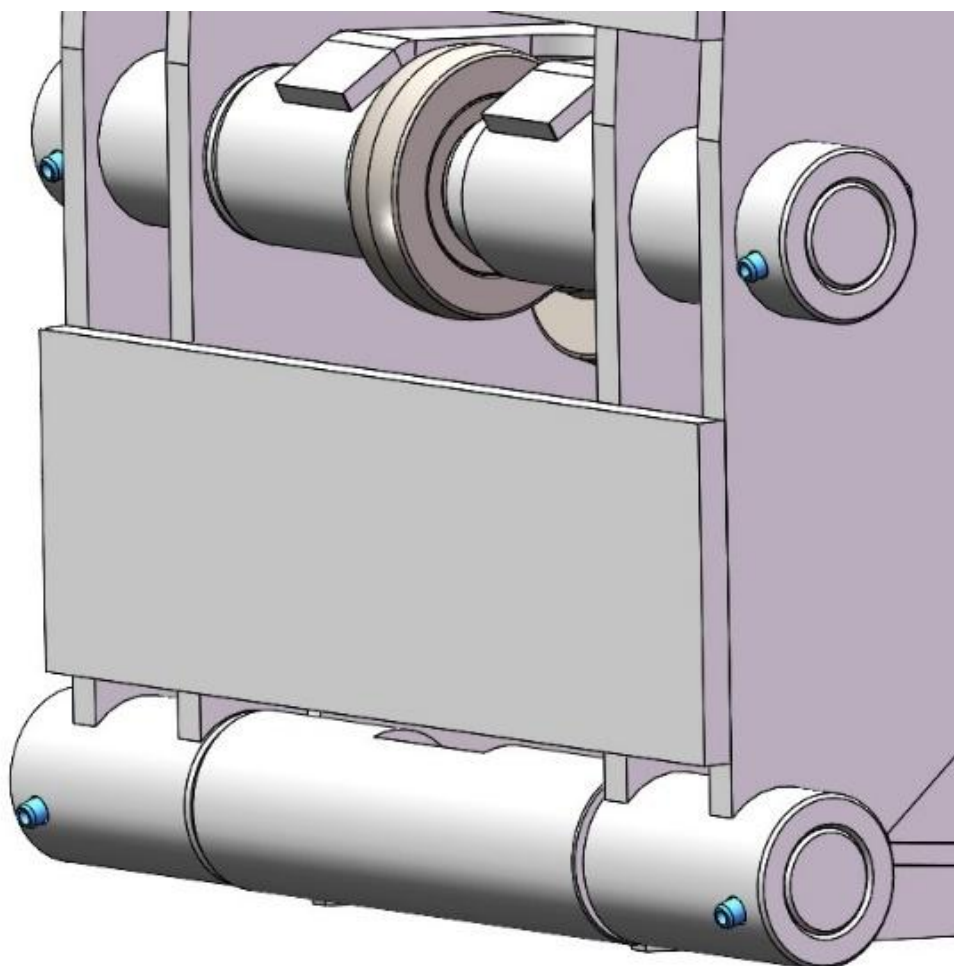
Rys. 5. Tulejki dystansowe dla połączenia wahaczy głównych z ramą główną (zaznaczone na niebiesko)



Rys. 6. Siłownik hydrauliczny zagłębiania

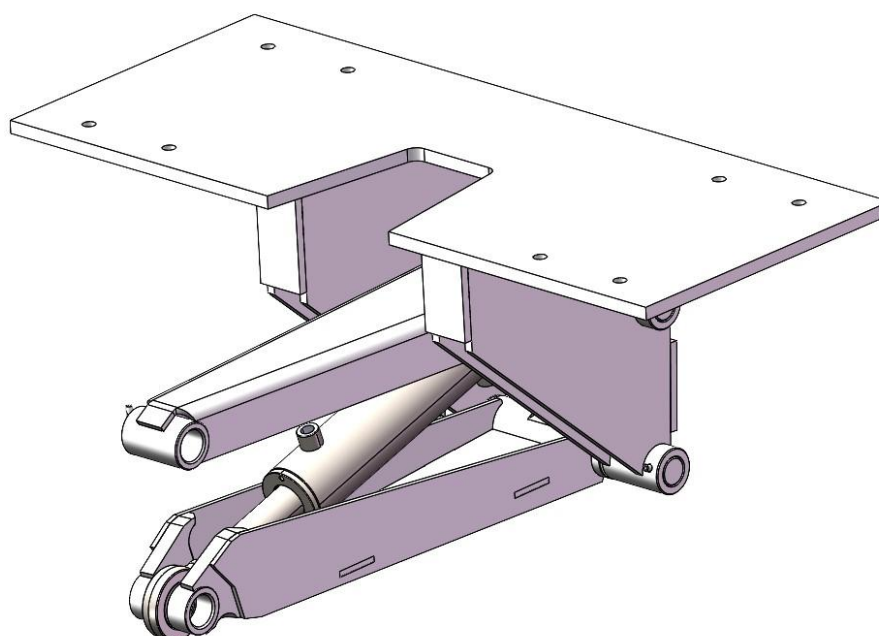


Rys. 7. Tulejki ślizgowe Permaglide wciśnięte w tuleje wahaczy



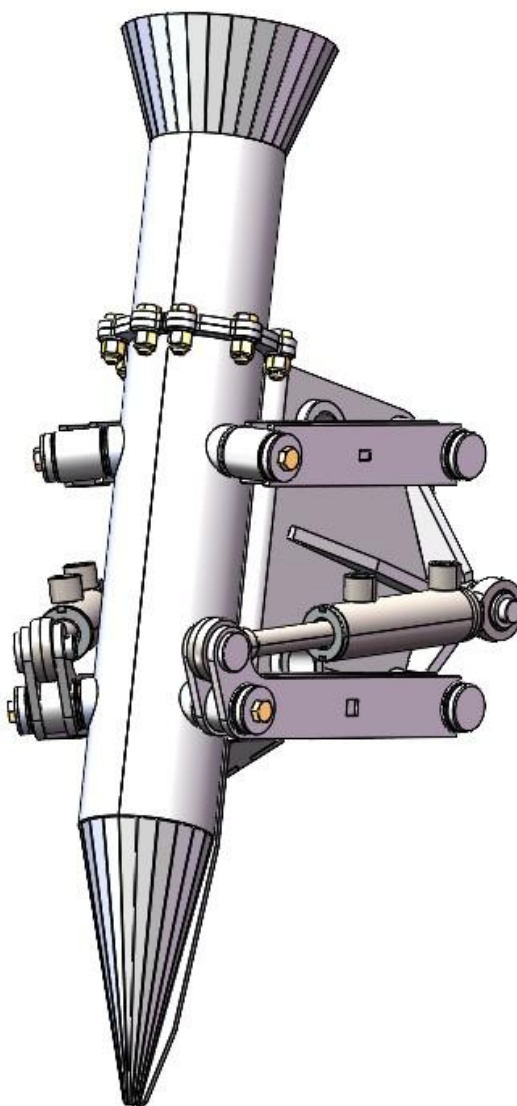
Rys. 8. Kołki służące zablokowaniu sworzni przed obrotem oraz wysuwem z ramy głównej (zaznaczone na niebiesko)

Po zmontowaniu powstanie zespół widoczny na rysunku 9.



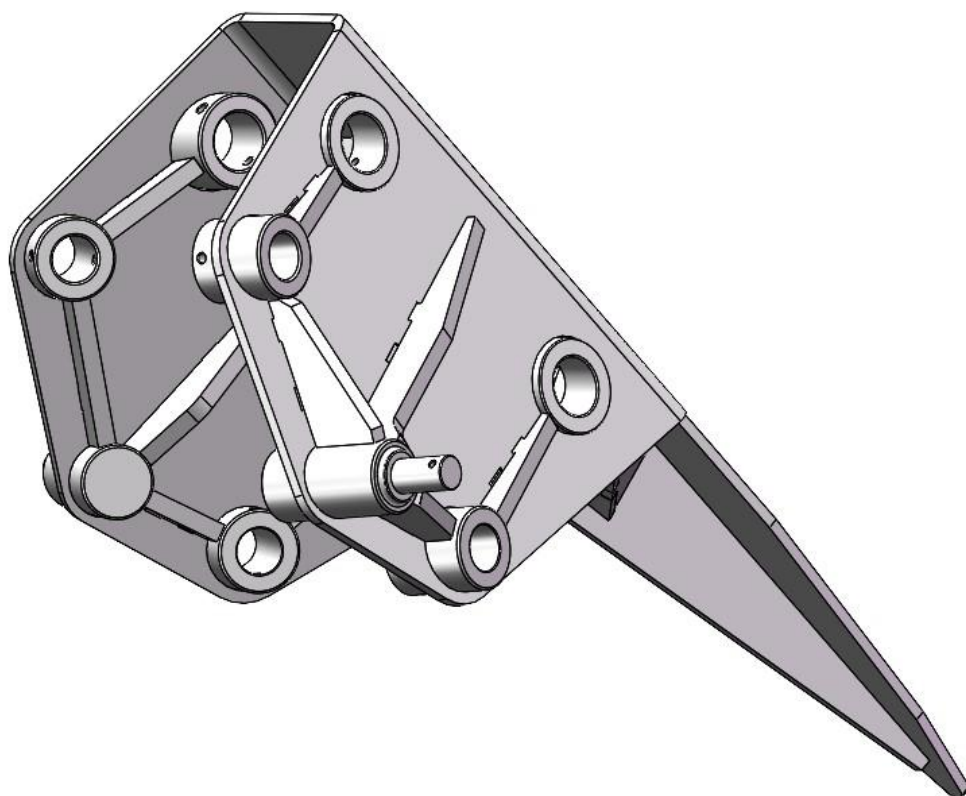
Rys. 9. Rama główna z przyłączonymi wahaczami głównymi oraz siłownikiem zagłębienia

Następnie zmontować moduł sadzący, tj. narzędzie sadzące osadzone na własnej ramie, zamocowane za pomocą wahaczy oraz wyposażone w siłowniki hydrauliczne odpowiedzialne za otwieranie i zamykanie ramion (rys. 10).

