

UNIwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Wydział Przyrodniczo – Technologiczny
Instytut Inżynierii Rolniczej

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marek Brennensthul

**OCENA WŁAŚCIWOŚCI TRAKCYJNYCH UKŁADU
KOŁO – PODŁOŻE W ASPEKCIE ZDOLNOŚCI
UCIĄGOWYCH CIĄGNIKA JAKO UNIWERSALNEGO
ŹRÓDŁA ENERGII POCIĄGOWEJ**

promotor:
prof. dr hab. inż. Włodzimierz Białczyk

Wrocław 2012

Spis treści

1. Wstęp	4
2. Stan badań nad problematyką oddziaływania mechanizmów jezdnych na podłoże	11
2.1. Badania nad skutkami oddziaływania mechanizmów jezdnych na podłoże	13
2.1.1. Prace teoretyczne (modelowe)	14
2.1.2. Prace eksperymentalne nad oddziaływaniem mechanizmów jezdnych na podłoże	17
2.2. Badania nad mechaniką układu koło – podłoże	25
2.2.1. Prace teoretyczne na mechaniką układu koło – podłoże	26
2.2.2. Prace badawcze nad mechaniką układu koło – podłoże	28
3. Cel pracy	37
4. Przedmiot i warunki badań	39
4.1. Warunki atmosferyczne	41
4.2. Charakterystyka podłoża	44
4.2.1. Podłoże I: ścierniska w trzech systemach uprawowych	44
4.2.2. Podłoże II: gruntowa droga leśna	49
4.2.3. Podłoże III: darń łąkowo – pastwiskowa	50
4.2.4. Podłoże IV: gleba o różnym stopniu zagęszczenia	52
4.3. Charakterystyka opon użytych do badań	53
5. Metodyka badań	60
5.1. Koncepcja realizacji badań	60
5.1.1. Etap I – badania rozpoznawcze	60
5.1.2. Etap II – badania właściwe	61
5.2. Określanie parametrów podłoża	62
5.2.1. Pomiar wilgotności i zwięzłości	62
5.2.2. Pomiar maksymalnych naprężeń ścinających	63
5.3. Określanie właściwości trakcyjnych	64
5.4. Opracowanie wyników badań	67
5.5. Analiza statystyczna wyników badań	69
6. Wyniki badań	71
6.1. Badania etapu I (2010)	71
6.1.1. Właściwości podłoża	71
Wilgotność	71
Zwięzłość	72

Maksymalne naprężenia ścinające.....	73
6.1.2. Właściwości trakcyjne	74
Siła trakcyjna.....	74
Opór przetaczania	78
Sprawność trakcyjna	81
6.2. Badania etapu II (2011, 2012).....	85
6.2.1. Właściwości podłoża.....	85
Wilgotność	85
Zwięzłość	86
Maksymalne naprężenia ścinające.....	88
6.2.2. Właściwości trakcyjne	89
Siła trakcyjna.....	89
Opór przetaczania	115
Sprawność trakcyjna	122
Bilans mocy.....	145
6.3. Teoretyczna ocena transmisji mocy.....	170
6.3.1. Wariant I – ciągnik wyposażony w opony napędowe 7.5-16.....	173
Prędkość jazdy 8 km·h ⁻¹	173
Prędkość jazdy 12 km·h ⁻¹	176
6.3.2. Wariant II – ciągnik wyposażony w opony napędowe 8.3-20	178
Prędkość jazdy 8 km·h ⁻¹	178
Prędkość jazdy 12 km·h ⁻¹	181
7. Podsumowanie i wnioski	184
7.1. Podsumowanie.....	184
7.2. Wnioski	191
Spis literatury	193
Spis tabel.....	206
Spis rysunków	209
Wykaz oznaczeń.....	216

1. Wstęp

Ciągniki rolnicze stanowią obecnie podstawowe źródło energii pociągowej w rolnictwie, zarówno przy polowych procesach produkcji rolniczej jak i przy pracach transportowych. Według danych GUS, w Polsce w 2009 roku zarejestrowanych było 1577,3 tys. sztuk ciągników [GUS 2010]. Obok wysokiej wydajności istotną a zarazem oczekiwaną cechą ciągników rolniczych jest ich uniwersalność, która przejawia się tym, że ten sam ciągnik może być wykorzystywany do wielu prac na odmiennych podłożach; przy użyciu takiego ciągnika mogą być wykonywane wszelkie prace polowe, jak i transportowe.

Początki wprowadzania mechanizacji prac polowych przypadają na pierwszą połowę XIX wieku. Wówczas to okazało się, że żywa siła pociągowa jest mało wydajnym źródłem energii pociągowej, przejawiało się to zwłaszcza przy najbardziej energochłonnym zabiegu, czyli orce. Stosowane wtedy były pługi wielokorpusowe zaprzęgane w kilka par koni, a dalszy wzrost wydajności przy tym źródle energii pociągowej był niemożliwy. Dostrzeżono, że żywa siła pociągowa może zostać zastąpiona przez maszynę parową, która wcześniej z powodzeniem była stosowana w przemyśle. Oczekiwany efekt takiego zabiegu miało być większe uniezależnienie się od warunków pogodowych, a w konsekwencji spowodowanie terminowego wykonywania zabiegów agrotechnicznych. Rzeczą oczywistą było to, że wprowadzenie takiego sposobu mechanizacji dotyczyło gospodarstw o znacznych powierzchniach [Białczyk 2005].

Pierwsze maszyny parowe wykorzystywane przy orce nosiły nazwę lokomobili i były maszynami stacjonarnymi; podczas pracy stały one w jednym miejscu i przeciągały pług za pomocą liny nawijanej na bęben. Transport takich lokomobili na miejsce pracy odbywał się przy użyciu zaprzęgu konnego. W połowie XIX wieku podjęto pierwsze próby zastosowania napędu kół jezdnych lokomobili, co spowodowało, że pojazdy te zaczęły stawać się samojezdnymi źródłami energii pociągowej. W drugiej połowie XIX wieku nastąpił intensywny rozwój konstrukcji lokomobili – zaczęto stosować zaczepy umożliwiające agregatowanie z różnymi maszynami rolniczymi, co w pewnym stopniu zwiększyło ich uniwersalność. Istotne modyfikacje dotyczyły układów jezdnych – w celu zwiększenia siły uciągu wprowadzono ostrogi na kołach napędowych. W latach 70-tych XIX wieku w układzie przeniesienia napędu zaczęto stosować przekładnie łańcuchowe zamiast zębatych, wprowadzono bardziej zaawansowane mechanizmy sterowania. Wzrastała przy tym moc stosowanych silników oraz masa lokomobil. Liczne zmiany

konstrukcyjne spowodowały, że zwiększyła się wydajność tych pojazdów jako źródła energii pociągowej [Habich 1948, Białczyk 2005, Duarte, Somoudip 2009].

W 1878 wynaleziony został silnik spalinowy o spalaniu wewnętrznym, który okazał się rewolucyjnym wynalazkiem jako źródło energii dla wielu pojazdów. W odniesieniu do pojazdów rolniczych pierwsza udana próba zastosowania silnika spalinowego nastąpiła w roku 1892. Wtedy to w Stanach Zjednoczonych J. Froehlich skonstruował czterokołowy ciągnik napędzany jednocyndrowym silnikiem spalinowym o mocy 30 KM. Ciągnik ten posiadał prostą skrzynię biegów umożliwiającą jazdę do przodu i do tyłu, masa tego pojazdu wynosiła 4 tony. Niemożliwe było wydajne użytkowanie ciągników przy pracach transportowych, bowiem ówczesne ciągniki posiadały sztywne (żelazne) koła jezdne oraz układy napędowe prostej konstrukcji [Goering, Hansen 2004, Białczyk 2005]. Szacowano, że w pierwszych ciągnikach moc uciągu stanowiła jedynie 30% mocy silnika, reszta mocy była zużywana na pokonanie oporów ruchu. Względy te sprawiały, że prędkości jazdy po drogach utwardzonych były niewielkie ($2 - 4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), co nie pozwalało na zapewnienie wysokiej wydajności prac transportowych [Habich 1948]. Na uwagę zasługuje fakt, że wprowadzenie silnika spalinowego nie przyczyniło się do wyeliminowania maszyn parowych jako źródła napędu maszyn rolniczych. Stało się tak dlatego, że istniało zapotrzebowanie na wysoce wydajne źródła energii przeznaczone dla wielkoobszarowych gospodarstw – takie wymogi spełniały wówczas tylko lokomobile.

Równolegle z rozwojem konstrukcji ciągników rolniczych, w pierwszych latach XX wieku wytwarzano tzw. pługi motorowe, których konstrukcja wynikała z potrzeb zmechanizowania najbardziej energochłonnego zabiegu agrotechnicznego jakim była orka. Pług te z założenia były jednozadaniowe; przeznaczone były wyłącznie do orki; oprócz silnika i układu napędowego posiadały korpusy płużne mocowane na stałe. W pługach motorowych stosowano silniki o mocach dochodzących niekiedy do 40 KM, liczba korpusów wynosiła nawet 10, toteż możliwe było uzyskanie wysokich jak na tamte czasy wydajności orki. Do najbardziej znanych producentów pługów motorowych zaliczano firmy Stock, Pöhl, Akra, Praga. Pojawianie się coraz to doskonalszych konstrukcji ciągników sprawiło, że po 1920 roku nastąpił spadek zainteresowania pługami motorowymi, wtedy też zaniechano ich dalszego rozwoju i produkcji [Krauze 1916, Białczyk 2005].

W latach 1905 – 1920 nastąpił dynamiczny rozwój konstrukcji ciągników. Wprowadzono szereg nowych rozwiązań w układach napędowych i jezdnych,

co przyczyniło się do zwiększenia uniwersalności ciągników. Widoczne stało się dążenie konstruktorów do zmniejszania masy ciągników – efektem tego było mniej negatywne oddziaływanie na podłoża rolnicze, a także, w pewnym stopniu, zwiększenie uniwersalności. Potrzeba opracowania konstrukcji niewielkiego ciągnika rolniczego była podyktowana koniecznością zmechanizowania prac w małych gospodarstwach rolnych, czyli tam, gdzie wykorzystywano żywą siłę pociągową. W tym samym czasie w dużych gospodarstwach rolnych wykorzystywano lokomobile. W 1917 rozpoczęto produkcję ciągnika Fordson (konstrukcja – H. Ford). Ciągnik ten posiadał konstrukcję bezramową i był napędzany silnikiem spalinowym o mocy 20 KM. Wojna cenowa zapoczątkowana przez Henry’ego Forda doprowadziła do likwidacji wielu firm produkujących ciągniki, a efektem było pozostanie na rynku kilku producentów takich jak John Deere, Massey-Harris czy Case [Białczyk 2005, Duarte, Somoudip 2009]. Próby produkcji małego ciągnika podjęto również w Polsce – na początku lat 20-tych w zakładach Ursus opracowano konstrukcję tzw. ciągowki czyli pierwszego polskiego ciągnika napędzanego silnikiem spalinowym [Białczyk 2005]. Problem dostarczenia ciągnika, który byłby uniwersalnym źródłem energii pociągowej pojawił się w połowie lat 20-tych. W roku 1924 firma International Harvester po raz pierwszy używa pojęcia „General Purpose Tractor”, co oznaczało „ciągnik ogólnego przeznaczenia”. Pojęcie to zostało także użyte w odniesieniu do modelu Farmall F; ten trójkołowy ciągnik ważył 3950 kg i napędzany był silnikiem o mocy 20 KM. Skrzynia biegów tego pojazdu posiadała trzy przełożenia, zaś prędkość maksymalna wynosiła $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Na uwagę zasługuje fakt, iż był to jeden z pierwszych ciągników posiadających wałek odbioru mocy umożliwiający przenoszenie napędu na współpracujące maszyny. Innymi ciągnikami ogólnego przeznaczenia w tamtym okresie były John Deere 10-20GP czy też Massey Harris 15/22 GP (litery GP w nazwach tych modeli to skrót od słów „General Purpose”). Pod koniec lat 20-tych w ciągniku rolniczym po raz pierwszy zastosowano trójpunktowy układ zawieszenia narzędzi umożliwiający regulację siłową przy wykonywaniu orki. Inną ważną modernizacją było wprowadzenie w ciągnikach napędu na cztery koła. Wprowadzone modernizacje sprawiły, że ciągnik rolniczy stawał się coraz bardziej wszechstronnym źródłem energii w rolnictwie [Białczyk 2005, Leffingwell 2002, McMillan, Broehl 2007, White 2008].

Należy zaznaczyć, że używane w latach 20-tych pojęcie „General Purpose” odnosiło się bardziej do uniwersalności przy pracach polowych. Zgodnie z założeniami ówczesnych konstruktorów ciągniki określane tym mianem były przeznaczone dla małych gospodarstw i miały znaleźć zastosowanie przy orce, uprawie i zabiegach pielęgnacyjnych

(ciągniki te niekiedy były też nazywane „row crop tractors” czyli „ciągniki do upraw rzędowych”). Ze względu na konstrukcję układów jezdnych (koła stalowe z ostrogami, a niekiedy koła z warstwą pełnej gумы) ówczesne ciągniki nie posiadały prędkości transportowych, niemożliwe bowiem było osiągnięcie wymaganych sił hamujących. Dlatego też ciągniki te były powszechnie wykorzystywane przy zróżnicowanych pracach rolniczych, niemożliwe było jednak wydajne użytkowanie ich przy pracach transportowych [Białczyk 2005, Habich 1948, White 2008].

Na początku lat trzydziestych podjęto próby stosowania w ciągnikach rolniczych ogumienia pneumatycznego. Zorientowano się wówczas, że opona pneumatyczna wynaleziona już w roku 1888 i z powodzeniem stosowana w pojazdach samochodowych może przyczynić się również do rozwoju konstrukcji pojazdów rolniczych. Do głównych korzyści płynących ze stosowania opon pneumatycznych w ciągnikach zaliczono możliwość uzyskiwania większych prędkości na drogach utwardzonych oraz redukcję negatywnego oddziaływania na podłoża rolne. Ważny przy tym był również aspekt ekonomiczny; ze względu na mniejsze opory toczenia opon pneumatycznych możliwe było zmniejszenie zużycia paliwa. Powyższe względy sprawiły, że ciągniki wyposażone w opony pneumatyczne mogły być efektywnie stosowane zarówno do prac polowych, jak i do transportu. Stały się zatem w pełni wszechstronnym źródłem energii w rolnictwie [Białczyk 2005, Goering, Hansen 2004].

Wprowadzenie kół ogumionych i związana z nim możliwość zwiększenia prędkości jazdy wymusiły dalsze modernizacje konstrukcji ciągników. W związku z tym w pierwszej połowie lat 30-tych modyfikacjom poddawano przede wszystkim układy napędowe. Skrzynie biegów ciągników z tamtego okresu posiadały często od czterech do sześciu przełożeń, zwiększył się także zakres prędkości jazdy; dotyczyło to zwłaszcza prędkości transportowych. Wprowadzono ponadto liczne udoskonalenia zwiększające wszechstronność stosowania ciągników. W 1935 roku po raz pierwszy zamontowano w ciągniku podnośnik hydrauliczny połączony z trójpunktowym układem zawieszenia narzędzi. Jednym z pierwszych ciągników, w którym stosowano takie rozwiązanie był John-Deere B, którego produkcja rozpoczęła się w 1934 roku. Ten trójkołowy ciągnik posiadał ogumienie pneumatyczne oraz sześciobiegową skrzynkę przekładniową, która umożliwiała jazdę z prędkościami z zakresu $2,4 - 16 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. W latach 30-tych zaobserwować można było upowszechnienie idei małego uniwersalnego ciągnika; wiele firm zarówno amerykańskich, jak i europejskich wprowadzało do produkcji ciągniki

uniwersalne przeznaczone dla niewielkich gospodarstw [Białczyk 2005, McMillan, Broehl 2007].

Wybuch Drugiej Wojny Światowej dla wielu firm produkujących ciągniki oznaczał przekwalifikowanie produkcji na potrzeby zbrojeniowe. Po zakończeniu wojny wielu wytwórców kontynuowało produkcję modeli dostępnych przed jej wybuchem. Ponadto, produkcja na potrzeby wojska spowodowała rozwój pewnych technologii, które później mogły być wykorzystane przy produkcji ciągników. W drugiej połowie lat 40-tych dostrzeżono potrzebę intensyfikacji produkcji niewielkich ciągników przeznaczonych dla małoobszarowych gospodarstw; przykładowe hasło reklamowe ciągników John-Deere z tamtych lat brzmiało „with light tractor economy”. Standardem w układach jezdnych ciągników stały się koła ogumione, co w połączeniu z zaawansowanymi konstrukcjami układów napędowych pozwalało na uzyskiwanie coraz to większych zakresów prędkości, zarówno roboczych, jak i transportowych. Przykładem typowej konstrukcji z lat 40-tych jest ciągnik Allis-Chalmers B, który napędzany był silnikiem o mocy 20 KM, posiadał masę 1027 kg, a zakres jego prędkości wynosił 3,3 – 18,5 km·h⁻¹. Pod koniec lat 40-tych nadal powszechnie używa się określenia „ciągnik uniwersalny” – do charakterystycznych cech takiego ciągnika zaliczano wtedy zwiększony prześwit, zmienny rozstaw kół, dużą zwrotność. Ówczesne ciągniki uniwersalne wedle założeń posiadały wałek odbioru mocy i koło pasowe, moc silnika wynosiła 20 – 40 KM, zaś najwyższy bieg umożliwiał jazdę z prędkością powyżej 20 km·h⁻¹. Względny te sprawiły, że ciągniki takie stały się wszechstronnym źródłem energii dla małoobszarowych gospodarstw; mogły być wykorzystywane przy wszelkich pracach polowych, transportowych, a nawet jako źródło napędu maszyn stacjonarnych, co znajdowało zastosowanie w przypadku gospodarstw nieelektryfikowanych [Białczyk 2005, Habich 1948].

Pewną konsekwencją przekwalifikowania produkcji na potrzeby zbrojeniowe w czasie II Wojny Światowej było uzyskanie doświadczenia przy konstruowaniu ciągników gąsienicowych. Względny te sprawiły, że w okresie powojennym powstało wiele konstrukcji tych pojazdów, które odznaczały się dobrymi zdolnościami uciągowymi i niskimi naciskami jednostkowymi wywieranymi na glebę. Jednak ciągniki te, ze względu na konstrukcję układów jezdnych odznaczały się ograniczonymi możliwościami użytkowymi – praktycznie niemożliwe było użytkowanie takich ciągników do transportu po drogach publicznych. Względny te sprawiły, że w latach 70-tych zainteresowanie ciągnikami gąsienicowymi zaczęło słabnąć [Białczyk 2005].