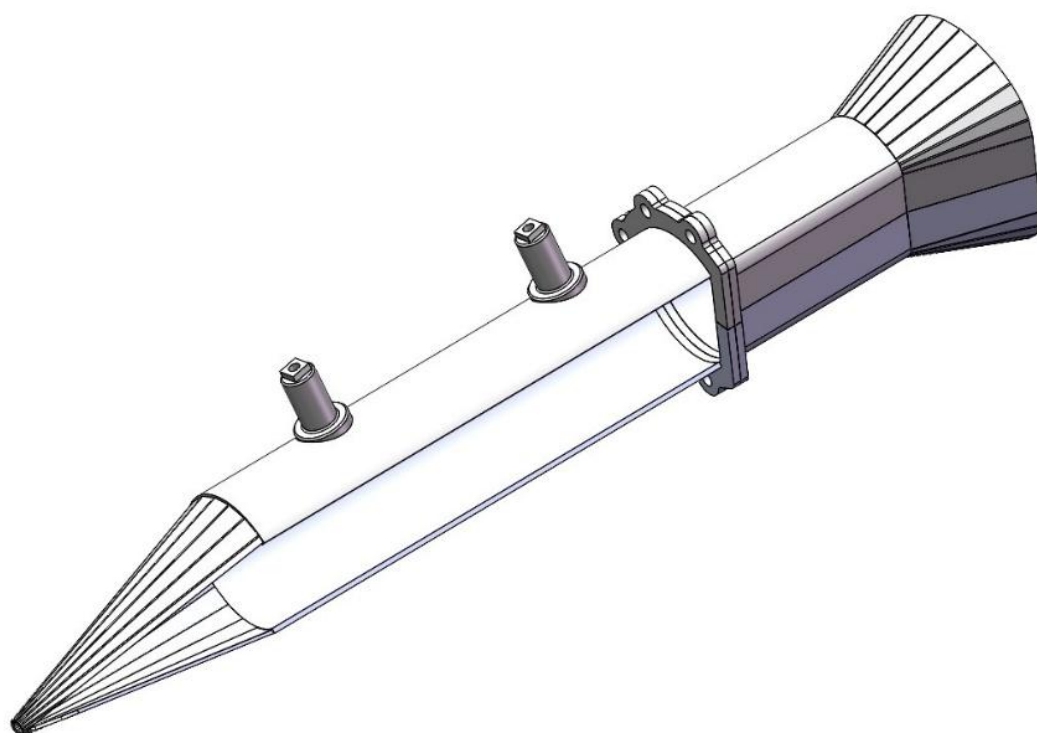


Rys. 10. Moduł sadzący, tj. ramiona narzędzia sadzącego osadzone na własnej ramie wraz z wahaczami oraz siłownikami hydraulicznymi

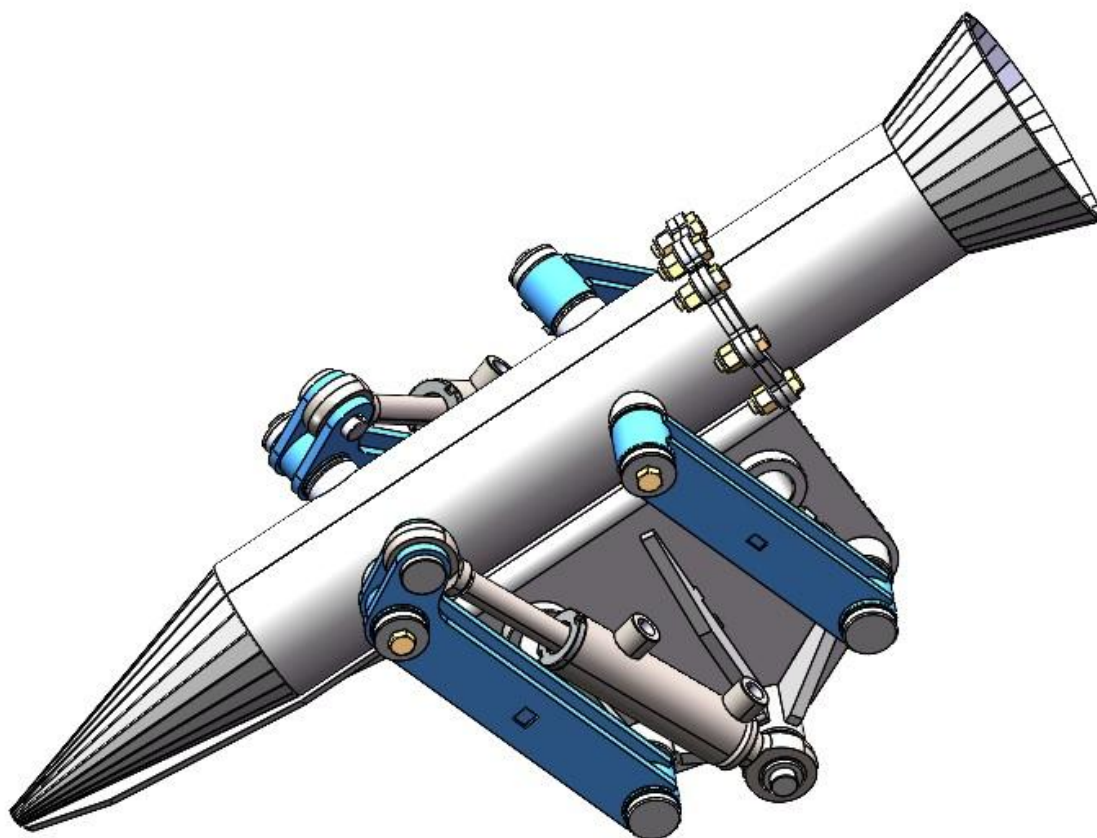
Do ramy narzędzia sadzącego (rys. 11) zamocować ramiona narzędzia sadzącego (rys. 12) z wykorzystaniem wahaczy (rys. 13).