Lata 50-te to okres, w którym obserwuje się dwukierunkowy rozwój konstrukcji ciągników rolniczych; z jednej strony udoskonalano konstrukcje ciężkich ciągników o dużych mocach i wydajnościach, z drugiej zaś strony na rynek wprowadzano duże ilości lekkich wszechstronnych ciągników niekiedy nazywanych „Pony”. W obu przypadkach konstrukcje ciągników ulegały ciągłym modernizacjom. W tamtym okresie jako źródło napędu ciągników upowszechniły się silniki o zapłonie samoczynnym. Modyfikowane były układy napędowe; powszechnie zaczęto stosować reduktory, pojawiły się ponadto rozwiązania pozwalające na przełączanie biegów pod obciążeniem. Względy te sprawiły, że ilość przełożeń ciągle wzrastała, tym samym zwiększał się zakres prędkości jazdy. Taka sytuacja wymusiła wzrost zainteresowania bezpieczeństwem użytkowania ciągników, toteż w latach 50-tych poczyniono ważne modernizacje układów kierowniczych i hamulcowych, a więc odpowiadających za bezpieczeństwo użytkowania [Goering, Hansen 2004]. W 1952 roku firma John-Deere po raz pierwszy w ciągniku rolniczym zastosowała hydrauliczne wspomaganie układu kierowniczego. Systematycznie wprowadzano również hydrauliczne układy hamulcowe. Ważnym krokiem było wprowadzenie do ciągników instalacji pneumatycznej, z której zasilane były hamulce przyczep, co znacznie zwiększyło bezpieczeństwo przy pracach transportowych. W latach 50-tych zaczęto ponadto zwracać większą uwagę na oddziaływanie układów jezdnych ciągników na podłoża rolnicze. To właśnie w tym okresie powstała duża ilość prac naukowych, w których sformułowano podstawy terramechaniki czyli nauki zajmującej się zagadnieniami współpracy kół z podłożami odkształcalnymi [Bekker 1956, Soehne 1961]. W 1957 roku do ciągników wprowadzono pierwsze opony radialne, które mniej intensywnie ugniatały glebę, ponadto zapewniały lepsze właściwości trakcyjne [Forrest i in. 1962]. Liczne modernizacje i udoskonalenia konstrukcji przyczyniły się do zwiększenia uniwersalności ciągników rolniczych, które mogły być wydajnie i bezpiecznie użytkowane do wielu prac na zróżnicowanych podłożach.

Kolejne lata oznaczają dalsze modernizacje konstrukcji ciągników rolniczych; w dużym stopniu dotyczyło to układów napędowych. Pojawiły się synchronizowane i zautomatyzowane skrzynie biegów; często stosowane były wzmacniacze momentu obrotowego. Względy te sprawiły, że w ciągnikach z lat 60-tych liczba przełożeń najczęściej przekraczała już 10, a maksymalna prędkość dochodziła do $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. W latach 70-tych w układach napędowych ciągników zaczęto wprowadzać przekładnie hydrostatyczne, co pozytywnie wpłynęło na przekazywanie mocy z silnika na koła a także na zakres prędkości roboczych. Ciągłe modernizacje układów napędowych sprawiły,

że ciągniki posiadały już tzw. prędkości superpełzające (poniżej $0,1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), zwiększyły się także maksymalne prędkości jazdy. Przedstawione zmiany konstrukcyjne przyczyniły się do zwiększenia zarówno wydajności, jak i wszechstronności stosowania ciągników rolniczych.

Lata 70-te i 80-te oznaczały rozwój ciągników determinowany wymaganiami agrotechnicznymi, energetycznymi i ekologicznymi. W większym stopniu podejmowane były działania mające na celu minimalizację negatywnego oddziaływania układów jezdnych ciągników na podłoża glebowe. Liczne modyfikacje i udoskonalenia (wałki odbioru mocy o różnych prędkościach obrotowych, przednie układy zawieszenia narzędzi, rozbudowane układy hydrauliczne) spowodowały przede wszystkim wzrost wydajności ciągników jako źródła energii pociągowej.

Wielokierunkowy rozwój konstrukcji ciągników rolniczych doprowadził do tego, że dzisiaj pojazdy te odznaczają się znacznymi wydajnościami, cechują się ponadto możliwością wszechstronnego stosowania. Używane są do wielu prac; stanowią źródło energii dla różnych maszyn roboczych przy zabiegach polowych, są również wykorzystywane do prac transportowych. Istotny jest przy tym fakt, iż podłoża na których wykorzystywane są ciągniki mogą być bardzo zróżnicowane pod względem postaci i właściwości. Ten sam ciągnik wyposażony w jeden komplet opon może bowiem wykonywać zabiegi agrotechniczne na różnych rodzajach gleb czy też na podłożach zadarnionych. Podłoża te mogą znacznie różnić się właściwościami, różne mogą być zatem warunki przenoszenia siły trakcyjnej.

Powyższe rozważania wymuszają pytanie o ekonomiczny sens użytkowania uniwersalnych ciągników rolniczych. Rodzi się wątpliwość czy użytkowanie tego samego ciągnika w krańcowo różnych warunkach nie pociągnie za sobą nadmiernych strat. Konieczne staje się wykazanie czy eksploatacja uniwersalnego ciągnika rolniczego odbywa się zawsze w korzystnym zakresie charakterystyki trakcyjnej, ze szczególnym uwzględnieniem sprawności trakcyjnej. Nie bez znaczenia jest również aspekt ekologiczny związany z nadmiernym zniszczeniem wierzchniej warstwy podłoża.

2. Stan badań nad problematyką oddziaływania mechanizmów jezdnych na podłoże

Opisane we wstępie zmiany koncepcji ciągnika jako uniwersalnego źródła energii niewątpliwie wynikały z oczekiwań ich użytkowników, jak również były efektem badań naukowych, które prowadzono już od momentu powstania pierwszych pojazdów rolniczych. Z racji tego, że koncepcje tych pojazdów zmieniały się wielokrotnie, zasadnym wydaje się przedstawienie intensywności tych badań w ujęciu historycznym.

Pierwszym negatywnym skutkiem wprowadzania ciężkich maszyn na pole było ugniatanie gleby. Już w roku 1913 powstała praca opisująca zależność między naciskiem wywieranym na glebę a jej deformacją pionową, a mianowicie praca „Probleme zur experimentellen Motorpflugmechanik” niemieckiego badacza R. Bernsteina [1913]. Publikacja ta była niejako odpowiedzią na problematykę nadmiernej deformacji podłoża, stwierdzoną podczas praktyki rolniczej - w trakcie eksploatacji ówczesnych ciężkich pojazdów rolniczych.

Drugim obszarem badań prowadzonych w drugim dziesięcioleciu XX wieku były zagadnienia związane z ekonomiką eksploatacji pojazdów rolniczych. Stopniowe wprowadzanie do użytku ciągników napędzanych silnikami spalinowymi sprawiło, że prowadzono badania, w których porównywano te ciągniki do swoich poprzedników czyli lokomobili. Ponadto porównywano zużycie paliwa przez ciągniki różnych producentów. Nieco inne badania przeprowadzano w odniesieniu do pługów motorowych – oprócz określania zużycia energii oceniano również jakość wykonania orki [Krauze 1916].

Podyktowane wymogami praktyki rolniczej wprowadzanie lżejszych ciągników sprawiło, że zaczął się zmieniać kierunek prowadzonych prac badawczych. Lżejsze pojazdy powodowały mniej intensywne oddziaływanie na podłoże, zaczęto jednak zwracać uwagę na ekonomiczny aspekt eksploatacji tych pojazdów na różnych podłożach. Zaszła ponadto potrzeba polepszania właściwości trakcyjnych pojazdów – oczywiście działania takie musiały być poparte wiedzą teoretyczną. Dlatego też w latach trzydziestych zaczęto przeprowadzać badania, których celem było szczegółowe opisanie procesu ruchu koła po podłożach odkształcalnych [Świeżawski 1932, Kanafojski 1934, Goriaczkin 1937]. Ugniatanie podłoża zaczęto rozpatrywać nie tylko w kwestii nadmiernej deformacji, ale również pod kątem strat energetycznych [Mc Kibben, Hall 1940].

Rozkwit badań dotyczących układu pojazd – teren nastąpił w latach 50-tych XX wieku. Jednym z pierwszych badaczy w tym zakresie był amerykański naukowiec

polskiego pochodzenia M.G. Bekker, który w swojej pracy „Theory of Land Locomotion” [1956] zawarł teoretyczne podstawy współpracy koła z podłożem odkształcalnym. Znaczny rozwój terramechaniki czyli dziedziny badawczej zajmującej się układem pojazd – teren spowodował zaistnienie wielu nurtów badawczych; badania prowadzone były wielowątkowo, z uwzględnieniem różnych aspektów. Zaznaczyć przy tym należy, że wspomniany rozwój podyktowany był nie tylko wymogami stawianymi przez praktykę rolniczą, ale dotyczył również techniki wojskowej, która często wykorzystywała wyniki badań trakcyjnych do projektowania układów jezdnych pojazdów militarnych.

Szczególnie intensywne prace badawcze przypadają na lata 60-te i 70-te. Powstało wówczas wiele prac traktujących o skutkach oddziaływania techniki rolniczej na podłoża, jak i prac o mechanice układu koło – podłoże. Do pierwszej grupy zaliczamy prace Soehnego [1961], Grecenki [1969], Wonga [1967] czy Chancellor [1976]. W obrębie badań omawianego zakresu powstało wiele prac modelowych (teoretycznych), w których przedstawiano formuły matematyczne pozwalające na szacowanie parametrów trakcyjnych [Janosi, Hanamoto 1962, Kacigin, Guskov 1969, Wismer, Luth 1974]. Ponadto prowadzono badania nad wpływem poszczególnych czynników na właściwości trakcyjne koła [Taylor 1973, Taylor 1974, McAllister i in. 1976]. Z racji wprowadzania coraz to nowszych rozwiązań w układach napędowych znaczna część badań dotyczyła porównywania poszczególnych rozwiązań technicznych [Forrest i in. 1962, Gee-Clough 1977, Perdok 1978].

Lata 80-te to okres intensyfikacji badań dotyczących przenoszenia siły trakcyjnej w układzie koło – podłoże. Prace naukowe z tamtego okresu traktowały często o możliwościach poprawy właściwości uciągowych pojazdów rolniczych, uwzględniane przy tym były zarówno parametry konstrukcyjne, jak i eksploatacyjne. Analizowane były wielkości siły trakcyjnej, sprawności trakcyjnej, poślizgu czy też oporu przetaczania. Istotny jest fakt, że znaczna część prac z tamtego okresu bazowała na badaniach eksperymentalnych; zmniejszyła się natomiast liczba prac teoretycznych. Przykładowo wymienić tu można prace Burta i Bailey [1981], Dwyera [1984], McAllistera [1983] czy Wulfsohna [1988].

W latach 90-tych kontynuowano badania dotyczące zarówno właściwości trakcyjnych, jak i skutków ruchu koła po podłożach. Powstała znaczna ilość prac dotyczących skutków oddziaływania układów jezdnych na podłoża [Okello 1992, Wulfsohn 1992, Raper i in. 1994, Raper i in. 1995b, Bailey i in. 1996]. Powstały również prace traktujące o wpływie czynników konstrukcyjnych na właściwości trakcyjne koła

[Bashford i in. 1993, Reicherberger 1992, Zoz i in. 1994, Zoz i in. 1999] oraz prace, w których przedstawiono modele opisujące współpracę koła z podłożami [Wanjii 1997].

W ostatnich latach obserwuje się ponowny wzrost zainteresowania kwestiami nadmiernej deformacji podłoża [Botta i in. 2002, Horn 2003, Way i in. 2004, Arvidsson, Keller 2007a, 2007b, Antille i in. 2008, Ogunjirin i in. 2011]. W dalszym ciągu prowadzone są badania eksperymentalne dotyczące właściwości trakcyjnych [Jenane, Bashford 2000, Weissbach 2001, Carman 2002, Rosca i in. 2004a, 2004b, Elwaleed i in. 2006a, Van i in. 2007, 2008, Gholkar i in. 2009, Smerda, Cupera 2010]. Rozwój techniki komputerowej spowodował, że obserwuje się tendencje do przeprowadzania badań modelowych, często z wykorzystaniem programów komputerowych [Al-Hamed i in. 2001, Catalan i in. 2008, Pranav, Pandey 2008, Pranav i in. 2010].

W ujęciu historycznym, różnorodność badań układu koło – podłoże dotyczyła również techniki ich przeprowadzania. Wyróżnić tu można dwie zasadnicze grupy badań:

- badania w warunkach rzeczywistych – najczęściej były to badania polowe z wykorzystaniem rzeczywistych pojazdów wyposażonych w odpowiednią aparaturę pomiarową,
- badania w warunkach laboratoryjnych – ta grupa dotyczy badań, które przeprowadzane są na uprzednio przygotowanych próbkach podłoża umieszczanych w kanałach lub wannach glebowych. Ponadto do tej grupy zaliczamy badania wykonywane przy użyciu modeli odwzorowujących rzeczywiste pojazdy.

Przedstawiona powyżej charakterystyka badań dotyczących współpracy kół jezdnych z podłożem pozwala na wyodrębnienie dwóch głównych kierunków badawczych. Pierwszy z nich dotyczy skutków ruchu koła po podłożach użytkowanych rolniczo, natomiast drugi poświęcony jest mechanice układu koło – podłoże. Z racji wielowątkowości badań obu tych kierunków zasadne wydaje się przedstawienie każdego z nich oddzielnie.

2.1. Badania nad skutkami oddziaływania mechanizmów jezdnych na podłoża

Przemieszczanie koła pojazdu po podłożach odkształcalnych zawsze skutkuje zmianą ich właściwości. W przypadku podłoża wykorzystywanych rolniczo zmiany te zazwyczaj są niekorzystne, toteż prowadzono liczne badania dotyczące reakcji podłoża na oddziaływanie mechanizmów jezdnych pojazdów. Ogólnym celem takich badań było

opisanie mechanizmu powstawania odkształceń podłoża, co mogłoby umożliwić podjęcie działań zmierzających do redukcji negatywnego wpływu układów jezdnych.

Właściwości podłoża glebowych są opisywane z wykorzystaniem określonych parametrów. Jedną z podstawowych cech opisujących stan gleby jest jej gęstość objętościowa. Zasadniczym negatywnym skutkiem towarzyszącym ruchowi koła po glebie jest zagęszczenie. Objawia się ono szczelniejszym ułożeniem cząstek gleby w jednostce objętości, co skutkuje wzrostem gęstości objętościowej. W przypadku gleb użytkowanych rolniczo wzrost zagęszczenia powodować może szereg negatywnych zjawisk. Badania wykazały, że duże zagęszczenie oznaczać będzie zwiększony opór dla korzeni roślinności, co skutkować może spadkiem plonowania [Nevens, Reheul 2003, Chan i in. 2005]. Zwiększenie zagęszczenia oznacza ponadto redukcję objętości porów glebowych, co skutkuje pogorszeniem właściwości retencyjnych gleby [Horn i in. 2003, Lipiec i in. 2003, Kopeć i in. 2004]. Pogorszone zostają zdolności do gleby do zatrzymywania pierwiastków niezbędnych do prawidłowego rozwoju roślin [Situala i in. 2000, Nevens, Reheul 2003]. Konieczność ograniczania przedstawionych powyżej negatywnych skutków biologicznych sprawia, że zasadne stają się badania nad problematyką ugniatania podłoża na skutek ruchu pojazdów rolniczych.

Prace opisujące oddziaływanie układów jezdnych na podłoża podzielić można na dwie zasadnicze grupy. Pierwszą grupę stanowią prace o charakterze teoretycznym, w których wyznaczane są zależności (modele) opisujące kontakt opony z podłożem. W drugiej grupie prac opisywane są wyniki eksperymentów badawczych nad oddziaływaniem układów jezdnych na podłoża.

2.1.1. Prace teoretyczne (modelowe)

Zasadniczym celem prac teoretycznych jest opracowanie modeli opisujących reakcję podłoża na oddziaływanie układów jezdnych. Najczęściej modele takie opisują stopień deformacji poprzez podanie zagłębienia koła, przemieszczenia poziomego warstwy gleby, głębokości koleiny bądź naprężeń pod kołem. W niektórych pracach formułuje się modele opisujące zmianę właściwości wytrzymałościowych gleby takich jak zwężłość czy naprężenia ścinające. Uwzględniane są przy tym parametry podłoża (np. początkowa gęstość objętościowa, wilgotność) oraz parametry układu jezdnego (obciążenie pionowe, średnica i szerokość koła, ugięcie opony itp.). Formułowanie takich modeli opiera się najczęściej na wcześniejszych badaniach eksperymentalnych.

Jedną z pierwszych prac dotyczących deformacji gleby była publikacja Bernsteina [1913]. Opracowana przez tego autora formuła opisywała nacisk jednostkowy wywierany na glebę jako funkcję deformacji pionowej podłoża i współczynników zależnych od rodzaju i stanu podłoża. Bernstein przeprowadził swoje badania z wykorzystaniem stempla, co sprawiało, że nie do końca mogły one odwzorowywać ruch koła pojazdu po podłożu odkształcalnym. Natomiast Goriaczkin [1937] dokonał opisu wpływu ruchu koła na deformację podłoża; w swojej pracy przedstawił matematyczne formuły opisujące wielkość naprężeń normalnych w glebie w zależności od wielkości nacisku koła.

W latach 50-tych w okresie intensywnego rozwoju terramechaniki opracowano dużą liczbę modeli deformacji podłoża. Jednym z głównych badaczy w tej dziedzinie był Bekker, który opracował formuły określające zagłębienie koła, opór przetaczania czy wielkość naprężeń w glebie. Co prawda formuły te odnosiły się do konkretnych warunków ruchu koła, jednak w późniejszych latach zostały one zmodyfikowane przez innych badaczy, co zwiększyło uniwersalność ich stosowania.

Jednym z czynników, od których zależy może deformacja gleby jest powierzchnia kontaktu opony z podłożem, jej wyznaczenie stało się przedmiotem wielu badań. Ogólne równanie powierzchni kontaktu opony z podłożem uwzględnia długość i szerokość odcisku opony oraz współczynniki zależne od rodzaju i stanu podłoża. Pewnym problemem jest tu odkształcalność zarówno podłoża, jak i opony, dlatego Söhne [1970] zaproponował model, który zakładał zamianę elastycznego koła na koło sztywne o średnicy zastępczej (większej od średnicy koła elastycznego). Na podstawie obliczonej średnicy zastępczej wyznaczana mogła być powierzchnia kontaktu opony z podłożem odkształcalnym. Upadhyaya i Wulfsohn [1990] zaproponowali eliptyczny model kształtu powierzchni kontaktu opony z podłożem, podobny model opracował Hallonborg [1996]. Komandi [1990] przedstawił formułę, w której wielkość powierzchni kontaktu opony z podłożem zależna była od obciążenia pionowego opony, szerokości i średnicy koła, ciśnienia w ogumieniu, a także od parametrów gleby. Parametry te w równaniu wyrażane były w postaci stałych, charakterystycznych dla konkretnych rodzajów gleby (luźny piasek, zleżała gleba). Silversides i Sundberg [1989] określili powierzchnię kontaktu opony z podłożem jako stosunek obciążenia pionowego koła do ciśnienia powietrza w oponie. O'Sullivan [1999] określał powierzchnię kontaktu jako funkcję średnicy koła, jego szerokości i obciążenia pionowego oraz stałych zależnych od stanu podłoża. Grecenko [1995] w szacowaniu powierzchni kontaktu uwzględniał parametry geometryczne koła (średnica, promień toczenia, szerokość profilu) oraz ugięcie opony i parametry gleby

(definiowane stałymi przyjętymi na podstawie badań eksperymentalnych). Natomiast Krick [1969] przedstawił równanie, w którym wielkość powierzchni kontaktu była zależna jedynie od ugięcia opony i wysokości jej profilu. Na ogół przyjmowano, że kształt odcisku opony jest eliptyczny [Godbole i in. 1993, Lyasko 1994, 2010a], jednak Yong [1980] zaproponował tzw. powierzchnię modelową (zastępczą) o kształcie prostokątnym.

Z racji tego, że najbardziej intensywnym skutkiem ruchu pojazdu po glebie jest powstawanie koleiny oraz związane z tym zagęszczenie gleby, znaczna część prac odnosiła się do opisu pionowej deformacji podłoża. Bekker [1960] w swojej formule na zagłębienie pionowe koła uwzględniał wielkość nacisku koła, szerokość opony oraz parametry podłoża. Burt i in. [1974] określili zagłębienie pionowe jako funkcję wymiarów geometrycznych koła, poślizgu, obciążenia pionowego i stałych zależnych od stanu podłoża. Lyasko w swoich badaniach [1994, 2010b] zagłębienie pionowe opisywał jako iloczyn nacisku opony, pierwiastka z powierzchni kontaktu i stałej zależnej od rodzaju i stanu gleby. Canillas i Salokhe [2002] opracowali modele uwzględniające każdy z osobna rodzaj czynnika wpływającego na deformację pionową (parametry układu jezdnego, parametry podłoża i parametry eksploatacyjne). Nam i in. [2010] w formule na zagłębienie pionowe opony, oprócz parametrów geometrycznych i obciążenia pionowego uwzględniali również liczbę przejazdów koła.

W wyniku oddziaływania układów jezdnych na podłoże w jego strukturze dochodzi do powstawania naprężeń. Naprężenia te można podzielić na normalne (prostopadłe do powierzchni podłoża) oraz styczne (równoległe do powierzchni podłoża).

Ogólnie rzecz biorąc, naprężenia normalne są zależne od parametrów geometrycznych opony oraz od obciążenia pionowego. Jednak z racji odkształcalności opony oraz podłoża, zasadne było przedstawienie formuł opisujących wielkość naprężeń oraz nacisków, będących skutkiem ruchu koła. Jedno z pierwszych równań opisujących wielkość naprężeń normalnych zostało przedstawione przez Bekkera [1960] i uwzględniało zagłębienie opony i szerokość oraz stan i rodzaj podłoża (przedstawiony w postaci współczynnika). Zasadniczo formuła ta była rozwinięciem wcześniejszych równań Bernsteina i Goriaczkina i w kolejnych pracach była modyfikowana [Reece 1965, Kacigin, Guskov 1968, Sołtyński 1973]. Steiner [1979] opracował formuły na naciski dla opon radialnych i diagonalnych; formuły te uwzględniały obciążenie pionowe koła, ciśnienie powietrza w oponie oraz średnicę koła. W pracy Wanji i in. [1997] przedstawiono model naprężeń normalnych, w którym uwzględniono zagłębienie koła oraz

prędkość ruchu. Stasiak [2008] przedstawił formułę opisującą rozkład naprężeń w glebie pod kołem pojazdu; wielkość naprężeń była analizowana w funkcji głębokości.

Drugi rodzaj naprężeń (styczne) związany jest w pewnym stopniu z ruchem obrotowym koła i deformacją poziomą podłoża (przesunięcie warstwy gleby równoległe do podłoża). Od wytrzymałości podłoża na naprężenia ścinające zależy wielkość siły trakcyjnej, zatem zasadne wydaje się przedstawienie modeli opisujących wielkość naprężeń stycznych. Janosi i Hanamoto [1962] przedstawili formuły opisujące deformację poziomą oraz naprężenia styczne. Deformacja pozioma była funkcją tzw. kąta wejścia opony w glebę, natomiast naprężenia styczne zależne były od spójności gleby, jej kąta tarcia wewnętrznego i naprężeń normalnych. Bekker [1960] opracował natomiast model naprężeń stycznych będący funkcją deformacji poziomej i maksymalnych naprężeń stycznych, jakie jest w stanie przenieść dana gleba. Modyfikacji przedstawionych poprzednio formuł dokonał Söhne [1961] – w opracowanej formule uwzględnił zarówno spójność podłoża, jak i deformację poziomą. Przedstawione modele odnosiły się do konkretnych rodzajów podłoża, toteż w późniejszym okresie wielu badaczy modyfikowało przedstawione modele tak, aby znalazły one zastosowanie w odniesieniu do zróżnicowanych podłoży [Wong i in. 1982, Wanji i in. 1997].

2.1.2. Prace eksperymentalne nad oddziaływaniem mechanizmów jezdnych na podłoża

W dostępnej literaturze znaleźć można wiele prac, w których prezentowane były wyniki eksperymentów badawczych nad oddziaływaniem mechanizmów jezdnych na podłoża. W badaniach takich analizowanymi wielkościami są najczęściej deformacja (pionowa i pozioma), zmiany zwięzłości i gęstości objętościowej gleby, wartość i rozkład naprężeń w glebie. Czynniki, które mogą mieć wpływ na deformację podłoża można podzielić na dwie grupy: właściwości podłoża i parametry układów jezdnych. W tej drugiej grupie można jeszcze dokonać podziału na czynniki konstrukcyjne (wymiary zewnętrzne koła, rodzaj bieżnika, konstrukcja opony) oraz eksploatacyjne (obciążenie pionowe koła, ciśnienie w ogumieniu, prędkość jazdy).

Jednym z czynników najczęściej uwzględnianych przy badaniach deformacji pionowej podłoża jest obciążenie pionowe koła. Raper i in. [1994] badali wpływ obciążenia pionowego koła na wartości naprężeń w glebie. Wykazali, że zwiększanie obciążenia pionowego skutkuje wzrostem wartości naprężeń, przy czym wartość przyrostu zależna jest również od poziomu ciśnienia powietrza w oponie. W innej pracy [Raper

i in. 1995a] wykazano, że zwiększenie obciążenia pionowego skutkuje wzrostem wartości naprężeń w glebie a także zwiększeniem wymiarów koleiny. Bailey i in. [1996] badali wartości naprężeń normalnych i stycznych pod kołem przy dwóch różnych poziomach obciążenia; badania takie dokonywane były na dwóch rodzajach podłoża (gleba piaszczysta i gleba gliniasta). Wykazano, że zwiększenie obciążenia skutkowało wzrostem wartości zarówno naprężeń normalnych, jak i stycznych na obu rodzajach podłoża, przy czym najwyższy przyrost dotyczył naprężeń stycznych na glebie gliniastej. Sharma i Pandey [1996] wyznaczyli powierzchnie kontaktu z podłożem dla trzech opon oraz naprężenia w glebie przy różnych poziomach obciążenia pionowego. Wykazali, że przypadku wszystkich trzech opon zwiększenie obciążenia skutkowało wzrostem powierzchni kontaktu i naprężeń w glebie. W pracy Botta i in. [2002] przedstawiono wyniki badań oporów penetracji i gęstości objętościowej gleby w zależności od obciążenia pionowego koła. Pomiarów oporów dokonywano w trzech zakresach głębokości. Wykazano, że przy wyższym obciążeniu pionowym wartości oporów penetracji i gęstości objętościowej są wyższe niż przy niższym poziomie obciążenia. Istotne różnice w wartościach analizowanych parametrów stwierdzono nie tylko w bezpośredniej strefie oddziaływania mechanizmów jezdnych, ale również w podglebiu. Dopiero przy głębokościach powyżej 600 mm wpływ obciążenia pionowego na deformację gleby okazał się nieistotny. Carman [2002] badał wpływ obciążenia na zmiany gęstości objętościowej i powierzchni kontaktu opony z podłożem. Ponadto brane były pod uwagę inne czynniki: prędkość jazdy koła, rozmiar opony. W wyniku przeprowadzonych badań autor wykazał, że obciążenie pionowe jest głównym czynnikiem powodującym pionową deformację gleby. Pytka [2006] również wykazał zależność pomiędzy wartościami naprężeń pod kołem pojazdu a wielkością obciążenia pionowego koła. W pracy Arvidssona i Kellera [2007a] przedstawiono złożone wyniki badań na deformacją gleby na skutek ruchu koła; wyznaczane były wartości naprężeń normalnych i ich rozkład w wierzchniej warstwie, ponadto określano też naprężenia w podglebiu. Stosowane były trzy poziomy obciążenia pionowego (11, 15 i 33 kN). Autorzy wykazali, że w wierzchniej warstwie gleby (głębokość 0 – 10 cm) występował istotny wzrost wartości naprężeń normalnych na skutek zwiększania obciążenia pionowego koła. Jednak w głębszych warstwach gleby te zmiany nie były już wyraźne: na głębokości 30 cm przy pierwszym zwiększeniu obciążenia obserwuje się nawet pewien spadek wartości naprężeń, dopiero zastosowanie obciążenia maksymalnego (33 kN) skutkuje ponownym wzrostem naprężenia normalnego. Patel i Mani [2011] określali wpływ obciążenia pionowego na zmiany wartości gęstości

objętościowej, oporów penetracji gleby przy różnych głębokościach i przy różnej ilości przejazdów koła. Autorzy ci wykazali, że intensywność zagęszczania gleby na skutek wielokrotnych przejazdów jest mniejsza przy niższych obciążeniach pionowych koła. Przedstawione wyniki badań pozwalają stwierdzić, iż obciążenie pionowe koła ma niebagatelny wpływ na wielkość deformacji podłoża i stopień jego zagęszczenia.

Kolejnym czynnikiem eksploatacyjnym, który może wpływać na stopień deformacji podłoża jest rozmiar i konstrukcja opon pojazdu. Pojęcie „rozmiar opony” dotyczyć może zarówno jej średnicy, jak i szerokości a także tzw. wskaźnika profilu (stosunek wysokości profilu do szerokości). Konstrukcja opon odnosić się może do struktury wewnętrznej (opony radialne i diagonalne) bądź też do rzeźby bieżnika („klasyczny” bieżnik rolniczy o wysokich wystęпах, bieżnik do nawierzchni trawiastych, bieżnik transportowy). Od pewnego czasu obserwuje się tendencję do zastępowania w opon diagonalnych oponami radialnymi w pojazdach rolniczych. Względy te sprawiają, iż dokonywane były porównania obu konstrukcji opon w aspekcie ich negatywnego oddziaływania na podłoża rolnicze. Arvidsson i Ristic [1996] badali cztery różne opony i ich wpływ na wymiary koleiny, opór penetracji oraz wartości naprężeń w glebie. Badane opony różniły się wymiarami (szerokości od 470 do 650 mm, różne wskaźniki profilu) oraz konstrukcją (radialne i diagonalne). Wykazano, że stosowanie opony diagonalnej skutkuje powstawaniem większych naprężeń normalnych w glebie w porównaniu z oponami radialnymi o takich samych wymiarach i parametrach eksploatacyjnych. Ponadto, opony niskoprofilowe odznaczały się mniej intensywnym zagęszczaniem podłoża; w przypadku tych opon stwierdzono mniejszą głębokość koleiny a także mniejsze wartości naprężeń normalnych i oporów penetracji. Sharma i Pandey [1996] badali trzy opony o takich samych średnicach osadzenia, lecz różnych szerokościach w aspekcie ich oddziaływania na podłoże. Autorzy ci wykazali, że szerokość opony istotnie wpływa na wartości powierzchni kontaktu z podłożem oraz na naprężenia normalne. W pracy Antille i in. [2008] przedstawiono wyniki badań trzech opon radialnych o różnych szerokościach; opony te badano w aspekcie ich wpływu na deformację podłoża; analizowano pionowe odkształcenie gleby oraz zmiany jej gęstości objętościowej i oporu penetracji. Wykazano, że stosowanie opony o największej szerokości skutkowało najmniejszą intensywnością zagęszczania podłoża (najniższe wartości gęstości objętościowej oraz najmniejsza głębokość koleiny). Botta i in. [2008] porównywali opony radialne i diagonalne w aspekcie ich oddziaływania na dwie gleby uprawiane różnymi systemami. Analizowanymi czynnikami były naciski jednostkowe oraz gęstość

objętościowa gleby. Autorzy wykazali, że na obu badanych podłożach mniej intensywnym oddziaływaniem odznaczały się opony radialne. W przypadku tych opon stwierdzono też istotnie mniejszą głębokość koleiny. Way i in. [2009] badali wpływ szerokości i wysokości profilu opony na zmiany gęstości objętościowej i oporu penetracji gleby. Do badań wytypowali dwie opony o takich samych średnicach zewnętrznych, lecz różnych szerokościach oraz wysokościach profilu (400 i 490 mm), dodatkowym czynnikiem było ciśnienie powietrza w oponach (dwa poziomy). Autorzy wykazali, że przy wysokim poziomie ciśnienia powietrza opona o niższym profilu powoduje bardziej intensywne zagęszczanie gleby. Analiza oporów penetracji gleby po przejeździe badanych opon wykazała, że opona o wyższym profilu generuje mniejsze zagęszczenie gleby jedynie przy niższym poziomie ciśnienia powietrza, po zwiększeniu ciśnienia sytuacja ulega odwróceniu. Ponadto w opisywanej pracy dokonano analizy wartości naprężeń pod badanymi oponami w ich osi wzdłużnej oraz na brzegach. W przypadku obu opon wyższe wartości naprężeń wystąpiły pod centralną częścią. Kolejnym czynnikiem konstrukcyjnym, który był uwzględniany w określaniu wpływu opon na podłoża była wysokość występow bieżnika opon. Way i in. [1995] badali opony o trzech wysokościach bieżnika (100% - bieżnik nieużyty, 55% i 31% wysokości początkowej). Analizowany był wpływ wysokości występow na wartości naprężeń normalnych w glebie, po której poruszały się badane opony oraz na zmiany jej gęstości objętościowej. Wykazano, że opony o nieużytym bieżniku powodują większy wzrost gęstości objętościowej gleby w porównaniu z oponami zużytymi. Nie stwierdzono jednak istotnego wpływu wysokości występow bieżnika na wartości naprężeń normalnych.

Z przytoczonych powyżej prac wynika, że deformacja gleby jest zależna zarówno od obciążenia opony, jak i jej rozmiarów geometrycznych. Jednak w przypadku opon pneumatycznych ich właściwości mogą się zmieniać w zależności od poziomu ciśnienia powietrza. Z całą pewnością przy różnych poziomach ciśnienia różna będzie podatność opon na odkształcenia. Taka sytuacja może oznaczać, że opony o różnych ciśnieniach mogą w odmienny sposób oddziaływać na podłoża odkształcalne. Względy te sprawiły, że podejmowano badania nad ustaleniem wpływu ciśnienia na stopień deformacji podłoża. Raper i in. [1994] badali wpływ ciśnienia powietrza na wartość i rozkład naprężeń normalnych w glebie. Wykazano, że wartości naprężeń przy większym ciśnieniu powietrza są wyższe, przy czym największe różnice stwierdzono w centralnej części koleiny. W innej pracy [Raper i in. 1995b] badano wpływ ciśnienia powietrza w oponie na powierzchnię, szerokość i głębokość koleiny tworzonej przez badaną oponę. Stwierdzono,

że przy niższym ciśnieniu powietrza powierzchnia kontaktu opony z podłożem jest o 15% wyższa. Sharma i Pandey [1996] badali trzy opony o różnych wymiarach przy pięciu wartościach ciśnienia powietrza. Wykazali, że wszystkie trzy opony przy mniejszych poziomach ciśnienia odznaczały się większą powierzchnią kontaktu z podłożem. Ciśnienie powietrza miało również istotny wpływ na naciski jednostkowe generowane przez badane opony; mniejsze wartości ciśnienia oznaczały w tym przypadku mniejsze naciski na styku opon z podłożem. Z kolei Bailey i in. [1996] określali zależność pomiędzy ciśnieniem powietrza w oponie a generowanymi przez nią naprężeniami normalnymi i stycznymi oraz zmianami gęstości objętościowej gleby. Autorzy wykazali, że zwiększenie ciśnienia powietrza skutkuje wzrostem wszystkich analizowanych parametrów. Lancas i in. [1996] opisywali skutki stosowania w oponach zbyt wysokiego ciśnienia powietrza w oponach. Określane były zmiany oporu penetracji gleby po przejazdach badanych opon, stwierdzono, że eksploataowanie opon o zbyt wysokim ciśnieniu powietrza skutkuje wzrostem oporów penetracji gleby nie tylko bezpośrednio w koleinie, ale też w jej otoczeniu. Arvidsson i Ristic [1996] badali wpływ ciśnienia powietrza w trzech oponach na wartości i rozkład naprężeń w glebie, a także na wymiary koleiny. Wykazali, że ciśnienie powietrza ma istotny wpływ na wartości naprężeń normalnych w glebie; wzrost naprężeń powodowany zwiększeniem ciśnienia w ogumieniu w skrajnych przypadkach wynosił nawet 150%. W pracy Abu-Hamdeh [2003] przedstawiono wyniki badań gęstości objętościowej i oporów penetracji gleby w zależności od ciśnienia powietrza w oponach poruszających się po tej glebie. Wykazano, że przy większym ciśnieniu wartości oporów penetracji i gęstości objętościowej badanych gleb są wyższe niż w przypadku niższego poziomu ciśnienia powietrza w ogumieniu. Keller i Arvidsson [2004] przeprowadzali badania jednej opony przy trzech różnych poziomach ciśnienia powietrza; analizowanymi wielkościami były naprężenia normalne w glebie mierzone na trzech różnych głębokościach (0,3, 0,5 i 0,7 m). Wykazano, że przy większym poziomie ciśnienia powietrza wartości naprężeń normalnych są znacznie wyższe (w przypadku skrajnych wartości ciśnień powietrza różnica w naprężeniach przekraczała 50%). Ponadto wykazano, że różnice w wartościach naprężeń są widoczne nawet na głębokości 0,7 m. Pytka i in. [2006] określali zmiany wartości naprężeń stycznych i normalnych w glebie, na którą oddziaływały opony o różnych ciśnieniach powietrza. Autorzy wykazali, że redukcja ciśnienia powietrza o połowę skutkuje spadkiem naprężeń normalnych o 34%, a stycznych o 25% (na głębokości 15 cm). Z kolei Van i in. [2007] wyznaczali naciski jednostkowe pod oponami eksploatowanymi przy czterech różnych wartościach ciśnienia,

zarówno dla przednich, jak i tylnych kół ciągnika. Ponadto określany też był rozkład naprężeń pod koleiną. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy stwierdzili, że zwiększanie ciśnienia w ogumieniu do wartości 160 kPa powoduje wzrost wartości nacisków generowanych przez opony. Stosowanie ciśnienia wyższego niż 160 kPa nie powoduje już istotnego wzrostu nacisków. Tendencję taką zaobserwowano zarówno dla opon montowanych na przedniej, jak i tylnej osi ciągnika. Analizując rozkład nacisków autorzy zaobserwowali, że przy większych wartościach ciśnienia naciski rozkładają w większej odległości od wzdłużnej osi opony. Arvidsson i Keller [2007a] dokonali bardziej złożonej oceny oddziaływania na glebę opon o różnych ciśnieniach powietrza. Badali oni jedną oponę przy trzech ciśnieniach powietrza i trzech poziomach obciążenia pionowego kół; jako analizowane parametry przyjęli wartość i rozkład naprężeń normalnych zarówno w powierzchniowej warstwie gleby, jak i w podglebiu. W wyniku badań wykazano, że największe różnice w wartościach naprężeń w wierzchniej warstwie gleby występowały w przypadku zwiększenia ciśnienia powietrza ze 100 na 150 kPa; taka sytuacja wystąpiła przy wszystkich trzech poziomach obciążenia pionowego badanych kół. Na większych głębokościach pomiaru (50 cm) różnice naprężeń powodowane zmianą ciśnienia w ogumieniu widoczne były jedynie przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego. Ansorge i Godwin [2007] określali deformację pionową gleby wywoływaną oddziaływaniem opon o różnych ciśnieniach powietrza. Wykazali, że największy spadek deformacji pionowej wystąpił dla opony o szerokości 800 mm po zredukowaniu ciśnienia powietrza z 250 do 125 kPa. W pracy Way i in. [2009] przedstawiono wyniki badań dwóch opon (nisko- i wysokoprofilowej) przy dwóch różnych poziomach ciśnienia powietrza. Wykazano, że obie opony po zwiększeniu w nich ciśnienia powietrza powodowały wzrost zagęszczenia gleby (definiowany oporem penetracji), przy czym wyższa wartość przyrostu dotyczyła opony niskoprofilowej. Z przedstawionych powyżej prac wynika jednoznacznie, że zwiększanie ciśnienia powietrza w ogumieniu niesie za sobą ryzyko większej deformacji podłoża, objawiającej się zwiększeniem gęstości objętościowej gleby, jej oporów penetracji.