Rys. 11. Rama narzędzia sadzącego

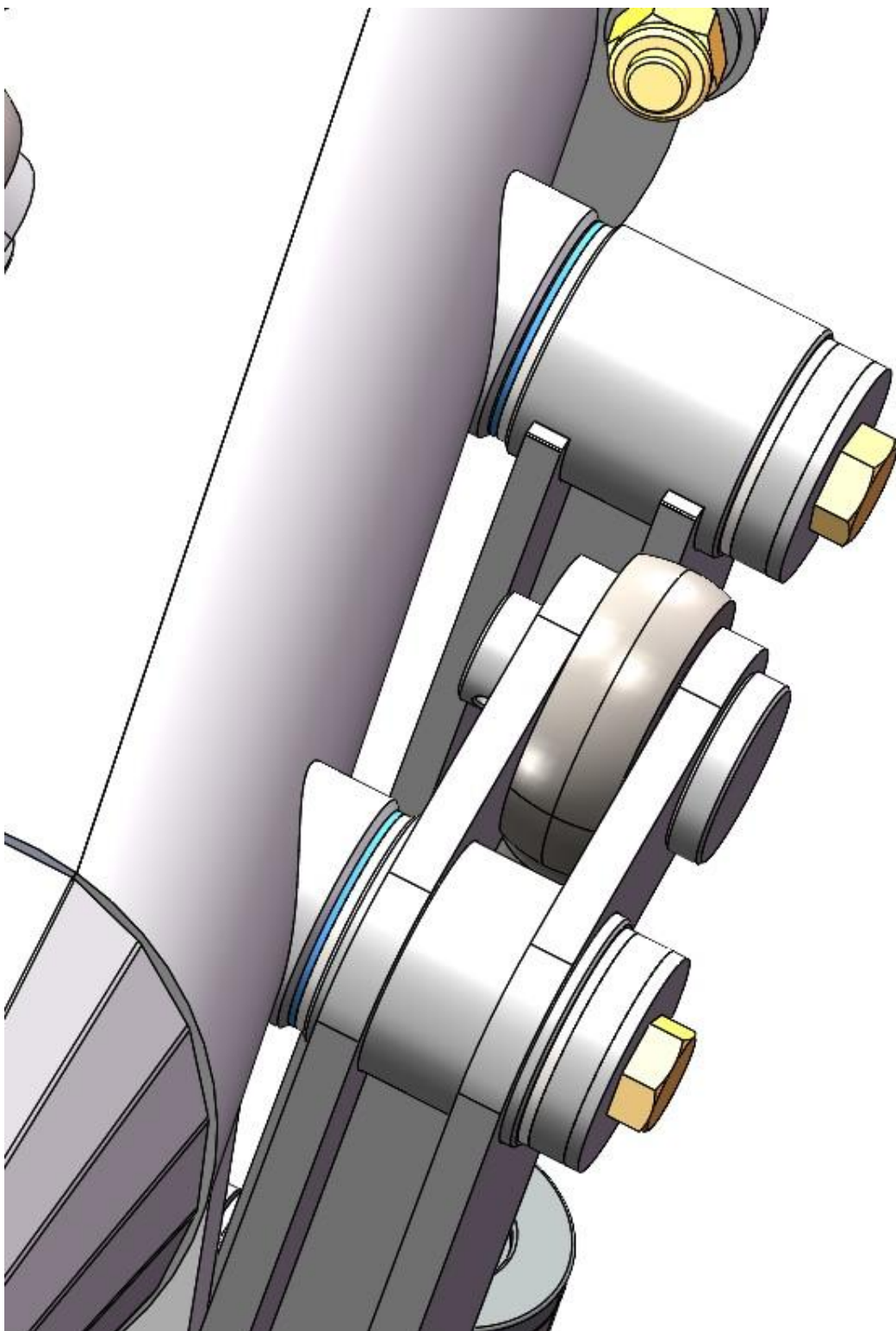


Rys. 12. Ramiona narzędzia sadzącego

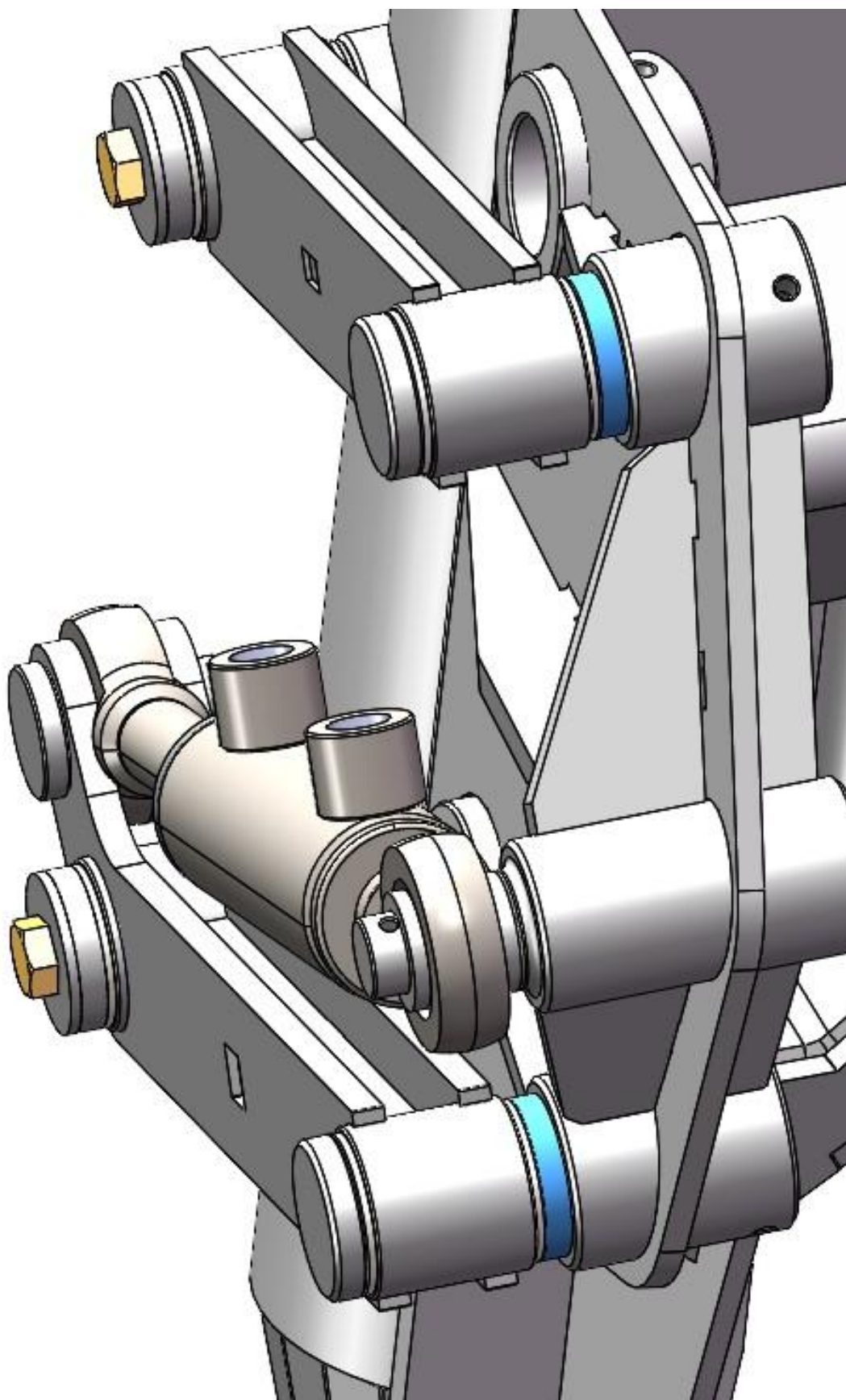


Rys. 13. Wahacze ramion narzędzia sadzącego (zaznaczone na niebiesko)

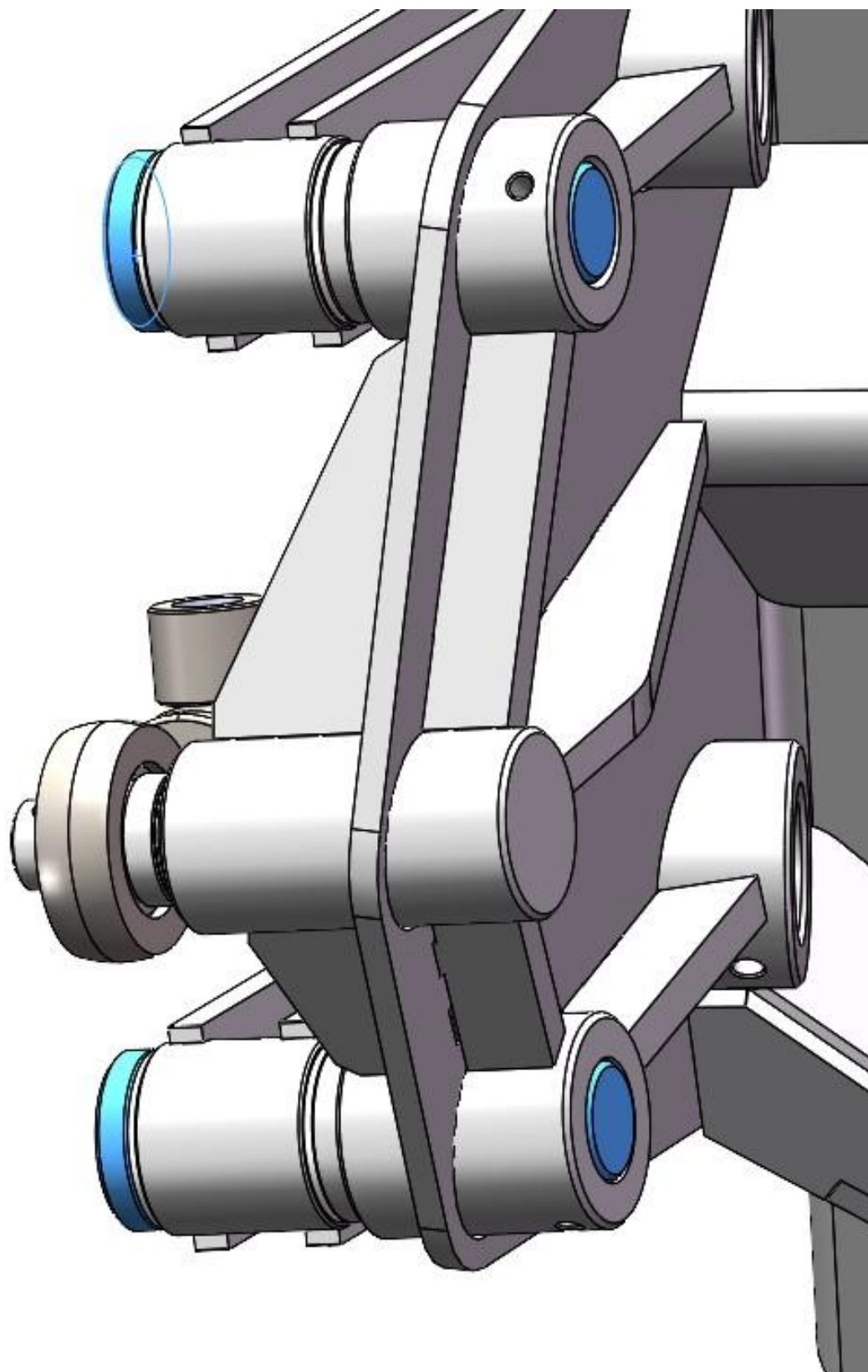
Podczas montażu ramion narzędzia sadzącego oraz wahaczy do ramy narzędzia sadzącego należy pamiętać o komplecie podkładek i sworzni, by móc poprawnie, z zachowaniem odpowiednich dystansów, zamontować wspomniane elementy względem siebie. Jest to podyktowane koniecznością zachowania odpowiednich luzów pomiędzy elementami, by te mogły swobodnie ze sobą współpracować. Na rysunkach 14÷18 zobrazowano podkładki i sworznie w poprawnych lokalizacjach i pozycjach.



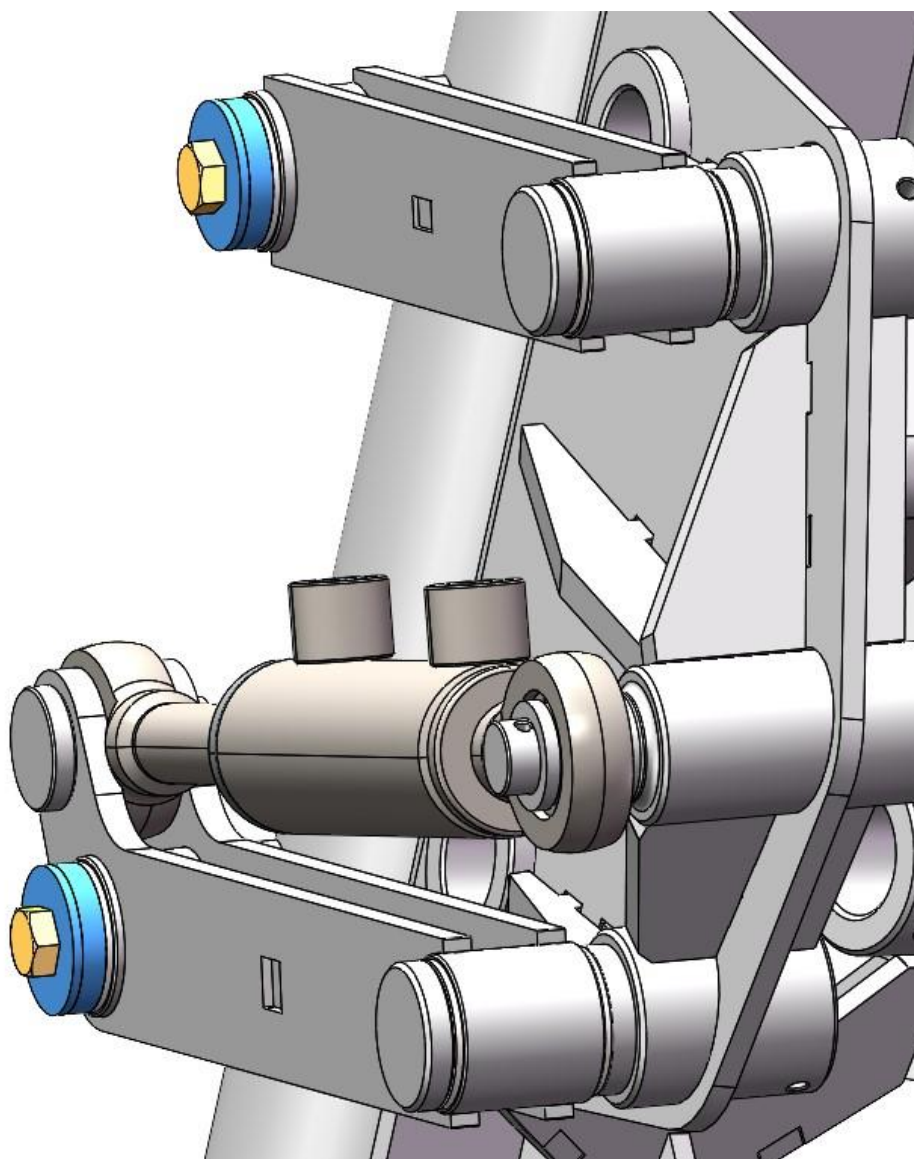
Rys. 14. Podkładki dystansowe grubości 1 mm pomiędzy wahaczami oraz ramą narzędzia
sadzącego (zaznaczone na niebiesko)



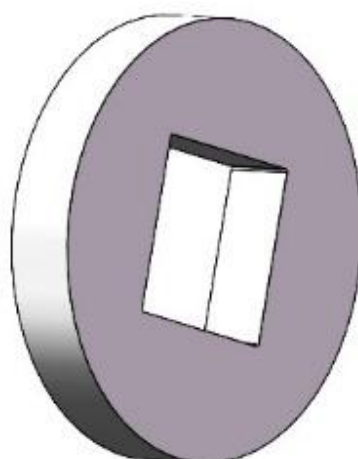
Rys. 15. Podkładki dystansowe grubości 5 mm pomiędzy wahaczami, a ramą narzędzia sadzącego (zaznaczone na niebiesko)