W pewnej części prac dotyczących oddziaływania układów jezdnych na podłoże wiele uwagi poświęca się intensywności użytkowania podłoża jako czynnikowi mogącemu powodować negatywne zmiany w podłożach. Intensywność użytkowania najczęściej opisywana jest ilością przejazdów koła pojazdu po danym podłożu. Botta i in. [2008] charakteryzowali zmiany właściwości gleby po 1, 3, 5 i 10 przejazdach różnych opon ciągnikowych. Analizowane były zmiany zwężłości na 3 poziomach głębokości. Autorzy

wykazali, że charakter zmian zwięzłości zmienia się przy liczbie przejazdów wyższej niż 5. Ponadto stwierdzono, że opony o większych szerokościach w mniejszym stopniu przyczyniają się do wzrostu analizowanego parametru. Ogunjirin i in. [2011] opisywali wartości zwięzłości gleby i naprężeń stycznych po 2, 4 i 6 przejazdach kół ciągnika, przy różnych poziomach ciśnienia w ogumieniu. W przypadku zwięzłości autorzy stwierdzili wzrost wartości tego parametru wraz ze zwiększaniem ilości przejazdów. Wartości naprężeń ścinających również zależne były od ilości przejazdów, jednak charakter zmian zależał także od ciśnienia w ogumieniu (wraz ze zwiększaniem ciśnienia zmniejszały się różnice w wartościach naprężeń przy poszczególnych ilościach przejazdów). Powalka i Buliński [2005] określali powierzchnię kontaktu opony z glebą o różnym stopniu zagęszczenia i porównywali ją z powierzchnią kontaktu opony na betonie. Autorzy wykazali, że w zależności od rozmiaru opony, powierzchnia kontaktu była 3 – 8 razy większa niż na betonie. Ponadto wykazano, że dla opon o większych średnicach zewnętrznych wystąpiły wyższe różnice w wartościach powierzchni kontaktu przy poszczególnych stopniach zagęszczenia. W innej pracy wykazano, że gleba o większej wilgotności jest mniej podatna na zagęszczanie powodowane wielokrotnymi przejazdami kół ciągnika [Buliński, Sergiel 2011]. Chigarev i in. [2009] określali wpływ rodzaju bieżnika oraz jego zużycia na stopień zagęszczenia gleby. Autorzy wykazali, że opona o bieżniku stosowanym na osi kierowanej powodowała większe zagęszczenie gleby niż opona napędowa o tzw. klasycznej rzeźbie bieżnika. Analizując z kolei wpływ zużycia bieżnika na zagęszczenie autorzy wykazali, że opona o zużytym bieżniku w mniejszym stopniu zagęszczała glebę niż opona o bieżniku nieużytym. Owsiak i Lejman [2006] opisywali zmiany zwięzłości dwóch gleb zagęszczanych na skutek przejazdów ciągnika. Autorzy wykazali, że wartości przyrostów zwięzłości są zależne od głębokości warstwy gleby oraz od odległości od osi koleiny. Nie stwierdzili natomiast istotnych różnic w wartościach przyrostów zwięzłości na różnych rodzajach gleb. Błaszkiwicz [2010] badał zmiany struktury gleby na skutek przejazdów kół ciągnika, przy różnych wartościach obciążenia pionowego, ciśnienia w ogumieniu i przy odmiennych poślizgach. Wykazał, że wielkość zmian struktury agregatowej jest w niewielkim stopniu zależna od założonych czynników, a zagęszczenie gleby wywołane jest samym przejazdem koła ciągnika.

Przy okazji omawiania problematyki skutków oddziaływania układów jezdnych na podłoża wspomnieć należy o specyficznym rodzaju podłoża, jakim jest darń. Zarówno na darni rekreacyjnej jak i rolniczej konieczne jest okresowe przeprowadzanie zabiegów agrotechnicznych, podłoża te narażone są na konsekwencje związane z ruchem pojazdów

rolniczych. Podłoża zadarnione charakteryzują się obecnością bogatego systemu korzeniowego roślin, co sprawia, że wytrzymałość tych podłoży na działanie układów jezdnych pojazdów może być inna niż ma to miejsce w przypadku „czystej” gleby. Ponadto eksploatacja pojazdów rolniczych na darni może wiązać się ze zniszczeniem nadziemnych części roślin darniowych, a w konsekwencji ze stratami plonu. Powyższe względy sprawiają, że przeprowadzano badania nad skutkami ruchu pojazdów rolniczych po podłożach zadarnionych. Głąb [2009] badał zmiany właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych gleby na podłożu zadarnionym użytkowanym z różną intensywnością. Intensywność użytkowania opisywana była ilością przejazdów kół ciągnika rolniczego. Autor wykazał, że zwiększenie liczby przejazdów przyczynia się do wzrostu zwężłości i gęstości objętościowej, co może powodować utrudnione warunki rozwoju roślin. Wykazano jednak przy tym, że intensywne ugniatanie gleby na podłożu zadarnionym prowadziło do polepszenia zdolności retencyjnych tego podłoża. Ponadto autor stwierdził, że poszczególne gatunki traw odmiennie reagowały na oddziaływanie kół ciągnika. W innej pracy ten sam autor określał zmiany plonowania oraz tempa wzrostu wybranej rośliny darniowej na skutek zwiększania ilości przejazdów ciągnika rolniczego po podłożu zadarnionym. Wykazał wówczas, że zwiększenie ilości przejazdów kół powodowało spadek plonowania tymotki łąkowej, ponadto stwierdził, że po bardziej intensywnym ugniataniu odrost części nadziemnych jest mniejszy [Głąb, Żabiński 2010]. Zbliżone wyniki w odniesieniu do innego gatunku trawy (życicy trwałej) przedstawili Żabiński i Jezierski [2011]. W pracy Białczyka i in. [2010c, 2010d] omówiono zmiany właściwości zadarnienia poddanego intensywnemu ugniataniu wałem ostrogowym. Wykazano, że największe przyrosty zwężłości podłoża zadarnionego wystąpiły w strefie bezpośredniego oddziaływania wału.

Istnieje pewna część prac, w których poza określeniem skutków oddziaływania układów jezdnych na podłoża przedstawiane są potencjalne rozwiązania mogące zmniejszyć negatywne oddziaływanie kół na podłoża. W pracach takich, na podstawie wyników badań proponowane są konstrukcyjne lub eksploatacyjne rozwiązania układów jezdnych. Hofman i Giles [1988] omawiają szereg czynności, które mogą redukować intensywność ugniatania gleby; jako najważniejszy wymieniają odpowiednie planowanie zabiegów agrotechnicznych i unikanie zbędnych przejazdów po polu. Jako drugi ważny czynnik wymieniony został dobór ogumienia pojazdu; szczególną uwagę poświęcono oponom radialnym, jako korzystniejszym z punktu widzenia oddziaływania na podłoże. W dalszej kolejności poruszono problematykę doboru obciążenia osi ciągników

rolniczych; przedstawione zostały optymalne rozkłady mas przedniej i tylnej osi dla konkretnych typów ciągników. Problematykę doboru obciążenia poruszono też w pracach Vermeulena [1992], Botty i in. [2002], Grecenki [2003]. Innym kierunkiem ograniczania zagęszczenia gleby jest zwiększenie powierzchni kontaktu układów jezdnych z podłożem. Takie rozwiązanie opisywane jest między innymi w pracy Knezevica i in. [2007], wymieniane są dwa kierunki zwiększenia powierzchni kontaktu – pierwszym jest stosowanie układów gąsienicowych, drugim natomiast jest stosowanie kół bliźniaczych. Stombaugh i in. [2008] przedstawili zasady doboru wartości obciążeń pionowych kół oraz ciśnień w ogumieniu, uwzględniając przy tym możliwość stosowania kół bliźniaczych i potrójnych. Keller i Arvidsson [2004] wyróżniają dwie grupy rozwiązań zmniejszających ryzyko negatywnego oddziaływania układów jezdnych na glebę: w obrębie pierwszej grupy wymienione zostaje stosowanie kół bliźniaczych i potrójnych, zaś w drugiej grupie – zmniejszenie ciśnienia powietrza w ogumieniu. Foxwell [2008] proponuje natomiast modyfikacje układu jezdnego i układu zawieszenia narzędzi w celu korzystniejszego rozkładu mas, a w konsekwencji minimalizacji ryzyka zagęszczania gleby. Oprócz stosowania metod ingerujących w konstrukcję układów jezdnych można też podjąć działania organizacyjne zmierzające do minimalizacji negatywnych skutków oddziaływania pojazdów na glebę. Działania takie określane mianem „kontrolowanego ruchu” polegają na zmniejszeniu do niezbędnego minimum liczby przejazdów roboczych po polu oraz doborze odpowiednich maszyn [Hakanson i in. 1988, Alakuku i in. 2003, Foxwell 2008].

2.2. Badania nad mechaniką układu koło – podłoże

Oprócz przedstawionych w poprzednim podrozdziale zagadnień związanych ze skutkami oddziaływania układów jezdnych na podłoże, drugi zasadniczy kierunek badawczy dotyczy teoretycznego opisu ruchu koła. Zazwyczaj ruch ten opisywany jest konkretnymi parametrami takimi jak:

- siła trakcyjna (napędowa) – siła występująca na styku koła z podłożem i pochodząca od momentu obrotowego na kole napędowym,
- opór przetaczania – parametr charakteryzujący wielkość strat związanych z odkształcaniem podłoża oraz opony,
- siła uciągu – użyteczna siła na zaczepie pojazdu rolniczego, stanowi ona różnicę siły trakcyjnej i oporu przetaczania, wartość tej siły decyduje o zdolnościach uciagowych pojazdu,

- poślizg – jest związany z deformacją poziomą podłoża, jest to zjawisko negatywne,
- sprawność trakcyjna – parametr służący do energetycznej oceny ruchu koła, uwzględnia straty związane z poślizgiem koła i oporami przetaczania.

Istotność badań mechaniki układu koło – podłoże związana jest nie tylko z intensywnością oddziaływania kół na podłoża, lecz również z ekonomiką eksploatacji pojazdów. Opis parametrów ruchu koła po różnych podłożach umożliwi dobór takich parametrów układów jezdnych, aby straty energii przy przenoszeniu siły trakcyjnej były jak najmniejsze.

Podobnie jak w przypadku badań nad skutkami oddziaływania mechanizmów jezdnych na podłoża prace nad mechaniką układu koło – podłoże można podzielić na teoretyczne i eksperymentalne.

2.2.1. Prace teoretyczne na mechaniką układu koło – podłoże

Istotą prac teoretycznych z zakresu mechaniki układu koło – podłoże jest opracowanie modeli opisujących zależność parametrów trakcyjnych od określonych czynników. Najczęściej modele takie są opracowywane na podstawie wcześniejszych badań eksperymentalnych i uwzględniają parametry podłoża bądź układu jezdnego.

Istnieje wiele prac, w których przedstawiane są modele siły trakcyjnej. Z uwagi na to, że siła trakcyjna działa prostopadle do podłoża i jest w pewnym stopniu związana z jego wytrzymałością, w modelach tych często uwzględnia się wielkość naprężeń stycznych w podłożu. Jedną z pierwszych publikacji, w której przedstawiono taki model była praca Bekkera [1960], w której siła trakcyjna przedstawiona jest jako funkcja naprężeń stycznych oraz szerokości styku opony z podłożem. W pracy Janosi-Hanamoto [1962] przedstawiono model siły trakcyjnej jako funkcję promienia koła, jego szerokości oraz maksymalnych naprężeń stycznych, jakie jest w stanie przenieść podłoże. Wong i Reece [1967] opracowali model siły napędowej dla sztywnego koła na podłożach odkształcalnych; model ten uwzględniał wartości naprężeń normalnych oraz stycznych. Wismer i Luth [1974] przedstawili formułę na siłę napędową przy uwzględnieniu promienia i obciążenia pionowego koła oraz parametrów podłoża (opisywanych współczynnikiem). Również w pracy Dwyera [1984] przedstawiona została formuła opisująca siłę trakcyjną jako funkcję zarówno parametrów konstrukcyjnych układów jezdnych jak i właściwości podłoża. Brixius [1987] przedstawił natomiast zmodyfikowaną formułę Wismera i Lutha, w której uwzględnił różnice wynikające z konstrukcji opon.

Formuły dedykowane oponom radialnym w swojej pracy przedstawili również Upadhyahya i in. [1989], Okello [1992] i Wulfsohn [1992] siłę trakcyjną opisują jako funkcję naprężeń stycznych, szerokości opony, jej promienia oraz powierzchni kontaktu z podłożem. W modelu Wanjii [1997] siła trakcyjna jest opisywana jako funkcja szerokości opony i naprężeń ścinających, przy czym wartość tych naprężeń jest opisywana osobną formułą uwzględniającą wytrzymałość podłoża na ścinanie oraz deformację poziomą. Elwaleed i in. [2006a] weryfikowali przydatność formuł Wismera-Lutha oraz Brixiusa w odniesieniu do opon o wysokich występach bieżnika. Autorzy wykazali, że formuły te w niewystarczający sposób opisują wielkość siły trakcyjnej przenoszonej przez badane opony, zaproponowali więc modyfikacje tych formuł. Komandi [2005] przedstawia formułę opisującą siłę napędową jako funkcję powierzchni kontaktu koła z podłożem, obciążenia pionowego i poślizgu koła. Rosca i in. [2004] siłę trakcyjną opisują jako funkcję naprężeń stycznych i powierzchni kontaktu opony z podłożem, dodatkowo wprowadzają jednak współczynnik zależny od stopnia deformacji opony. Z racji tego, że w ostatnim czasie wzrosła rola gąsienicowych układów jezdnych w pojazdach rolniczych, opracowano również formuły pozwalające na wyznaczenie siły trakcyjnej pojazdu wyposażonego w gąsienice [Zoz i in. 2001, Grisso i in. 2003, Grisso i in. 2006].

Zdolności uciągowe pojazdu są ograniczane oporami ruchu, skutkiem czego powstają straty energii. W przypadku pojazdów rolniczych straty te są w większości efektem oporu przetaczania kół. Opór ten jest z kolei zależny zarówno od deformacji opon, jak i podłoża. Jeden z pierwszych modeli oporu przetaczania przedstawił Bekker [1960]. Model ten uwzględniał szerokość opony, jej zagłębienie oraz parametry opisujące stan i rodzaj gleby. Perdok [1978] zmodyfikował równanie Bekkera wprowadzając współczynnik uwzględniający deformację opony. Również Wismer i Luth [1974] opracowali modele oporu przetaczania opon na glebie. W modelu tym uwzględniono obciążenie pionowe koła oraz opór penetracji gleby. Brixius [1987] przedstawił zmodyfikowane równanie Wismera-Lutha; w równaniu tym oprócz parametrów opisujących stan podłoża uwzględnił dodatkowo poślizg koła. Shmulevich i Osetinsky [2003] opór przetaczania koła opisują jedynie jako funkcję zagłębienia pionowego koła i parametrów gleby (definiowanych współczynnikami). Elwaleed i in. [2006b] przy szacowaniu wartości oporu przetaczania korzystali ze zmodyfikowanego wzoru Brixiusa, uwzględnili jednak dodatkowo wartości ciśnienia powietrza w ogumieniu. Błaszkiwicz i in. [2006] w swojej pracy przedstawili formułę, w której uwzględnili deformację opony,

jednak w badaniach weryfikujących wykazano, że straty związane z deformacją opony są pomijalnie małe w porównaniu do strat wynikających z deformacji podłoża. Schreiber i Kutzbach [2008] opór przetaczania przedstawiają jako funkcję parametrów opony oraz stanu podłoża. W proponowanej formule czynniki te są przedstawiane w postaci współczynników. W pracy Rosca i in. [2004b] opór przetaczania przedstawiono jako funkcję obciążenia pionowego koła, jego poślizgu oraz stanu podłoża (opisywanego współczynnikiem).

Sprawność trakcyjna, jako parametr opisujący wielkość strat w układzie koło - podłoże, również była przedmiotem zainteresowania wielu badaczy. Podobnie jak w przypadku dwóch poprzednio opisywanych parametrów formułę na sprawność trakcyjną opracowali Wismer i Luth [1974]. W formule tej uwzględniono siłę trakcyjną, siłę uciągu, obciążenie pionowe koła oraz jego poślizg. Podobną postać ma równanie przedstawione przez Brixiusa [1987] w odniesieniu do opon radialnych. Wolf i in. [1996] proponują równanie, w którym uwzględnia się współczynnik oporu przetaczania koła, jego poślizg oraz kąt tarcia wewnętrznego w glebie. Carman i in. [2003] sprawność trakcyjną opisują jako funkcję poślizgu koła, jego oporu przetaczania, powierzchni kontaktu z podłożem oraz wymiarów koleiny. Przeprowadzone przez autorów badania weryfikujące wykazały, że przyjęta formuła dobrze opisuje sprawność trakcyjną. W innej pracy [Carman, Tuner 2012] siłę trakcyjną i sprawność trakcyjną również przedstawiono jako funkcję poślizgu koła.

2.2.2. Prace badawcze nad mechaniką układu koło – podłoże

W literaturze znaleźć można dużą liczbę prac traktujących o wpływie poszczególnych czynników na właściwości trakcyjne pojazdów. Analizowanymi parametrami najczęściej były siła trakcyjna, siła uciągu, opór przetaczania czy sprawność trakcyjna. Parametry mogące wpływać na właściwości trakcyjne można podzielić na konstrukcyjne oraz eksploatacyjne. Do pierwszej grupy zaliczyć można rodzaj układu jezdnego oraz jego cechy konstrukcyjne, natomiast do drugiej grupy – ciśnienie powietrza w ogumieniu, prędkość jazdy, krotność przejazdów, parametry podłoża.

Obciążenie pionowe koła pojazdu rolniczego jest takim parametrem, na który użytkownik pojazdu może wpływać w znacznym stopniu (np. poprzez dobór obciążników, jak czy sposób agregatowania narzędzi). Poszczególne typy i rozmiary opon na odmiennych rodzajach podłoża mogą w różny sposób reagować na zmianę obciążenia pionowego toteż zasadne jest przeprowadzanie badań nad wpływem obciążenia

na właściwości trakcyjne. Taylor i Burt [1974] badali wpływ obciążenia pionowego na sprawność trakcyjną. Badania wykonywali na dwóch rodzajach gleb (piaszczysta i gliniasta), stosowali dwa poziomy obciążenia pionowego. Wykazali, że jedynie na glebie gliniastej wystąpiły istotne różnice w maksymalnych wartościach sprawności trakcyjnej przy różnych poziomach obciążenia pionowego. W przypadku gleby piaszczystej różnice dotyczyły jedynie tempa przyrostu sprawności przy niskich wartościach poślizgu. Burt i in. [1983] oraz Lyne i in. [1983] przeprowadzali badania, w których określali zależność między obciążeniem pionowym koła a maksymalnymi wartościami siły uciągu i sprawności trakcyjnej, przy różnych poziomach ciśnienia powietrza w ogumieniu. Stosowane były przy tym cztery poziomy obciążenia pionowego. Wykazano, że w większości przypadków wzrost obciążenia skutkował wzrostem siły uciągu oraz sprawności trakcyjnej. Ci sami autorzy w innej pracy [Lyne i Burt 1988] wykazywali, że obciążenie pionowe koła ma istotny wpływ na wartość siły trakcyjnej. Zależność taką zaobserwowali na dwóch rodzajach gleb, zarówno uprawionych, jak i nieuprawionych. Wulfsohn i in. [1988] po przebadaniu czterech opon o różnych wymiarach, przy trzech poziomach obciążenia pionowego stwierdzili, że czynnik ten ma istotny wpływ na wartości siły uciągu oraz sprawności trakcyjnej. Xu i in. [1991] określali zmiany siły uciągu i sprawności trakcyjnej na skutek zwiększania obciążenia pionowego koła; dodatkowym czynnikiem było ciśnienie powietrza w ogumieniu. Autorzy wykazali, że niezależnie od wartości ciśnienia powietrza zwiększanie obciążenia pionowego skutkuje wzrostem wartości siły uciągu. Podobna tendencja wystąpiła w przypadku sprawności trakcyjnej. Jun i in. [2004] badali wpływ obciążenia pionowego na wartości siły i sprawności trakcyjnej; w badaniach stosowali dwa poziomy obciążenia (23,9 i 40 kN). Wykazali, że zastosowanie wyższego poziomu obciążenia skutkuje prawie dwukrotnym wzrostem siły trakcyjnej i nieznacznym wzrostem sprawności trakcyjnej. Narang i in. [2006] badali opony ciągnika niższej klasy uciągu w aspekcie poprawy zdolności trakcyjnych przy różnych prędkościach jazdy. Wykazali, że zwiększenie obciążenia pionowego koła skutkuje wzrostem siły uciągu przy obu przyjętych prędkościach. W badaniach Gholkara i in. [2009] stosowano dwukrotne zwiększenie obciążenia pionowego koła (kolejno o 1,1 i 2,2 kN) i ustalano jego wpływ na wartość mocy uciągu, definiowanej jako iloczyn siły uciągu i prędkości jazdy (prędkość przyjęta była na niezmiennym poziomie, zatem można uznać, że zmiany mocy uciągu były proporcjonalne do zmian siły uciągu). Dodatkowym czynnikiem było ciśnienie powietrza w ogumieniu. Autorzy wykazali, że zwiększanie

obciążenia pionowego skutkowało wzrostem wartości mocy uciagu, przy czym największe wartości przyrostów zaobserwowano przy najniższym poziomie ciśnienia w ogumieniu.

Drugim parametrem, który może mieć wpływ na właściwości trakcyjne koła jest ciśnienie powietrza w ogumieniu. Podobnie jak w przypadku obciążenia pionowego ten parametr może być w pewnych granicach zmieniany przez użytkownika pojazdu, zatem uzasadnione jest wykazanie wpływu zmian ciśnienia na właściwości trakcyjne koła. Burt i in. [1983] badali zależność pomiędzy ciśnieniem powietrza w oponach a wartościami siły uciagu i sprawności trakcyjnej. W badaniach stosowali cztery poziomy ciśnienia (62, 90, 124 i 159 kPa) zarówno dla opon radialnych, jak i diagonalnych. Tak przeprowadzone badania wykazały, że dla opon radialnych najbardziej korzystne jest stosowanie najniższego poziomu ciśnienia (wówczas wartości siły uciagu i sprawności trakcyjnej były największe), natomiast dla opon diagonalnych najkorzystniejsze właściwości trakcyjne wystąpiły przy ciśnieniu 90 kPa. Wulfsohn i in. [1988] określali wpływ ciśnienia powietrza w czterech oponach różniących się konstrukcją i wymiarami. Wykazali, że zarówno w przypadku opon radialnych, jak i diagonalnych zwiększanie ciśnienia w ogumieniu skutkuje spadkiem wartości sprawności trakcyjnej. Lyne i Burt [1988] wyznaczyli natomiast takie wartości ciśnień, przy których badana opona osiągała najwyższe wartości sprawności na wybranych podłożach. Przedstawiony przez autorów zakres ciśnień wynosił od 110 do 170 kPa. Xu i in. [1991] wykazali, że ciśnienie powietrza w ogumieniu wpływa istotnie jedynie na wartości siły uciagu, natomiast nie stwierdzono wpływu na sprawność trakcyjną. Bashford i in. [1993] oceniali wpływ ciśnienia powietrza na właściwości trakcyjne trzech opon; stosowali oni trzy poziomy ciśnienia (55, 83 i 124 kPa). Wykazali, że wyższe wartości siły uciagu osiągane były przy najniższym poziomie ciśnienia. Analizując wartości sprawności trakcyjnej zaobserwowano, że najniższa wartość tego parametru wystąpiła przy najwyższym poziomie ciśnienia powietrza w ogumieniu. Zoz i Turner [1994] badali wpływ ciśnienia powietrza w oponie na wartości siły uciagu i sprawności trakcyjnej różnych opon na odmiennych podłożach. Wykazali, że w większości przypadków wzrost ciśnienia powietrza powodował pogorszenie właściwości trakcyjnych. Raper i in. [1995a] w swoich badaniach stosowali dwa poziomy ciśnienia powietrza (41 i 124 kPa) i określali wpływ tego parametru na siłę i sprawność trakcyjną. Wykazali, że przy niższym poziomie ciśnienia wartości analizowanych parametrów trakcyjnych są korzystniejsze. Z kolei Jun i in. [2004] wykazali, że zwiększenie ciśnienia powietrza w oponie ze 100 do 240 kPa skutkuje spadkiem siły trakcyjnej o 19% a sprawności trakcyjnej o 8,5%. Autorzy zaobserwowali ponadto,

że po zwiększeniu obciążenia pionowego różnice wynikające ze zmiany ciśnienia powietrza ulegają zmniejszeniu. Podobne wyniki osiągnęli Way i Kishimoto [2004], którzy stosowali trzy poziomy obciążenia dla trzech różnych opon. Elwaleed i in. [2006b] badali natomiast jedną oponę przy trzech ciśnieniach powietrza (166, 193 i 221 kPa) i stwierdzili, że przy środkowym poziomie ciśnienia powietrza występowały najniższe wartości oporów przetaczania badanej opony. W pracy Gholkara i in. [2009] przedstawiono wyniki badań nad wpływem ciśnienia powietrza w oponie na wartości mocy uciągu. W badaniach stosowano trzy poziomy ciśnienia powietrza (70, 100 i 130 kPa) oraz trzy poziomy obciążenia pionowego koła. Wykazano, że ciśnienie powietrza wpływa istotnie na wartość mocy uciągu – najwyższą wartość tego parametru stwierdzono przy najwyższej wartości ciśnienia. Smerda i Cupera [2010] przeprowadzili badania, w których oceniali zależność między ciśnieniem powietrza a siłą trakcyjną i mocą uciągu. Autorzy wykazali, że wyższe ciśnienie powietrza w ogumieniu oznacza niższe wartości siły trakcyjnej, nie stwierdzono natomiast istotnej zależności w odniesieniu do mocy uciągu.

Współczesne opony pojazdów rolniczych oferowane są w wielu odmianach konstrukcyjnych. Różnić mogą się zarówno strukturą wewnętrzną (nośną), jak i zewnętrzną (różne wymiary oraz rzeźba bieżnika). Względy te sprawiają, że odmienne mogą być ich właściwości trakcyjne. Z tego powodu przeprowadzano eksperymenty badawcze mające na celu wykazanie wpływu różnic konstrukcyjnych na parametry trakcyjne. Sukcesywne wprowadzanie do pojazdów rolniczych opon radialnych w miejsce diagonalnych sprawia, że w ramach badań naukowych porównywano te dwie odmiany konstrukcyjne w aspekcie ich właściwości trakcyjnych. Gee-Clough i in. [1977] porównywali oponę radialną i diagonalną pod kątem wartości współczynnika przyczepności, współczynnika oporów przetaczania i sprawności trakcyjnej. Wykazali, że konstrukcja opony istotnie wpływa jedynie na wartość współczynnika przyczepności – dla opon radialnych stwierdzono wyższe wartości tego parametru. Wartości pozostałych dwóch parametrów dla obu rodzajów opon nie różniły się istotnie. Coates [1984] badał dwie opony radialne oraz jedną diagonalną i wykazał, że opona diagonalna tę samą wartość siły trakcyjnej osiąga przy poślizgu wyższym niż opona radialna. Z kolei Wulfsohn i in. [1988] wykazali, że konstrukcja opony ma wpływ na wartości sprawności trakcyjnej – wspomniani autorzy zaobserwowali, że wyższe wartości sprawności osiągały opony radialne. Turner [1999] porównywał właściwości trakcyjne opony diagonalnej niskociśnieniowej z oponami radialnymi o zbliżonych wymiarach zewnętrznych. Autor stwierdził, że opona diagonalna cechowała się gorszymi właściwościami trakcyjnymi niż

opony radialne. Białczyk i Materek [2001] badali właściwości trakcyjne ciągnika wyposażanego w różne typy opon i stwierdzili, że stosowanie opon radialnych skutkowało większymi wartościami siły uciągu oraz sprawności trakcyjnej. Uzyskane wyniki autorzy tłumaczyli różną sztywnością osnowy poszczególnych typów opon, co przedkładało się na odmienne powierzchnie kontaktu opony z glebą.

Kolejną cechą konstrukcyjną uwzględnianą w badaniach opon są ich wymiary zewnętrzne. Zarówno średnica, jak i szerokość mogą mieć wpływ na właściwości trakcyjne opony, toteż znane są prace, w których porównywano opony o różnych wymiarach w aspekcie ich zdolności trakcyjnych. Wulfsohn i in. [1988] porównywali opony o różnych szerokościach (380 i 470 mm) i średnicach zewnętrznych (1710 mm i 1320 mm) zarówno radialne, jak i diagonalne. Wykazali, że opony o większych wymiarach cechowały się wyższą sprawnością trakcyjną; w przypadku opon radialnych względna różnica sprawności dochodziła do 41%, natomiast dla opon diagonalnych – 58%. Grisso i in. [1992] porównywali natomiast opony o takich samych szerokościach, lecz różnych średnicach zewnętrznych i stwierdzili, że wartości sprawności trakcyjnej osiągane przez badane opony nie różniły się istotnie. Bashford i in. [1993] badali trzy radialne opony o różnych szerokościach i średnicach, przy dwóch poziomach ciśnienia powietrza. Wykazali, że poszczególne opony w odmienny sposób reagowały na zmianę ciśnienia powietrza. Przykładowo, opona o największej średnicy i szerokości cechowała się najmniejszym spadkiem sprawności trakcyjnej po zwiększeniu ciśnienia powietrza. Kryteria dotyczące doboru wymiarów opon do konkretnych ciągników, a także zasady ustalania ciśnienia i obciążenia opon przedstawiono w pracach Sharmy i Pandey’a [2001], Muzikravica i in. [2003] i Brodbecka [2004].

Na ogół opony stosowane w pojazdach rolniczych posiadają charakterystyczną konstrukcję bieżnika o rzadko rozmieszczonych wysokich występach. Zasadniczym celem stosowania takiego rozwiązania jest możliwość zagłębiania się występow w miękkie podłoże i w efekcie przenoszenie siły napędowej. Występy bieżnika zazwyczaj ułożone są pod kątem do osi opony – takie rozwiązanie zapobiega gromadzeniu się cząstek gleby w przestrzeniach między występami. Przypuszczać należy, że zarówno rodzaj, wysokość występow bieżnika, jak i kąt ich ustawienia mogą mieć wpływ na właściwości trakcyjne koła. Monroe i in. [1989] badali cztery opony wyposażone w różne typy bieżników w aspekcie ich właściwości trakcyjnych. Najwyższe wartości sprawności trakcyjnej zostały osiągnięte przez oponę o drobnych gęsto rozmieszczonych występach bieżnika. Natomiast najwyższe wartości współczynnika przyczepności stwierdzono dla opony o tzw. klasycznej

rzeźbie bieżnika. Taylor [1973] badał wpływ kąta ustawienia występow bieżnika opon na ich właściwości trakcyjne opisywane siłą uciągu oraz sprawnością trakcyjną. Autor wykazał, że nie ma istotnego wpływu kąta ustawienia występow na analizowane parametry trakcyjne. Z kolei Abd El-Gawwad [1999] stwierdził, że wraz ze zwiększaniem kąta ustawienia występow maleje siła uciągu, a wzrastają siły boczne, przy czym charakter tych zmian zależny jest również od wysokości występow bieżnika. Z racji tego, że konsekwencją użytkowania opon jest zmniejszanie się wysokości występow bieżnika zasadne jest zbadanie zależności pomiędzy wysokością występow a właściwościami trakcyjnymi. Copec i Filipovic [2007] porównywali właściwości trakcyjne opon o bieżniku nowym i zużytym w 50%. Stwierdzili, że wartości siły uciągu przy bieżniku zużytym są mniejsze nawet o ponad 50% w stosunku do sił uzyskiwanych przez opony o niez użytym bieżniku. W pracy Białczyka i in. [2010b] opisano wyniki badań opon o czterech stopniach zużycia bieżnika (0, 25, 50 i 75%). Stwierdzono, że graniczny poziom zużycia bieżnika wynosi 50% - po jego przekroczeniu obserwowano znaczne spadki wartości sił trakcyjnych.

Jednym ze sposobów poprawy właściwości trakcyjnych opon jest zwiększanie powierzchni ich współpracy z podłożem. Efekt taki może być osiągnięty poprzez stosowanie specjalnych opon niskociśnieniowych, bądź też poprzez zamontowanie opon podwójnych a nawet potrójnych. Przypuszczać należy, że oprócz niewątpliwej korzyści jaką jest zmniejszenie negatywnego oddziaływania na glebę poprawie ulegną również parametry trakcyjne pojazdu. Z tego też powodu uzasadnione wydaje się zbadanie opisanych powyżej modyfikacji w aspekcie właściwości trakcyjnych. Dwyer i Heigho [1984] w swoich badaniach oceniali dwie metody poprawy właściwości trakcyjnych: stosowanie opon szerszych niż standardowe oraz bliźniakowanie kół. Wykazali, że lepszą metodą jest stosowanie kół bliźniaczych, które pozwala zarówno na poprawę sprawności trakcyjnej, jak i mniej intensywne oddziaływanie na glebę. Ponadto wykazano, że przy odsunięciu kół bliźniaczych na pewną odległość sprawność trakcyjna jest wyższa niż w przypadku kół umieszczonych bezpośrednio obok siebie. W pracy Bashford'a i in. [1987] badano właściwości trakcyjne opony 18.4-38 w wersji pojedynczej i zbliźniakowanej. Wykazano, że na świeżo uprawionym ściernisku układ bliźniaczy pozwala na osiągnięcie wyższych sprawności trakcyjnych jedynie przy poślizgu w zakresie 0 – 15%, jednak różnice w wartościach sprawności pomiędzy układem bliźniaczym i pojedynczym są niewielkie (nie przekraczają 5%). Turner [1993, 1995] badał opony 20.8R42 w układzie pojedynczym, bliźniaczym oraz potrójnym. Wykazał, że najwyższe

wartości współczynnika przyczepności oraz mocy uciagu występowały w przypadku układu bliźniaczego. Dla układu bliźniaczego wartości sprawności trakcyjnej również były najwyższe, przy czym różnice nie przekraczały 10%. Sumer i Sabaci [2004] określali wpływ bliźniakowania opon diagonalnych i radialnych na ich właściwości trakcyjne. Wykazali, że stosowanie układu bliźniaczego umożliwia osiągnięcie wyższej sprawności trakcyjnej, przy czym lepsze efekty występowały w przypadku opon radialnych. Z kolei Wulfsohn i Way [2009] wykazali, że bliźniakowanie kół skutkuje wzrostem sprawności trakcyjnej jedynie na podłożach utwardzonych, natomiast w przypadku świeżo uprawionej gleby nie stwierdzili różnic w wartościach sprawności kół pojedynczych i bliźniaczych.