Rys. 16. Sworznie mocujące wahacze do ramy narzędzia sadzącego

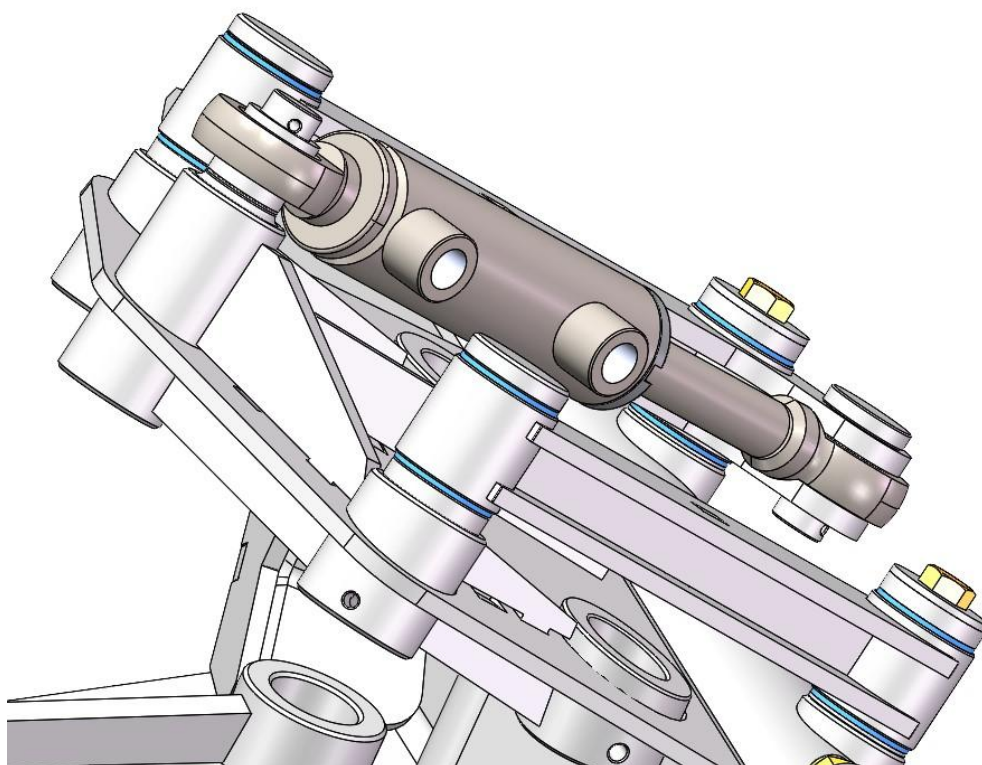


Rys. 17. Podkładki blokujące wahacz na sworzniu ramienia narzędzia sadzącego



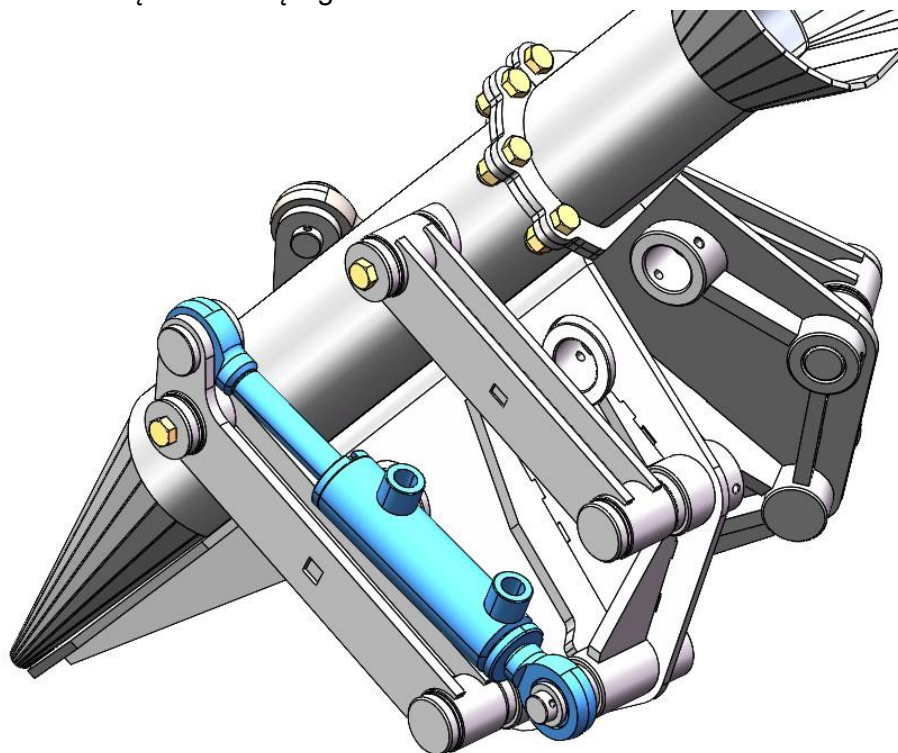
Rys. 18. Podkładka z otworem kwadratowym zabezpieczająca wahacz przez zsunięciem ze sworznia

Na wahaczach ramion sadzących obustronnie osadzić tuleje ślizgowe Permaglide (rys. 19)



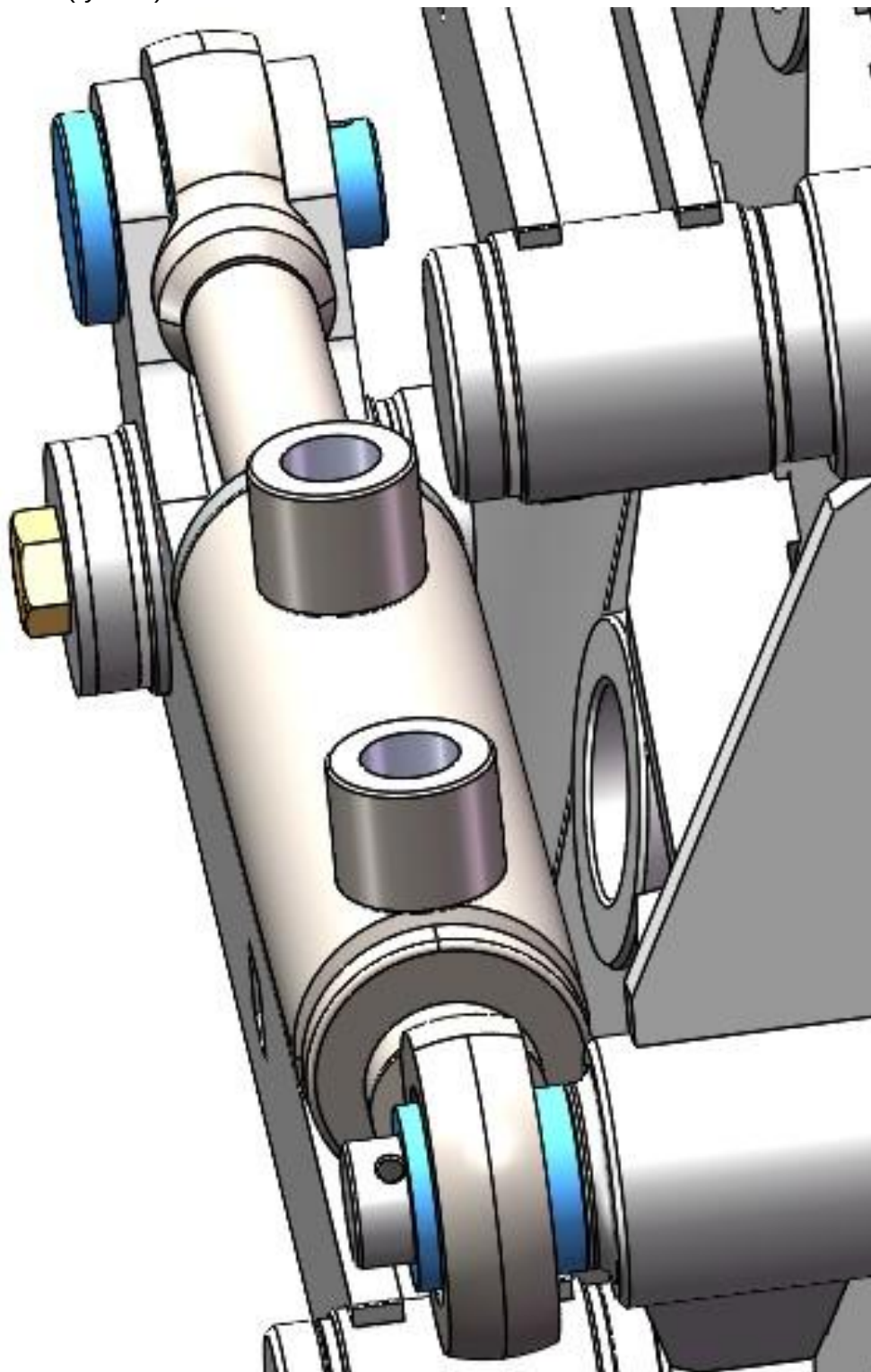
Rys. 19. Tuleje ślizgowe Permaglide włożone w tuleje wahaczy

Następnie należy wykonać montaż siłowników hydraulicznych (rys. 19), które będą otwierać oraz zamykać ramiona narzędzia sadzącego.



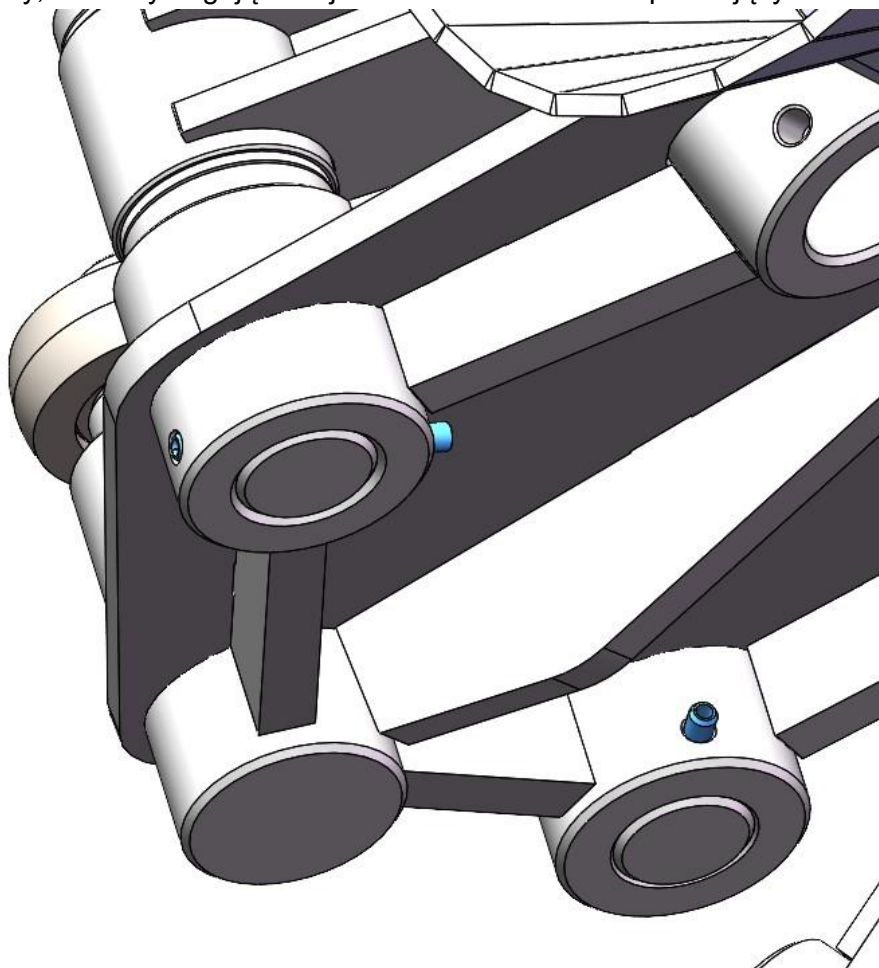
Rys. 19. Siłownik hydrauliczny otwierający i zamykający ramiona narzędzia sadzącego

Podczas montażu siłowników hydraulicznych należy zwrócić uwagę na umiejscowienie podkładek oraz sworzni ustalających siłownik w odpowiednim położeniu i uniemożliwiających jego przemieszczanie (rys. 20).