Efektem badań nad układem koło – podłoże są również prace, w których zawarte są zalecenia dotyczące prawidłowej eksploatacji pojazdu rolniczego. W przypadku, gdy zalecenia takie dotyczą układu jezdnego omawiany jest dobór jego parametrów - np. stosowanie właściwego ciśnienia w ogumieniu, dobór opon o określonej konstrukcji i wymiarach [Sharma i Pandey 2001, Muzikravic i in. 2003 i Brodbeck 2004]. Należy jednak zaznaczyć, że ogólna sprawność pojazdu rolniczego nie jest związana jedynie z układem jezdny, ale również z parametrami pracy silnika oraz układu napędowego. Z tego powodu powstały publikacje, w których przedstawiane są wskazówki dotyczące doboru parametrów pracy silnika i układu napędowego podczas eksploatacji pojazdu w różnych warunkach terenowych. W pracach Kichlera i in. [2011], Ortiz-Canavate i in. [2008] oraz Grisso i in. [2011] wykazano, że dobór właściwego przełożenia w skrzyni przekładniowej ciągnika, a także kontrola prędkości obrotowej silnika skutkują polepszeniem właściwości uciagowych ciągnika (spadek poślizgu kół), konsekwencją czego jest mniejsze zużycie paliwa przy wykonywaniu zabiegów agrotechnicznych. W pracy Peca i in. [2009] poruszany jest z kolei problem doboru prędkości wykonywania poszczególnych zabiegów agrotechnicznych i prędkości obrotowej silnika, co również wpływa na wybór właściwego biegu w układzie napędowym. Problematyka doboru przełożeń staje się coraz bardziej aktualna, ponieważ współczesne ciągniki posiadają skrzynki przekładniowe o znacznych ilościach przełożeń.

Prace naukowe dotyczące układu koło – podłoże powstawały również w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Wieloletnie badania przeprowadzane w tym ośrodku dotyczyły zarówno skutków oddziaływania układów jezdnych na podłoża, jak i właściwości trakcyjnych pojazdów na różnych podłożach.

W początkowym okresie badania układu koło – podłoże w Instytucie Inżynierii Rolniczej dotyczyły właściwości trakcyjnych pojazdów rolniczych eksploatowanych w warunkach górskich, najczęściej na użytkach zielonych. Znaczną uwagę poświęcano problematyce przyczepności kół na podłożach o różnych kątach nachylenia; zasadność podjęcia takich badań podyktowana była ekonomiką oraz bezpieczeństwem eksploatacji pojazdów rolniczych w terenach górskich [Białczyk 1978, Białczyk, Bogdanowicz 1983]. W późniejszych latach w Instytucie Inżynierii Rolniczej prowadzono badania dotyczące właściwości trakcyjnych pojazdów rolniczych na terenach zadarnionych; uwzględniano czynniki związane z konstrukcją układu jezdnego, przedstawiano metody poprawy właściwości uciągowych [Białczyk i in. 1987, Białczyk 1988, Materek 1990]. Kolejną grupą badanych podłoży była gleba o odmiennych właściwościach; powstały prace opisujące zarówno skutek ruchu koła po glebie, jak i dotyczące właściwości trakcyjnych kół na glebach o różnych właściwościach [Białczyk i in. 2001, Czarnecki 2000].

W ostatnich latach w Instytucie Inżynierii Rolniczej powstała duża liczba prac poświęconych właściwościom trakcyjnym na drogach leśnych. Analizowane były różnice we właściwościach trakcyjnych wynikające zarówno z parametrów układów jezdnych (np. zmienne obciążenia pionowe), jak i z rodzaju oraz stanu nawierzchni dróg leśnych; badania przeprowadzano na drogach gruntowych, żwirowych, pokrytych tłuczniem, pokrytych śniegiem [Białczyk i in. 2006, Cudzik 2006, Czarnecki i in. 2005]. W dalszym ciągu jednym z intensywnie badanych podłoży były zadarnienia; zarówno rolnicze, jak i rekreacyjne [Białczyk i in. 2008a, 2009, 2010c, 2010d]. Najnowsze badania przeprowadzane w ośrodku wrocławskim dotyczą współpracy kół pojazdów rolniczych w glebę uprawianą różnymi technologiami uprawowymi. Charakteryzowane są zarówno właściwości trakcyjne, jak i parametry gleby przy różnych systemach uprawy [Białczyk i in. 2008b, Cudzik i in. 2011]. Różnorodność badań przeprowadzanych w Instytucie Inżynierii Rolniczej dotyczyła także technik ich przeprowadzania. Wykonywane były zarówno badania polowe, jak i laboratoryjne. Na podstawie wieloletnich doświadczeń w zakresie badań trakcyjnych w Instytucie Inżynierii Rolniczej zaprojektowano i wykonano specjalistyczne w pełni mobilne stanowisko do badań trakcyjnych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury stwierdzić można, że badania układu „koło – podłoże” czy też w szerszym ujęciu „pojazd – teren” dzielą się na dwa zasadnicze nurty. Pierwszy z nich dotyczy oceny skutków oddziaływania pojazdów na podłoża. Nadrzędnym celem podejmowania takich badań jest ograniczanie

negatywnych zjawisk związanych z ruchem pojazdów po podłożach. Drugi z nurtów charakteryzuje właściwości trakcyjne układów jezdnych; badania w obrębie tego zakresu finalnie prowadzą do polepszenia właściwości eksploatacyjnych pojazdów, przede wszystkim ekonomiki ich użytkowania. Wyodrębnić można zatem dwa aspekty przeprowadzania badań w dziedzinie terramechaniki; aspekt ekologiczny i aspekt ekonomiczny.

Analiza literatury dotyczącej właściwości trakcyjnych kołowych układów jezdnych pozwala zaobserwować, że większość z tych badań dotyczy kół o znacznych wymiarach zewnętrznych, stosowanych w ciągnikach o dużych mocach. Takie ciągniki z reguły przeznaczone są do ciężkich prac polowych, w odróżnieniu od mniejszych ciągników określanych mianem uniwersalnych. Ideą ciągnika uniwersalnego jest zastosowanie go do zróżnicowanych prac na odmiennych podłożach. Z powyższego względu zasadne staje się rozpoznanie problematyki właściwości trakcyjnych na różnych podłożach w odniesieniu do opon o mniejszych wymiarach zewnętrznych. Taka problematyka zostanie przedstawiona w niniejszej pracy.

3. Cel pracy

Idea uniwersalności ciągnika rolniczego przejawia się tym, że może on być wykorzystywany do wielu zróżnicowanych prac na odmiennych podłożach. Nierzadko podłoża te pod wieloma względami znacznie się różnią, co może mieć wpływ na właściwości trakcyjne poruszających się po nich pojazdów. Zachodzi przypuszczenie, że przy zmianie rodzaju podłoża może dojść do zbyt dużych zmian właściwości trakcyjnych, a w konsekwencji do powstawania strat energii w układzie koło – podłoże.

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy wykazała, że istnieje niewielka liczba publikacji, w których określone są zmiany właściwości trakcyjnych pojazdów rolniczych przeznaczonych do pracy na odmiennych podłożach. Niewiele jest też prac, w których dokonywany jest bilans mocy kół eksploatowanych na różnych podłożach. Z powyższych względów podjęto badania, których celem było:

1. Ocena właściwości trakcyjnych opon uniwersalnego ciągnika rolniczego w pełnym zakresie zmienności warunków eksploatacji.
2. Wyznaczenie składowych bilansu mocy kół wyposażonych w badane opony oraz ocena wartości i udziałów mocy użytecznej i mocy związanych ze stratami.
3. Wykazanie czy i w jaki sposób zmiana statycznego obciążenia pionowego kół wyposażonych w badane opony przyczynia się do poprawy ich właściwości trakcyjnych dla całego zakresu zmienności warunków eksploatacji.
4. Porównanie opon o takiej samej konstrukcji, lecz różnych wymiarach zewnętrznych w aspekcie ich właściwości trakcyjnych w różnych warunkach eksploatacji.
5. Ocena zależności pomiędzy wartością poślizgu kół wyposażonych w badane opony a zmianami ich właściwości trakcyjnych, przy uwzględnieniu różnych obciążeń pionowych kół.
6. Wykazanie czy i w jaki sposób stosowanie łańcucha antypoślizgowego przyczynia się do zmian właściwości trakcyjnych opony na podłożach o odmiennych właściwościach.
7. Przeprowadzenie teoretycznej analizy transmisji mocy z silnika na koła pojazdu rolniczego w pełnym zakresie zmienności warunków eksploatacji, przy zachowaniu wymogu minimalizacji strat energii w układzie koło – podłoże i przy indywidualnym doborze przełożeń w układzie przeniesienia napędu.

Ocena właściwości trakcyjnych zostanie przeprowadzona na podstawie wartości siły trakcyjnej, oporu przetaczania, a także sprawności trakcyjnej. Ten ostatni parametr ma szczególne znaczenie, gdyż określa jaką część mocy dostarczanej do koła jest wykorzystywana w postaci użytecznej siły uciągu, a jaka jest bezpowrotnie tracona. Sprawność jest zatem parametrem, który określa ekonomikę eksploatacji pojazdu rolniczego. W bilansie mocy analizie zostaną poddane wszystkie jego składowe, a więc moc uciągu, moc tracona na opór przetaczania oraz moc tracona na poślizg. Bilans mocy, podobnie jak sprawność trakcyjna charakteryzuje ekonomikę eksploatacji pojazdu, ponadto umożliwia określenie jaki rodzaj strat przeważa w danych warunkach eksploatacji.

4. Przedmiot i warunki badań

Przedmiotem badań były właściwości trakcyjne opon przeznaczonych do ciągników rolniczych niższych klas uciągu. Wymogi uniwersalności takich pojazdów sprawiły, że właściwości trakcyjne analizowane były na różnych podłożach o odmiennych właściwościach.

Badania rozpoznawcze

Pierwszy etap badań (rozpoznawcze) zrealizowano na glebach uprawianych różnymi systemami uprawowymi, zakładając, że odmienność właściwości podłoża wynikająca z różnych systemów uprawy może mieć wpływ na właściwości trakcyjne koła pojazdu eksploatowanego na takich podłożach. Wybór tych podłoży do badań podyktowany był faktem, że w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania uproszczonymi systemami uprawy gleby, w których częściowo lub całkowicie eliminuje się zabiegi uprawowe. Celem wprowadzania takich technologii jest zwiększenie oszczędności na skutek zmniejszenia liczby zabiegów agrotechnicznych. Przypuszczać jednak można, że odmienna ilość zabiegów oznaczać będzie zmianę właściwości gleby, natomiast eksploatacja pojazdu rolniczego na podłożach o różnych właściwościach skutkować może odmiennymi właściwościami trakcyjnymi. Wybrana do badań gleba uprawiana była trzema systemami uprawowymi: tradycyjnym, uproszczonym oraz zerowym. Stanem podłoża wspólnym dla odmiennych technologii uprawy gleby jest ściernisko, w związku z czym w właśnie w takich warunkach możliwe było przeprowadzenie badań i porównywanie gleb o różnych systemach uprawowych.

Badania właściwe

W drugim etapie badań (właściwe) założono większą różnorodność warunków – do badań wybrano cztery zasadnicze grupy podłoży: gleby przy różnych systemach uprawowych, darń łąkową, gruntową drogę leśną oraz glebę „czystą”.

Podłoża pierwszej grupy były takie same jak w pierwszym etapie badań czyli gleby uprawne w trzech systemach uprawowych (tradycyjnym, uproszczonym i zerowym). Różnicę stanowił jedynie gatunek uprawianej na nich rośliny. Analogicznie jak w przypadku pierwszego etapu, badania przeprowadzono na ścierniskach, gdyż jedynie ten stan był wspólny dla wszystkich trzech systemów uprawowych.

Drugim badanym rodzajem podłoża była naturalna gruntowa droga leśna. Wymogi uniwersalności pojazdów rolniczych sprawiają, że oprócz typowych zabiegów polowych

wykonują one również inne rodzaje prac na innych rodzajach podłoży. Jednym z szerszych zastosowań ciągników są prace transportowe ze szczególnym uwzględnieniem takich rodzajów dróg, na których stosowanie samochodowych zestawów transportowych byłoby utrudnione ze względu na konstrukcje układów jezdnych. Jednym z przykładów takiego wykorzystania ciągników jest transport surowca drzewnego po drogach leśnych. Przypuszczać można, że właściwości trakcyjne na takich drogach będą odmienne niż w przypadku gleb uprawnych. Zasadne wydaje się zatem przeprowadzenie badań trakcyjnych pojazdów rolniczych na tych podłożach.

Trzeci rodzaj podłoża w badaniach drugiego etapu stanowiła darni łąkowa. W znacznej części gospodarstw rolnych ważną rolę odgrywają użytki zielone w postaci łąk i pastwisk. Wierzchnia warstwa użytków zielonych tworzona jest przez darni, której zasadniczym elementem jest bogaty system korzeniowy roślin. Podłoża zadarnione wymagają określonych zabiegów pratotechnicznych (przede wszystkim okresowe koszenie), przy których źródłem energii są ciągniki rolnicze. Zaznaczyć należy, że zadarnienia stanowią bardzo specyficzny rodzaj podłoży w aspekcie zdolności trakcyjnych pojazdów rolniczych. Ta odmienność spowodowana jest charakterystyczną strukturą zadarnienia. W przypowierzchniowej warstwie darni oprócz szkieletu glebowego obecny jest bowiem system korzeniowy roślin darniowych (przede wszystkim traw), co niewątpliwie ma wpływ na właściwości wytrzymałościowe takich podłoży. Przedstawione względy sprawiły, że właściwości trakcyjne pojazdów eksploatowanych na zadarnieniach mogą być odmienne niż ma to miejsce w przypadku „czystych” podłoży, a zbadanie tych właściwości na zadarnieniu wydaje się uzasadnione.

Ostatnią grupą podłoży w badaniach drugiego etapu była pozbawiona roślinności gleba uprawna o różnym stopniu zagęszczenia. Konsekwencją ruchu pojazdów rolniczych po glebie jest jej zagęszczenie objawiające się zmniejszeniem objętości porów glebowych a konsekwencji ciaśniejszym ułożeniem cząstek gleby w jednostce objętości. W przypadku gleb uprawnych jest to zjawisko niekorzystne, gdyż zagęszczona gleba stawia większy opór systemom korzeniowym roślin, skutkiem czego może być utrudniony ich wzrost i rozwój. Jednak wraz ze wzrostem zagęszczenia mogą zmieniać się warunki współpracy kół pojazdów rolniczych z podłożem. W związku z powyższym zasadne było przeprowadzenie analizy właściwości trakcyjnych opon na podłożach o różnym stopniu zagęszczenia. Do badań wybrano jeden rodzaj gleby, zatem poziom zagęszczenia mógł być w tym wypadku traktowany jako swego rodzaju czynnik.

Będąc przedmiotem badań właściwości trakcyjne były stanowione przez siłę trakcyjną, opór przetaczania, sprawność trakcyjną oraz wartości mocy na kołach wyposażonych w badane opony. Szczególne znaczenie ma przy tym pojęcie sprawności trakcyjnej, która określa jaką część mocy została wykorzystana w postaci siły uciągu, a jaka została utracona. Jednakże wartość sprawności nie opisuje szczegółowo charakteru strat mocy w układzie koło – podłoże. Taka ocena może zostać dokonana w wyniku przeprowadzenia bilansu mocy, opisującego wartości mocy dostarczanej do koła i mocy składowych: mocy uciągu, mocy traconej na opór przetaczania oraz mocy traconej na poślizg. Proporcje pomiędzy wartościami mocy traconej na opór przetaczania i mocy traconej na poślizg mogą posłużyć do opisania jaki rodzaj strat dominuje na danym rodzaju podłoża. Zarówno znajomość sprawności trakcyjnej, jak i poszczególnych mocy na kołach napędowych pojazdu rolniczego ma duże znaczenie praktyczne, gdyż określa ekonomikę eksploatacji pojazdu. Ma to niebagatelne znaczenie przy doborze takich parametrów eksploatacyjnych, przy których straty energii będą najmniejsze. Tylko w takiej sytuacji wydajność przeprowadzania poszczególnych zabiegów agrotechnicznych będzie wysoka, a nakłady finansowe (związane ze zużyciem paliwa) niskie.

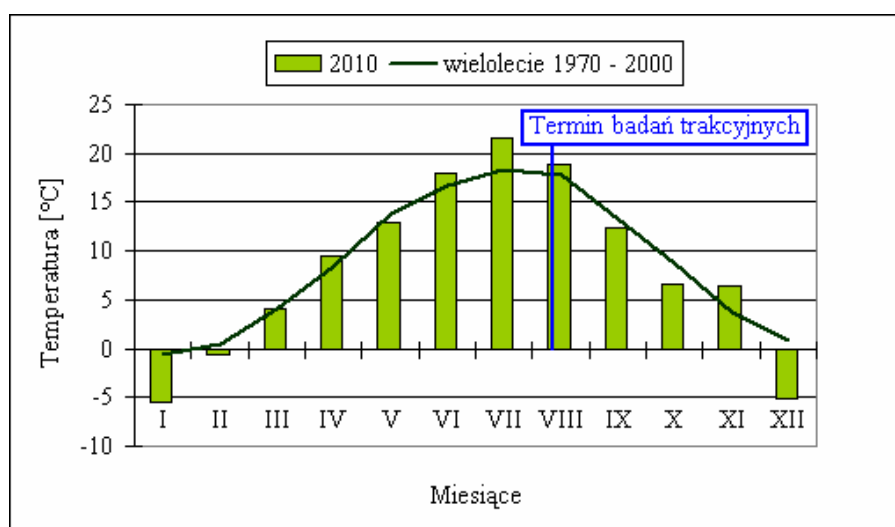
Badania rozpoznawcze przeprowadzono w sierpniu 2010 roku. Badania właściwe realizowano w następujących terminach:

- ścierniska w odmiennych systemach uprawowych (analogiczne jak w I etapie badań) – sierpień 2011,
- darń łąkowa – październik 2011,
- gruntowa droga leśna – listopad 2011,
- gleby o różnym stopniu zagęszczenia – kwiecień 2012.

4.1. Warunki atmosferyczne

Z uwagi na to, że przebieg pogody mógł mieć wpływ na właściwości badanych podłoży, a konsekwencji również na właściwości trakcyjne, konieczne było określenie warunków meteorologicznych w okresach poprzedzających badania trakcyjne. Informacje o przebiegu pogody pozyskano ze Stacji Meteorologicznej Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery Uniwersytetu Wrocławskiego; stacja ta była oddalona od miejsc badań o odległość mniejszą niż 20 km. Pod uwagę brano średnie miesięczne wartości temperatur oraz miesięczne sumy opadów atmosferycznych.