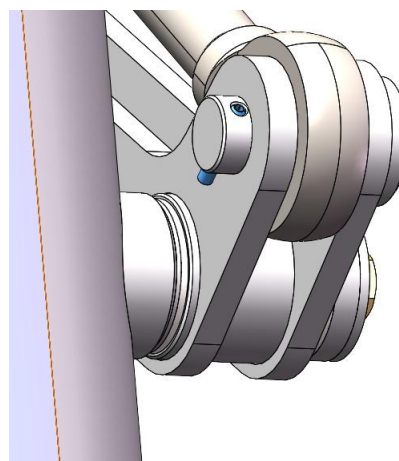
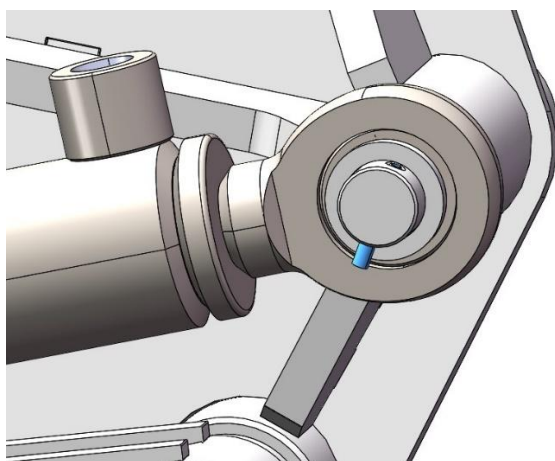


Rys. 20. Sworzень blokujący oraz podkładki dystansowe siłownika hydraulicznego otwierającego oraz zamykającego ramiona narzędzia sadzącego. Podkładka wewnętrzna grubości 5 mm, podkładka zewnętrzna grubości 3 mm (zaznaczone kolorem niebieskim)

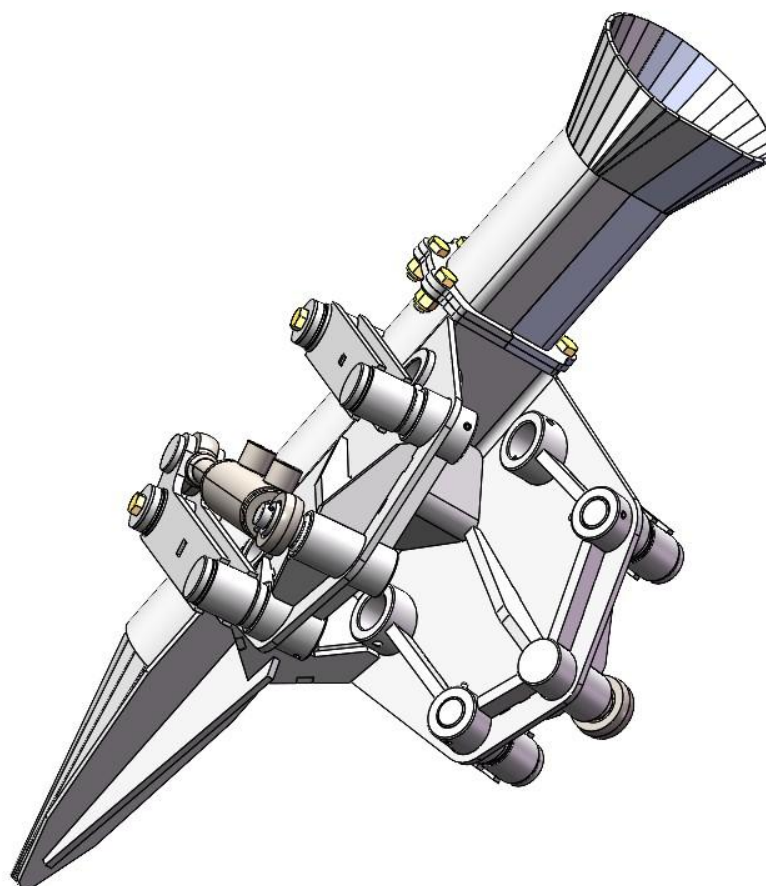
Po wykonaniu powyższych etapów montażu, tj. zamocowaniu wahaczy oraz siłowników z uwzględnieniem potrzebnych podkładek dystansowych, elementy te należy zakołkować, by zapobiec ich wzajemnemu, niepożądanemu przemieszczaniu. Na rysunkach 21÷23 przedstawiono węzły, które wymagają umiejscowienia kołków zabezpieczających.



Rys. 21. Kołki o średnicy 4 mm umiejscowione w tulejkach ramy narzędzia sadzącego

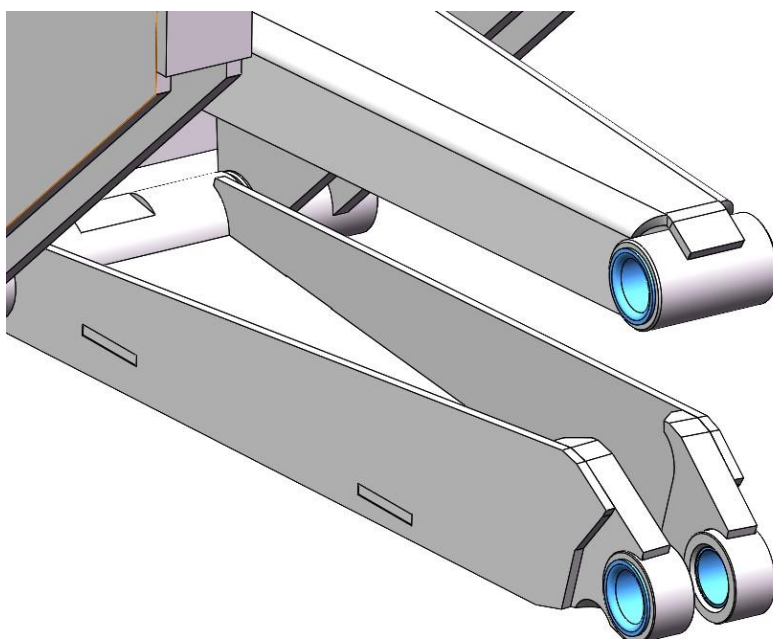


Rys. 22a i 22b. Kołki o średnicy 3 mm umiejscowione w sworzniach i zabezpieczające siłownik hydrauliczny przed wypadnięciem



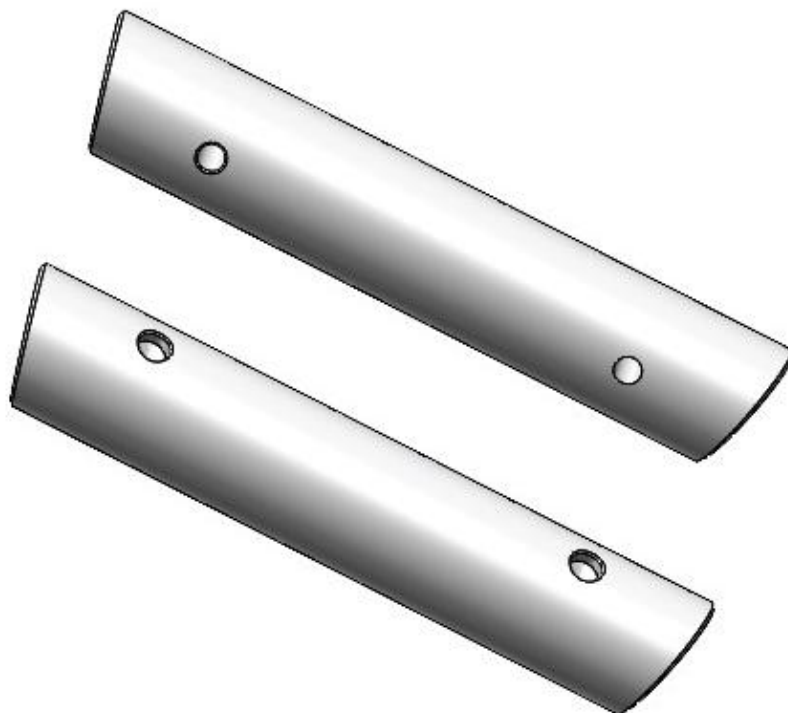
Rys. 23. Moduł sadzący po zmontowaniu

W kolejnym kroku montażowym należy włożyć tulejki ślizgowe Permaglide w tuleje główne wahaczy (rys. 24) .

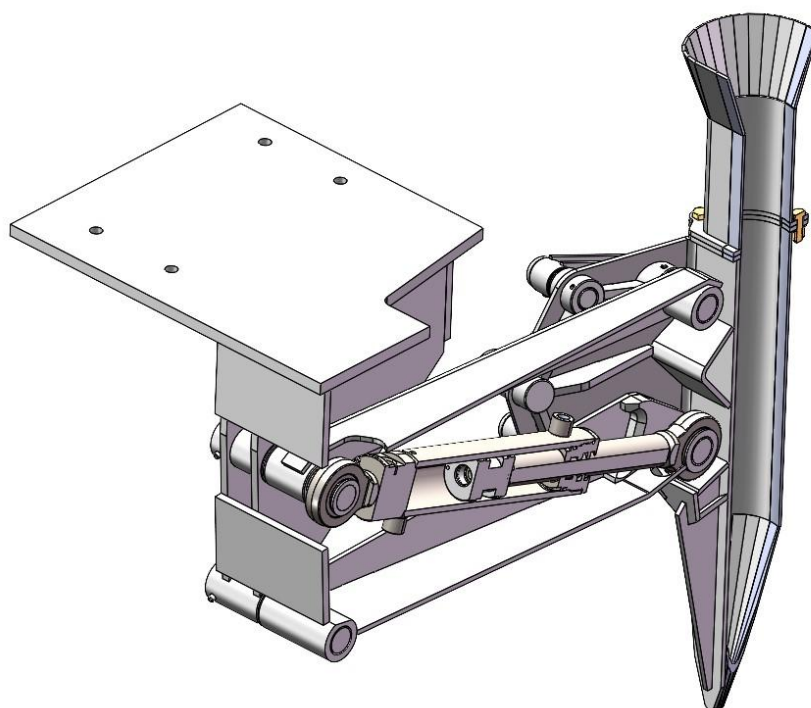


Rys. 24. Tulejki ślizgowe Permaglide osadzone w tulejach wahaczy głównych

Następnie za pomocą sworzni osadzić moduł sadzącego na wahaczach głównych (rys. 25). Podczas ich montażu istotne jest, by sworzeń został przełożony przez ucho siłownika zagłębiającego (rys. 26)

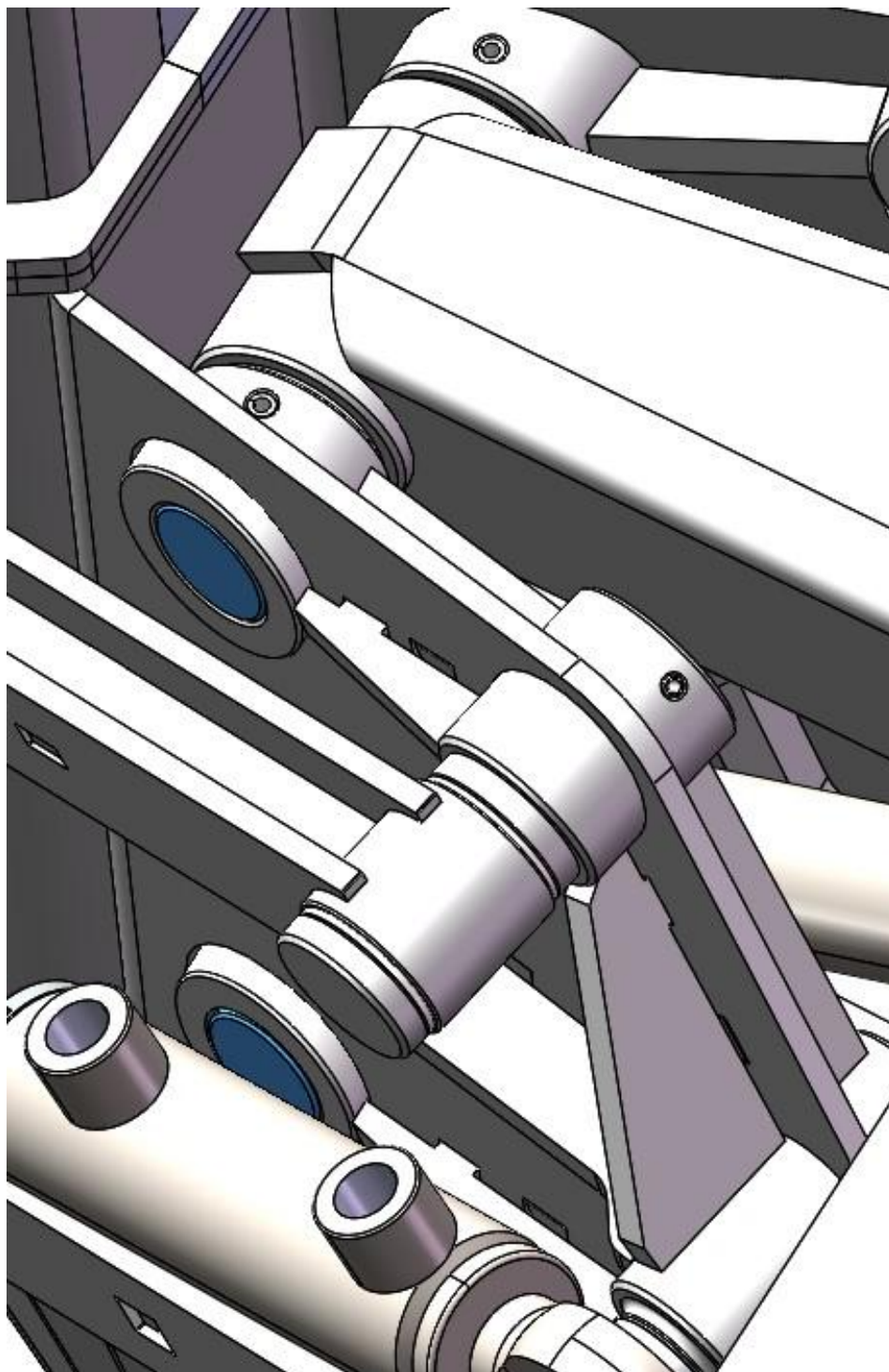


Rys. 25. Sworznie (górny oraz dolny) służące osadzeniu modułu sadzącego na wahaczach głównych

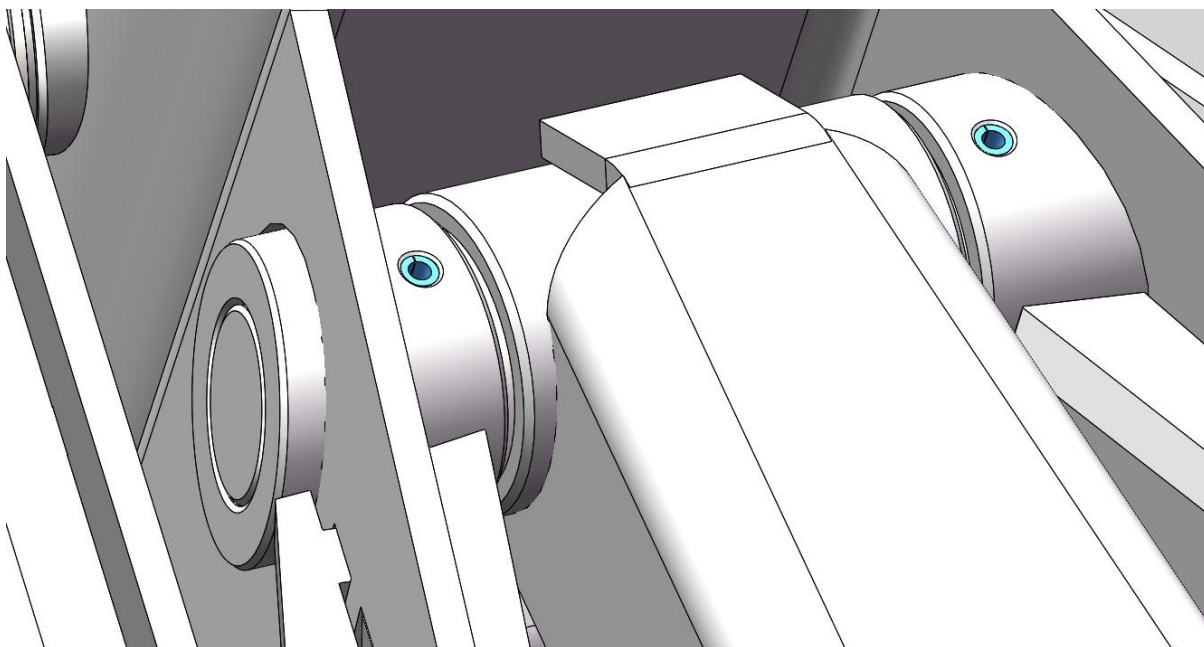


Rys. 26. Sworzeń dolny wahaczy głównych przewleczony przez ucho siłownika zagłębiającego