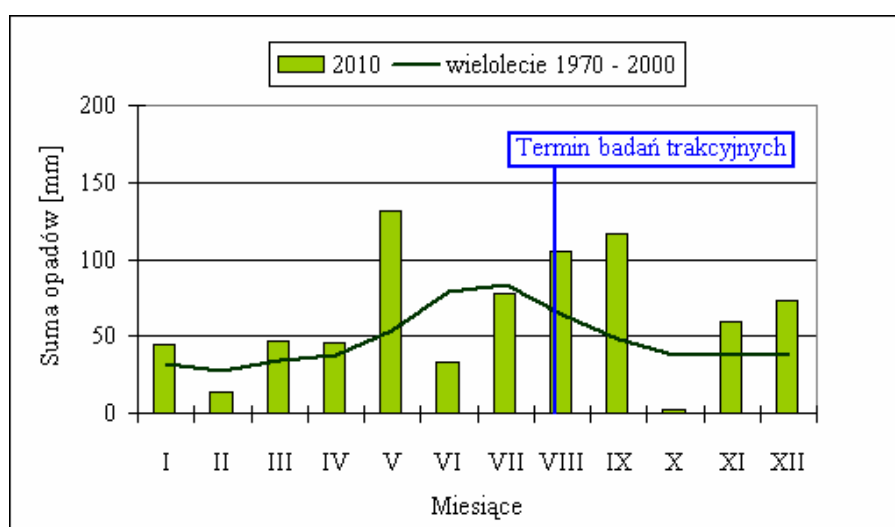
Na rysunku 4.1 przedstawiono wartości temperatur w I etapie badań (2010 rok) w porównaniu ze średnimi temperaturami z wielolecia 1970 – 2000.



Rys. 4.1. Wartości średnich miesięcznych temperatur w I roku badań (2010) w porównaniu ze średnimi z wielolecia

Analizując wartości przedstawione na rysunku 4.1 stwierdzić można, że temperatury w styczniu, lutym, październiku i grudniu były niższe niż średnie temperatury z wielolecia. Najcieplejszymi miesiącami były lipiec i sierpień; w okresie poprzedzającym termin badań trakcyjnych I etapu (lipiec 2010) wartość temperatury była wyższa niż średnia z wielolecia o ok. 3°C.

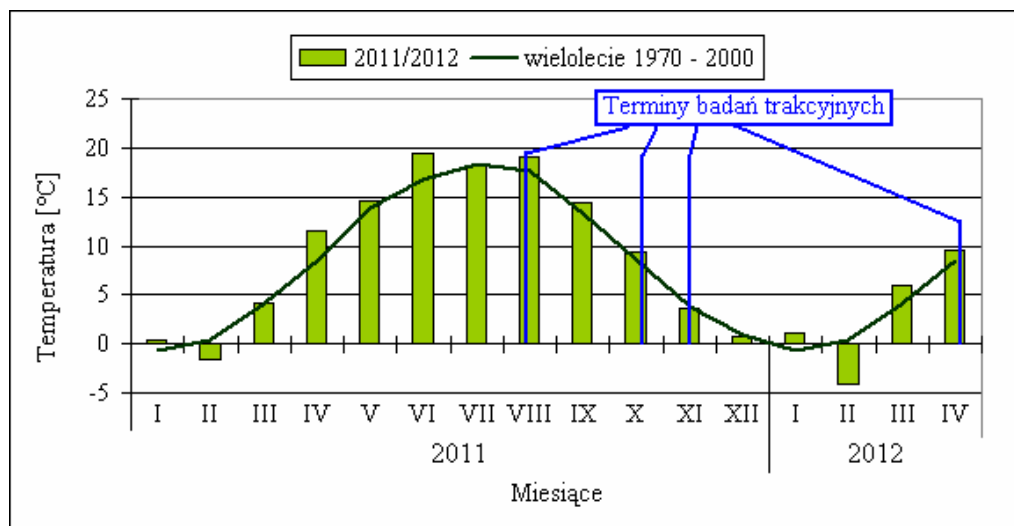
Drugim parametrem uwzględnianym przy opisie warunków atmosferycznych były miesięczne sumy opadów. Wartości te w I roku badań wraz ze średnimi z wielolecia 1970 – 2000 przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Wartości sum opadów w I roku badań (2010) w porównaniu ze średnimi z wielolecia

Zaobserwować można, że miesiącami o największej intensywności opadów były maj (131 mm) oraz wrzesień (117 mm). Ponadto we wszystkich miesiącach sumy opadów różniły się od średniej z wielolecia. W maju, sierpniu oraz wrześniu miesięczne sumy opadów były znacznie wyższe niż średnia z wielolecia, odwrotną tendencję zaobserwowano w lutym, czerwcu i październiku. W miesiącu poprzedzającym badania trakcyjne (lipiec 2010) suma opadów (78 mm) była niższa od średniej z wielolecia o 7%. Przypuszczać można, że takie warunki nie spowodowały nadmiernego uwilgotnienia badanych podłoży.

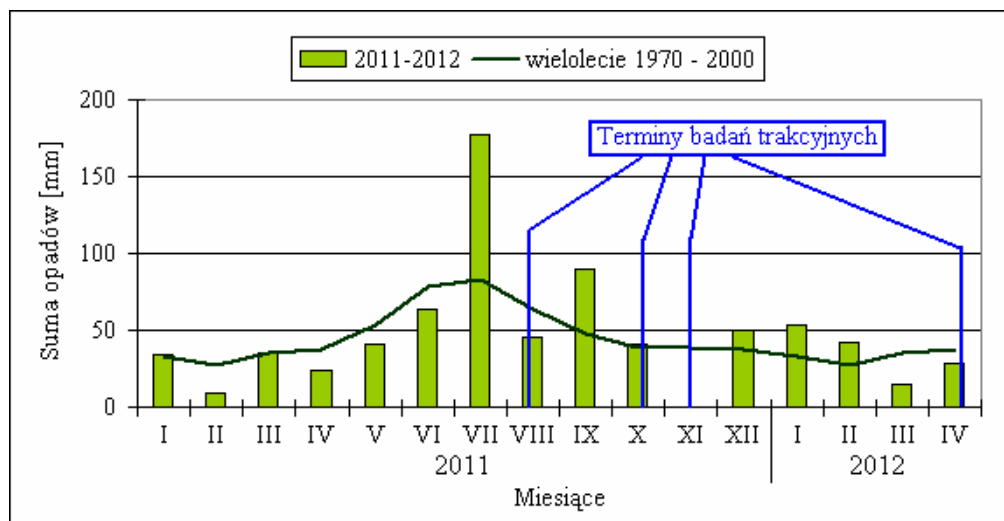
Wartości temperatur w terminach drugiego etapu badań (2011 i 2012 rok) wraz ze średnimi z wielolecia przedstawiono na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Wartości średnich miesięcznych temperatur w II roku badań (2011/2012) w porównaniu ze średnimi z wielolecia

Najcieplejszymi miesiącami w 2011 roku były czerwiec i sierpień – średnie temperatury w tych miesiącach wynosiły kolejno 19,4 oraz 19,0°C. Średnie miesięczne wartości temperatur nie odbiegały znacząco od średnich z wielolecia. W okresie przed badaniami trakcyjnymi na ścierniskach (lipiec 2011) średnia temperatura była identyczna ze średnią z wielolecia. Podobna sytuacja wystąpiła w okresach poprzedzających badania na darni łąkowej oraz drodze leśnej. W okresie poprzedzającym badania trakcyjne na glebach o różnym stopniu zagęszczenia (kwiecień 2012) średnia miesięczna temperatura była o ok. 2% wyższa niż średnia z wielolecia.

Na rysunku 4.4 przedstawiono wartości sum opadów w drugim roku wykonywania badań, w porównaniu ze średnią z wielolecia 1970 – 2000.



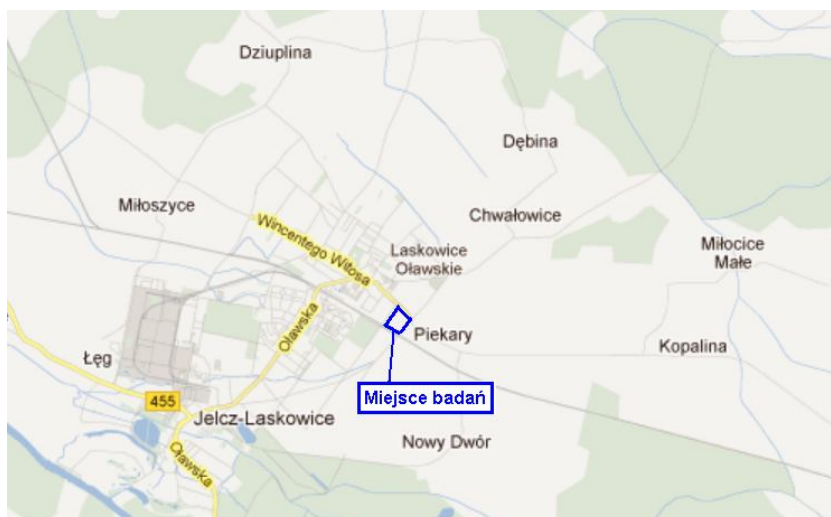
Rys. 4.4. Wartości sum opadów w II roku badań (2011/2012) w porównaniu ze średnimi z wielolecia

Na podstawie analizy danych przedstawionych na rysunku 4.4 zaobserwować można, że w 2011 roku miesiącem o największej ilości opadów był lipiec; suma opadów była w tym przypadku ponad dwukrotnie wyższa niż średnia z wielolecia. W okresie poprzedzającym badania traktcyjne na darni (październik 2011) suma opadów była zbliżona do średniej z wielolecia. W okresie przed badaniami na drodze gruntowej (I połowa listopada 2011) nie zanotowano żadnych opadów atmosferycznych, w poprzednim zaś miesiącu suma opadów była zbliżona do średniej z wielolecia. W kwietniu, przed badaniami na glebach, suma opadów wyniosła 29 mm i była niższa niż średnia z wielolecia. Duża liczba opadów w okresie poprzedzającym badania na ścierniskach przypuszczalnie mogła wpłynąć na wartość wilgotności tych podłoży, co w konsekwencji mogło mieć również wpływ na ich właściwości wytrzymałościowe. Z kolei brak opadów przed badaniami na drodze leśnej skutkować mógł niską wilgotnością tego podłoża i zwiększeniem jego wytrzymałości.

4.2. Charakterystyka podłoży

4.2.1. Podłoże I: ścierniska w trzech systemach uprawowych

Ścierniska wytypowane do I i II etapu badań zlokalizowane były na terenie pól doświadczalnych należących do Stacji Doświadczalnej Instytutu Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Jelczu-Laskowicach. Pola te położone były na wschód od Jelcza-Laskowic w podregionie Równiny Oleśnickiej, w regionie Niziny Śląskiej. Lokalizację przedstawiono na rysunku 4.5, natomiast widok ogólny poletek – na rysunku 4.6.



Rys. 4.5. Lokalizacja ściernisk na terenie IUNG w Jelczu-Laskowicach [źródło: GoogleMaps]



Rys. 4.6. Widok ogólny pola IUNG w Jelczu - Laskowicach

Na podstawie uzyskanych wyników analiz glebowych stwierdzono, że na opisywanym podłożu dominowały gleby pseudobielicowe, z dużą ilością szkieletu glebowego i kamieni. Na powierzchni występowały piaski gliniaste mocne i lekkie oraz gliny lekkie piaszczyste. Analizy glebowe wykonywano w Stacji Doświadczalnej Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa.

Na badanych polach od 1993 roku prowadzona jest uprawa w następującym płodozmianie: kukurydza – pszenica jara – rzepak – pszenica ozima. Uprawa prowadzona jest z wykorzystaniem trzech systemów uprawowych:

- system tradycyjny – stosowane wszystkie zabiegi uprawowe,
- system uproszczony – wyeliminowana orka,
- siew bezpośredni – brak zabiegów uprawowych.

Łączna powierzchnia pola wynosiła 8,98 ha, poszczególne systemy uprawowe stosowane były na trzech oddzielnych częściach o równych powierzchniach. Każda z części miała 90 metrów szerokości i 335 m długości; zaletą tak dużych powierzchni była możliwość wykonywania pomiarów trakcyjnych na całkowicie odrębnych odcinkach pomiarowych (każdy z pomiarów mógł być wykonywany na nienaruszonym podłożu).

W poszczególnych technologiach uprawy na każdym z pól wykonywano odmienne zabiegi agrotechniczne. W okresie poprzedzającym pierwszy etap badań trakcyjnych prowadzona była uprawa rzepaku ozimego. Ogół zabiegów przeprowadzanych w poszczególnych technologiach uprawy oraz odpowiadające im terminy wykonywania przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Zestawienie zabiegów agrotechnicznych w sezonie 2009/2010

Rok	Uprawa tradycyjna	Uprawa uproszczona	Siew bezpośredni
2009	08.08.2009 – zbiór przedplonu (pszenicy jarej), 12.08.2009 - nawożenie – Polifoska8; 400 kg·ha ⁻¹ , 12.08.2009 – podorywka, 17.08.2009 – orka na głębokość 25 cm 20.08.2009 – uprawa przedsiewna, 25.08.2009 - siew rzepaku, 29.10.2009 - oprysk	08.08.2009 – zbiór przedplonu (pszenicy jarej), 12.08.2009 - nawożenie – Polifoska8; 400 kg·ha ⁻¹ , 12.08.2009 – podorywka, 25.08.2009 – uprawa przedsiewna, 25.08.2009 – siew rzepaku, 29.10.2009 - oprysk	08.08.2009 – zbiór przedplonu (pszenicy jarej), 25.08.2009 – nawożenie; Polifoska8; 400 kg·ha ⁻¹ , 25.08.2009 – siew rzepaku, 29.10.2009 - oprysk
2010	10.03.2010 - nawożenie 11.05.2010 – oprysk, 13.07.2010 - zbiór rzepaku	10.03.2010 - nawożenie 11.05.2010 – oprysk, 13.07.2010 - zbiór rzepaku	10.03.2010 - nawożenie 11.05.2010 – oprysk, 13.07.2010 - zbiór rzepaku

Z danych zawartych w tabeli 4.1 wynika, że na glebie uprawianej metodą tradycyjną i uproszczoną liczba zabiegów była taka sama – różnice dotyczyły sposobu przeprowadzania zabiegów późniejszych (w systemie tradycyjnym podorywka, w systemie uproszczonym talerzowanie) oraz uprawy przedsiewnej (w systemie tradycyjnym orka przedsiewna, w systemie uproszczonym agregat uprawowo – siewny). W systemie siewu bezpośredniego nie stosowano żadnych zabiegów uprawowych, użycie agregatów maszynowych ograniczało się jedynie do stosowania ochrony chemicznej i nawożenia.

W kolejnym sezonie, przed drugim etapem badań, prowadzono uprawę pszenicy ozimej. Uprawa ta była prowadzona z wykorzystaniem tych samych technologii, które stosowane były przy uprawie rzepaku. Podobnie jak w przypadku poprzedniego sezonu liczba i rodzaj zabiegów agrotechnicznych były zależne od systemu uprawowego. Zestawienie zabiegów w sezonie 2010/2011 przedstawiono w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Zestawienie zabiegów agrotechnicznych w sezonie 2010/2011

Rok	Uprawa tradycyjna	Uprawa uproszczona	Siew bezpośredni
2010	09.08.2010 – wapnowanie, 09.08.2010 - podorywka na głębokość 8-10 cm, 16.08.2010 - orka na głębokość 25 cm, 20.09.2010 - nawożenie mineralne – saletra amonowa, 24.09.2010 - talerzowanie na głębokość 8 – 10cm, 25.09.2010 - uprawa agregatem przedsiewnym, 05.10.2010 - siew pszenicy ozimej, 09.11.2010 – oprysk	09.08.2010 – wapnowanie, 09.08.2010 - podorywka na głębokość 8-10 cm, 20.09.2010 - nawożenie mineralne – saletra amonowa, 24.09.2010 - talerzowanie na głębokość 8 – 10cm, 25.09.2010 - uprawa agregatem przedsiewnym, 05.10.2010 - siew pszenicy ozimej, 09.11.2010 – oprysk	09.08.2010 – wapnowanie, 16.08.2010 – oprysk Roundup Max, 20.09.2010 – nawożenie mineralne – saletra amonowa, 05.10.2010 – siew pszenicy ozimej, 09.11.2010 – oprysk
2011	07.03.2011 – nawożenie mineralne, 09.05.2011 – oprysk, 30.05.2011 – oprysk, 31.05.2011 – nawożenie mineralne (mocznik), 10.08.2011 - zbiór	07.03.2011 – nawożenie mineralne, 09.05.2011 – oprysk, 30.05.2011 – oprysk, 31.05.2011 – nawożenie mineralne (mocznik), 10.08.2011 - zbiór	07.03.2011 – nawożenie mineralne, 09.05.2011 – oprysk, 30.05.2011 – oprysk, 31.05.2011 – nawożenie mineralne (mocznik), 10.08.2011 - zbiór

Struktura zabiegów w poszczególnych systemach w sezonie 2010/2011 (tabela 4.2) była analogiczna jak w sezonie 2009/2010. Największą ilość zabiegów wykonano w tradycyjnym systemie uprawowym, natomiast w systemie siewu bezpośredniego zabiegi w trakcie wegetacji ograniczały się głównie do ochrony chemicznej i nawożenia mineralnego.

W obu sezonach wegetacyjnych zabiegi agrotechniczne wykonywane były z wykorzystaniem maszyn, których zestawienie zawarto w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Maszyny stosowane przy zabiegach agrotechnicznych na poletkach w Jelczu-Laskowicach

Rodzaj zabiegu	Maszyna	Szerokość robocza [m]
Orka	Pług 4-skibowy IBIS	1,40
Uprawa przedsiewna	Agregat uprawowy (kultywator + wałki strunowe)	4
Uprawa późniwna	Kultywator podorywkowy KOS, Brona talerzowa ciężka	3 4
Nawożenie	Zawieszany rozsiewacz nawozów	18
Oprysk	Opryskiwacz polowy	18
Siew	Siewnik pneumatyczny Accord (tylko przy uprawie tradycyjnej i uproszczonej)	3
	Siewnik do siewu bezpośredniego	2
Zbiór	Kombajn zbożowy New Holland TC 5050	4

Jako źródło energii dla maszyn bez własnego napędu stosowano następujące ciągniki:

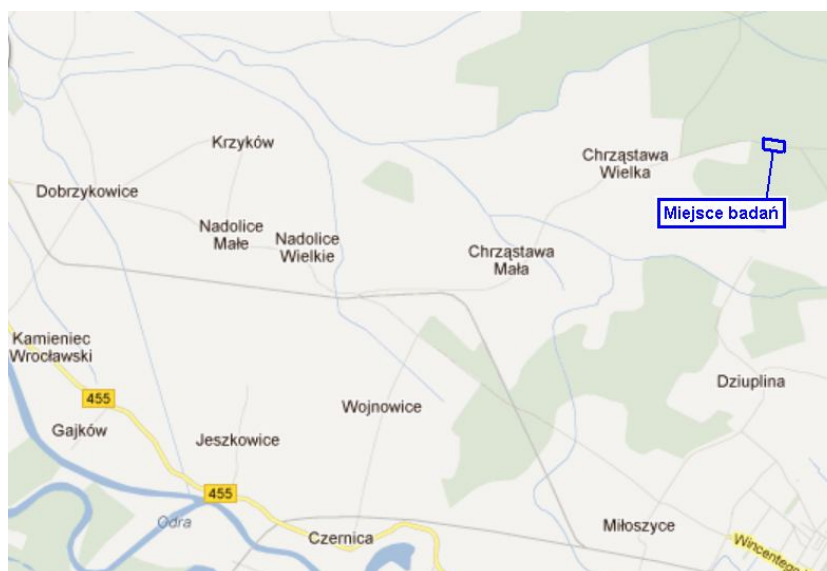
- New Holland TD 070 - moc silnika 73 KM,
- New Holland TM-125 - moc silnika 125 KM,
- New Holland T7030 – moc silnika 204 KM.