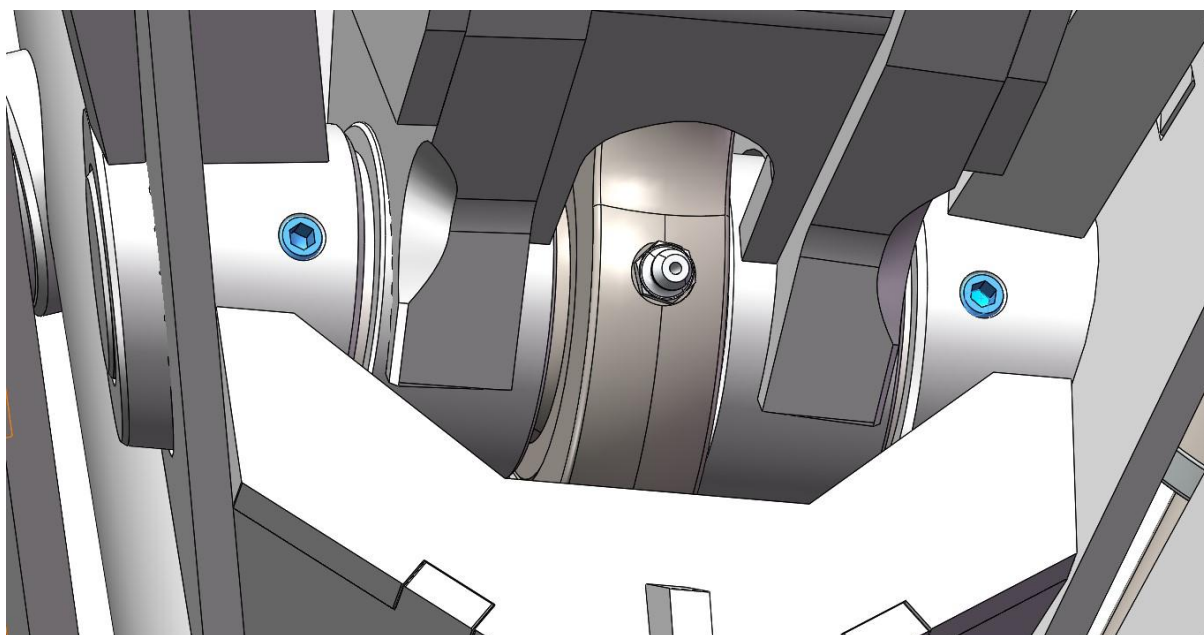
Rysunki poniżej (kolejno rys. 27÷29) pokazują sposób osadzenia sworzni po połączeniu modułu sadzącego z wahaczami głównymi oraz sposób zabezpieczenia sworzni przed ich obrotem oraz wypadnięciem (dolny sworzeń mocowany za pomocą dwóch sztuk wkrętów z gniazdem sześciokątnym oraz górny sworzeń mocowany poprzez osadzenie kołków sprężystych, również w liczbie dwóch sztuk).



Rys. 27. Sworznie mocujące moduł sadzący do wahaczy głównych po ich osadzeniu (zaznaczone na niebiesko)

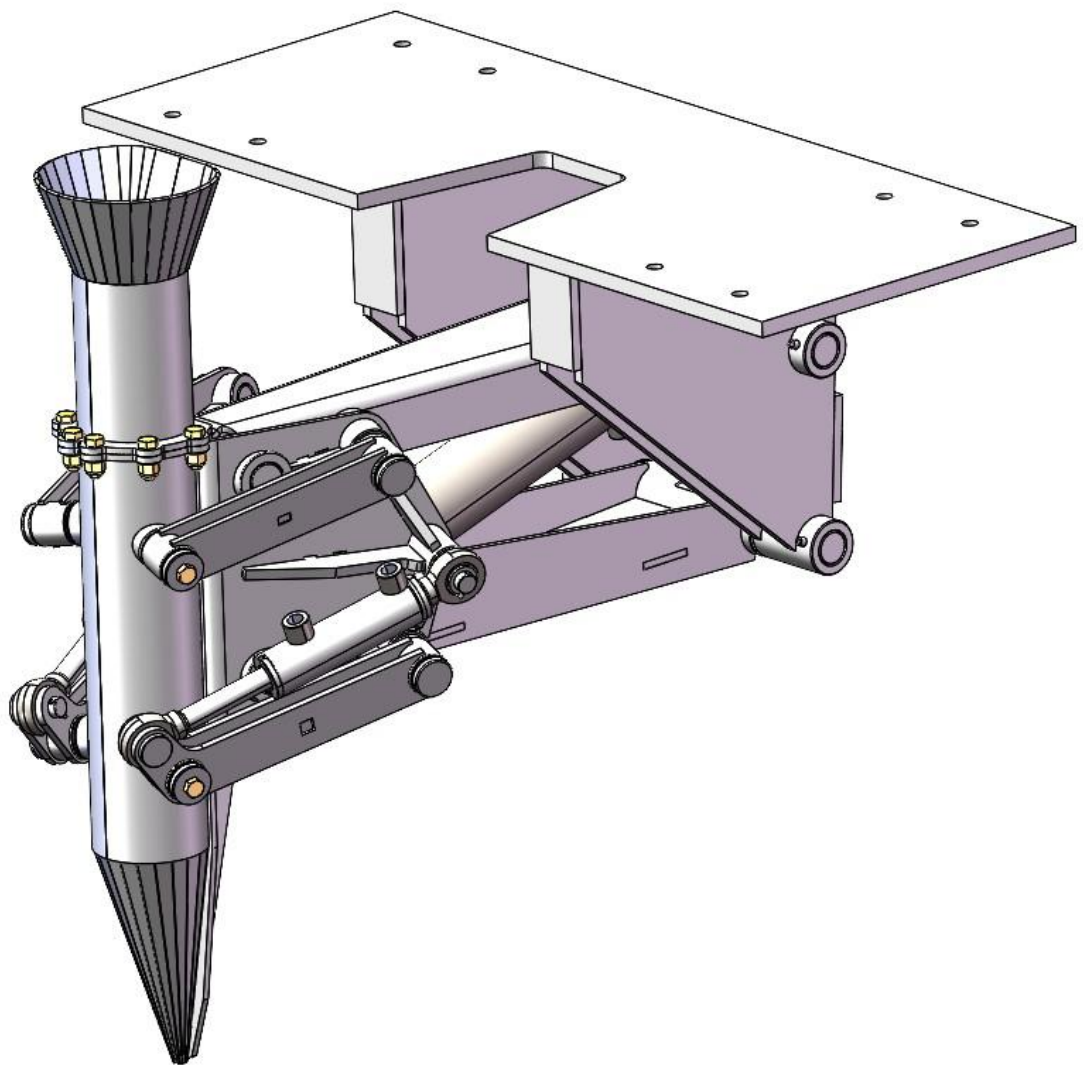


Rys. 28. Sworzeń górny po zabezpieczeniu kołkami sprężystymi (zaznaczone na niebiesko)



Rys. 29. Sworzeń dolny po zabezpieczeniu wkrętami z gniazdem sześciokątnym (zaznaczone na niebiesko)

Na rysunku 30 przedstawiono kompletny układ po wykonaniu wyszczególnionych wyżej kroków.



Rys. 30. Kompletny układ sadzący

**Załącznik 3. Zaświadczenie wydane przez Ośrodek Techniki Leśnej w Jarocinie –
podmiot zainteresowany wdrożeniem wyników niniejszej pracy**



Ośrodek Techniki Leśnej



Jarocin, 17 września 2024 r.

Zaświadczenie

Ośrodek Techniki Leśnej w Jarocinie, jako jednostka Lasów Państwowych oraz zakład o zasięgu krajowym, zaświadcza, iż jest zainteresowany wdrożeniem wyników pracy Pana Michała Szarolety, czy to w postaci dokumentacji, wiedzy, czy wyników samych badań.

Kierownik Działu Wdrożeń

Sebastian Nieciąg

Z poważaniem,

p.o. DYREKTORA ZAKŁADU

Bernadeta Błaszczuk

OŚRODEK TECHNIKI LEŚNEJ

63-200 Jarocin, ul. Przemysłowa 2 D
Santander Bank Polska S.A., Oddział Jarocin
57 1090 1121 0000 0005 1300 8303
NIP 617-00-03-854 GDO 000100858
REGON 250027011 tel. 62 747 35 82

Ośrodek Techniki Leśnej jest certyfikowanym wytwórcą zgodnie z normami PN-EN ISO 3834-2 oraz PN-EN 1090-2 w klasie konstrukcji EXC2.



Ośrodek Techniki Leśnej, ul. Przemysłowa 2D, 63-200 Jarocin
tel.: +48 62 747-35-82, fax: +48 62 747-29-33, e-mail: biuro@otljarocin.lasy.gov.pl
Nr GDO 000100858

www.otljarocin.lasy.gov.pl