Z przedstawionego zestawienia zabiegów agrotechnicznych oraz charakterystyki maszyn rolniczych wynika, że podłożem najbardziej narażonym na intensywne oddziaływanie maszyn była gleba uprawiana systemem tradycyjnym. Na podłożu tym wykonywana była największa liczba przejazdów roboczych podczas zabiegów agrotechnicznych. Istotny jest ponadto fakt, iż były to zabiegi energochłonne, co wymagało stosowania jako źródła energii najcięższego z wymienionych ciągników. Najmniej intensywne oddziaływanie agregatów ciągnikowych na podłoże występowało przy siewie bezpośrednim, istotny jest jednak fakt, iż na tym podłożu nie dochodziło praktycznie do odwracania warstwy gleby.

W celu scharakteryzowania właściwości wytrzymałościowych badanych ściernisk przed badaniami trakcyjnymi (w obu etapach) wykonywano pomiary wilgotności aktualnej, zwężności oraz maksymalnych naprężeń ścinających. Wyniki tych pomiarów przedstawiono w rozdziale *Wyniki badań i ich analiza*.

4.2.2. Podłoże II: gruntowa droga leśna

Gruntowa droga leśna będąca jednym z podłoży badań II etapu zlokalizowana była na terenie Leśnictwa Chrzastawa należącego do Nadleśnictwa Oława i położonym w gminie Czernica w powiecie Oławskim (na wschód od Wrocławia). Lokalizację drogi przedstawiono na rysunku 4.7.



Rys. 4.7. Lokalizacja gruntowej drogi leśnej [źródło: GoogleMaps]

Do badań wytypowano drogę położoną w drzewostanie iglastym II klasy wieku. Droga utworzona została na glebie bielcowej wytworzonej z piasku słabo gliniastego na piasku luźnym. Na powierzchni drogi, między koleinami częściowo występowała okrywa darniowa oraz igliwie. Badana droga charakteryzowała się umiarkowaną intensywnością eksploatacji, głównie w trakcie prac związanych z hodowlą i pielęgnacją lasu. Charakterystykę badanej drogi przedstawiono w tabeli 4.4, natomiast ogólny jej widok na rysunku 4.8.

Tabela 4.4. Charakterystyka gruntowej drogi leśnej

Oznaczenie drogi	Warunki glebowe	Drzewostany	Podszyt	Runo
dg 1 Ch 335 b-c	gleba bielcowa właściwa wytworzona z piasku słabo gliniastego na piasku luźnym	Podstawowy: sosna, W domieszce: brzoza, świerk, modrzew	kruszyna, świerk krzaczasty, leszczyna, jarzębina	malina kamionka, jeżyna, trzcinnik piaszkowy, śmiałek darniowy, konwalia majowa, konwalijka dwulistna, borówka czernica



Rys. 4.8. Widok ogólny gruntowej drogi leśnej

Podczas badań trakcyjnych koła ciągnika współpracującego ze stanowiskiem poruszały się w koleinach, natomiast koło wyposażone w badaną oponę przemieszczało się na powierzchni między koleinami. Każdy z pomiarów wykonywany był na odrębnym odcinku pomiarowym (na nienaruszonym podłożu).

W celu scharakteryzowania stanu wierzchniej warstwy drogi wykonywano pomiary wilgotności aktualnej, zwężłości oraz maksymalnych naprężeń ścinających. Wyniki tych pomiarów przedstawiono w rozdziale *Wyniki badań i ich analiza*.

4.2.3. Podłoże III: darń łąkowo – pastwiskowa

Darń łąkowa wytypowana do badań w etapie II zlokalizowana była na terenie Rolniczych Zakładów Doświadczalnych Swojec należących do Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Lokalizację zadarnienia przedstawiono na rysunku 4.9.



Rys. 4.9. Lokalizacja darni łąkowej na terenie RZD Swojec [źródło: GoogleMaps]

Zadarnienie zostało założone wiosną 2010 roku. Podłoże dla zadarnienia stanowiła gleba piaszczysta. Obsiewu dokonano mieszanką traw *Top Grass*, norma wysiewu wynosiła 40 kg·ha⁻¹. Zestawienie gatunków użytych do wysiewu oraz ich procentowy udział w mieszance przedstawiono w tabeli 4.5. Z przedstawionych danych wynika, że gatunkiem dominującym w mieszance wysianej przy zakładaniu zadarnienia była życica trwała, natomiast najmniej licznymi gatunkami były tymotka łąkowa, koniczyna biała i wiechlina łąkowa.

Tabela 4.5. Skład wysianej mieszanki tworzącej darń łąkowy

Gatunek	Odmiana	Udział w mieszance [%]
Życica trwała (<i>Lolium perenne</i>)	<i>Licampo</i>	30
Kostrzewa łąkowa (<i>Festuca pratensis</i>)	<i>Limosa</i>	20
Tymotka łąkowa (<i>Phleum pratense</i>)	<i>Lischka</i>	10
Koniczyna czerwona (<i>Trifolium pratense</i>)	<i>Nike</i>	20
Koniczyna biała (<i>Trifolium repens</i>)	<i>Hula</i>	10
Wiechlina łąkowa (<i>Poa pratensis</i>)	<i>Bila</i>	10

W 2011 roku, w ciągu całego okresu wegetacyjnego na zadarnieniu wykonywane były wszystkie niezbędne zabiegi agrotechniczne. Z racji tego, że darń hodowana była w systemie ekstensywnym ilość tych zabiegów była ograniczona do minimum; wykonano jedynie jednokrotne nawożenie oraz okresowe koszenie. W całym sezonie wegetacyjnym wykonane zostały trzy koszenia (w maju, lipcu i wrześniu 2011 roku). Po drugim koszeniu dokonano oceny składu botanicznego darni. Wyniki tej oceny przedstawiono w tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Skład botaniczny badanej darni łąkowej

Gatunek	Udział w suchej masie [%]
Życica trwała (<i>Lolium perenne</i>)	46
Kostrzewa łąkowa (<i>Festuca pratensis</i>)	21
Tymotka łąkowa (<i>Phleum pratense</i>)	9
Koniczyna czerwona (<i>Trifolium pratense</i>)	9
Koniczyna biała (<i>Trifolium repens</i>)	6
Pozostałe gatunki	4
Zioła i chwasty	5

Tabela 4.7. Skład granulometryczny gleby na poletku doświadczalnym Instytutu Inżynierii Rolniczej UP we Wrocławiu

Nazwa frakcji	Udział frakcji [%]
Części szkieletowe	6,0
Piaski	61,0
Pyły	9,0
Iły	24,0

W okresie poprzedzającym badania na przyjętej glebie nie prowadzono uprawy roślin. Przed dokonaniem badań gleba została spulchniona glebogryzarką na głębokość około 0,1 m. Zastosowano dwa poziomy zagęszczenia:

- gleba luźna – po spulchnieniu glebogryzarką nie wykonywano żadnych zabiegów,
- gleba zagęszczona – po spulchnieniu wykonano zagęszczenie z wykorzystaniem wału gładkiego.

Zagęszczenia gleby dokonano w wyniku 50 przejazdów wału agregatowanego z ciągnikiem rolniczym klasy 6,0 kN. Masa wału wynosiła 150 kg, szerokość robocza 1 m, średnica 0,6 m.

Przed badaniami trakcyjnymi na glebach przy obu stopniach zagęszczenia dokonano pomiarów wilgotności aktualnej, zwięzłości oraz maksymalnych naprężeń ścinających. Wyniki tych pomiarów przedstawiono w rozdziale *Wyniki badań i ich analiza*.

4.3. Charakterystyka opon użytych do badań

Zdolności trakcyjne pojazdu rolniczego w dużej mierze zależą od parametrów jego układu jezdnego. Niebagatelne znaczenie ma tu rozmiar i konstrukcja ogumienia. To właśnie od tych parametrów zależeć będzie bowiem sposób przenoszenia siły trakcyjnej z kół pojazdu na podłoże.

W badaniach trakcyjnych użyto dwóch opon napędowych: 7.50-16 i 8.3-20. Opony te były przeznaczone do ciągników klas uciągu 4.0 – 6.0 kN. Zgodnie z Systemem Maszyn i Urządzeń Rolniczych ciągniki klasy uciągu 4.0 kN posiadają silniki o mocach 13 – 20 kW, masa tych pojazdów wynosi od 800 – 1200 kg, a maksymalne prędkości jazdy dochodzą do 20 km·h⁻¹. W przypadku ciągników klasy 6.0 kN zakres mocy silnika wynosi 22 – 30 kW, masy zawierają się w przedziale 1200 – 2100 kg, ciągnikami tymi można zazwyczaj jeździć z prędkościami do 30 km·h⁻¹. W obu przypadkach napęd z silnika może być przekazywany na jedną lub dwie osie, najczęściej spotykany jest klasyczny układ skrzętu kół (kierowana oś przednia), niekiedy spotykany jest przegubowy układ skrzętu.

Ze względu na niewielkie wymiary zewnętrzne ciągniki opisywanych klas uciagu odznaczają się dużą zwrotnością i możliwością manewrowania w miejscach o ograniczonej ilości miejsca (np. jazda między rzędami drzew w sadzie).

Ciągniki 6.0 kN posiadają trójpunktowy układ zawieszenia narzędzi ze wszystkimi regulacjami oraz wszystkie zaczepy i instalacje pneumatyczną, co umożliwia holowanie przyczep w transporcie po drogach utwardzonych. W przypadku ciągników klasy 4.0 kN trójpunktowy układ zawieszenia narzędzi może posiadać zubożone regulacje, nie zawsze występuje też instalacja pneumatyczna, co sprawia, że ciągniki te niekiedy mogą współpracować jedynie z wybranymi maszynami i przyczepami. Zarówno ciągniki klasy 4.0, jak i 6.0 kN posiadają wyposażenie spełniające wymagania Prawa o Ruchu Drogowym, co sprawia, że mogą być użytkowane na drogach publicznych.

Od ciągników takich oczekuje się przede wszystkim wszechstronności stosowania; mogą być one użytkowane zarówno do typowych zabiegów polowych, jak i do prac transportowych; w odróżnieniu od cięższych ciągników mogą one wykonywać zabiegi uprawowe w międzyrzędziach. Często ciągniki takie określane są mianem ciągników kompaktowych („compact tractors”) i oprócz upraw polowych znajdują zastosowanie w ogrodnictwie, sadownictwie, na zadarnieniach czy przy pracach komunalnych. Zazwyczaj producenci ciągników kompaktowych posiadają w ofercie osprzęt przystosowany do współpracy z tymi ciągnikami. Przykłady zastosowań ciągników uniwersalnych przedstawiono na rysunku 4.11.



Rys. 4.11. Zastosowania ciągników kompaktowych [źródło: materiały reklamowe firm Deutz-Fahr, Massey-Fergusson, Lamborghini]

Współczesnymi przykładami ciągników klas 4.0 i 6.0 kN mogą być New Holland T3000, John Deere 5055E, Case Farmall C 500 czy przedstawiony na rysunku 4.12 Massey Ferguson 1540.



Rys. 4.12. Przykład ciągnika kompaktowego – Massey Ferguson 1540 [źródło: materiały reklamowe firmy Massey Ferguson]

Popularnym krajowym ciągnikiem kompaktowym jest Pronar serii 320, który jest oferowany w różnych wersjach wyposażeniowych i może znaleźć różnorodne zastosowania zarówno w rolnictwie (wersja 320AM), jak i w pracach komunalnych (wersja 320AMK). Widok ogólny różnych wariantów tego ciągnika przedstawiono na rysunku 4.13. Producent tego ciągnika oferuje bogatą gamę osprzętu do omawianego ciągnika, co pozwala w pewnym stopniu zwiększyć uniwersalność jego stosowania.



Rys. 4.13. Różne warianty wyposażenia ciągników Pronar serii 320 [źródło: materiały reklamowe firmy Pronar]

Przedstawiony na rysunku 4.13 kompaktowy ciągnik Pronar 320 jest napędzany czterocylindrowym silnikiem wysokopiętnym o mocy maksymalnej 36 KM i maksymalnym momencie obrotowym 98 Nm. Przenoszenie napędu na koła odbywa się z wykorzystaniem suchego sprzęgła ciernego oraz mechanicznej skrzyni przekładniowej o 16 biegach do jazdy do przodu i 8 biegach wstecznych; zakres prędkości jazdy wynosi $1,13 - 27,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Ciągnik w standardzie posiada tylny trójpunktowy układ zawieszenia ze wszelkimi regulacjami oraz tylny wałek odbioru mocy, opcjonalnie te elementy mogą być zamontowane również z przodu. Koła tylne mogą być wyposażone w różne rodzaje opon o średnicy osadzenia 20 cali, na przedniej osi przewidziano montaż opon o średnicy osadzenia 16 cali. Masa własna przedstawionego ciągnika wynosi 1895 kg, z czego 984 kg przypada na oś tylną.

Uniwersalność stosowania przedstawionych ciągników sprawia, że są one użytkowane na różnych podłożach, nierzadko o skrajnie odmiennych właściwościach. Ten sam bowiem ciągnik może być wykorzystywany na glebie uprawnej, na darni (rekreacyjnej, łąkowej, pastwiskowej), w sadownictwie czy też na drogach utwardzonych. W nawiązaniu do tematu pracy zasadne wydaje się zbadanie opon takich ciągników w aspekcie współpracy z różnymi podłożami. Z uwagi na dużą uniwersalność ciągników kompaktowych, do badań trakcyjnych wytypowano opony najczęściej w nich stosowane: 7.5-16 oraz 8.3-20.

Pierwsza z badanych opon – 7.50-16 była wykorzystywana w obu etapach badań na ścierniskach, natomiast w drugim etapie – na ścierniskach oraz na glebach o różnym stopniu zagęszczenia. Widok tej opony przedstawiono na rysunku 4.14.



Rys. 4.14. Widok opony 7.5-16 użytej podczas I i II etapu badań

Producentem opony była firma Stomil Olsztyn, oponę wyprodukowano w 2009 roku. Opona posiadała konstrukcję diagonalną, dętkową oraz klasyczną rzeźbę bieżnika (wysokie rzadko rozmieszczone występy ustawione pod kątem 45° do osi opony).

W drugim etapie badań oprócz opony 7.50-16 badana była opona 8.3-20 przedstawiona na rysunku 4.15. Producentem opony była firma Mitas, oponę wyprodukowano w 2010 roku. Podobnie jak w poprzednim przypadku była to opona diagonalna dętkowa o klasycznej rzeźbie bieżnika. Parametrem, który różnił tę oponę od opony 7.50-16 były wymiary zewnętrzne. Opona 8.3-20 była badana na wszystkich rodzajach podłoży przyjętych w drugim etapie.



Rys. 4.15. Widok opony 8.3-20 użytej podczas II etapu badań

Parametry techniczne (konstrukcyjne) i eksploatacyjne obu badanych opon przedstawione zostały w tabeli 4.8.

Tabela 4.8. Parametry opon użytych do badań trakcyjnych

Oznaczenie opony	Średnica zewnętrzna [mm]	Średnica osadzenia [mm]	Szerokość [mm]	Wysokość występow bieżnika [mm]	Maksymalne obciążenie [kg]	Maksymalne ciśnienie powietrza [MPa]
7.5-16	710	406	190	30	775	0,325
8.3-20	845	510	210	35	900	0,200

Analizując dane przedstawione w powyższej tabeli stwierdzić można, że opona 8.3-20 cechowała się większymi wymiarami zewnętrznymi w porównaniu z oponą 7.50-16; wyższa była zarówno średnica zewnętrzna tej opony, jak i jej szerokość. Wskaźnik profilu badanych opon był taki sam i wynosił 0,8 (wysokość profilu opony

wynosiła 80% jej szerokości). Zaznaczyć należy, że obie badane opony posiadały nieużyty bieżnik; wysokości jego występow odpowiadały wysokości bieżnika opon nowych, przy czym większa wysokość występow dotyczyła opony 8.3-20. Podczas badań w obu oponach utrzymywano stałą wartość ciśnienia powietrza równą 0,15 MPa. Wartość ta była zgodna z zaleceniami podawanymi przez producentów opon. W praktyce, w trakcie eksploatacji pojazdów rolniczych, taka wartość ciśnienia jest stosowana najczęściej i może być określona mianem „uniwersalnego ciśnienia” (stosowane jest ono zarówno na podłożach utwardzonych, jak i nieutwardzonych, bez konieczności każdorazowej zmiany jego poziomu przy zmianie podłoża).

Zgodnie z koncepcją badań jako jeden z czynników przyjęto statyczne obciążenie pionowe koła. Przyjęto, że różnice między obciążeniami będą wynosiły 15%. W pierwszym etapie badań stosowano dwa poziomy obciążenia równe 4620 N (471 kg) i 5320 N (542 kg). W drugim etapie badań zastosowano dodatkowo trzeci poziom obciążenia wynoszący 6110 N (622 kg). We wszystkich przypadkach wartości obciążeń pionowych mieściły się w zakresach obciążeń katalogowych podawanych przez producentów opon. Obciążenie pionowe równe 4620N było najniższym obciążeniem, przy którym nie zachodziło ryzyko zatrzymania stanowiska pomiarowego na skutek nadmiernego poślizgu (poziom ten został dobrany na podstawie wcześniejszych prób).

W drugim etapie badań dla opony 8.3-20 przewidziano dodatkowo wprowadzenie łańcucha antypoślizgowego podczas badań na wybranych podłożach. Oceniony miał zostać wpływ stosowania łańcucha na zmiany właściwości trakcyjnych koła. Zastosowano łańcuch firmy Pewag model Traktor Doppelspur VKK70 o tzw. układzie drabinkowym. Widok łańcucha po zamontowaniu na badanej oponie przedstawiono na rysunku 4.16.



Rys. 4.16. Widok łańcucha antypoślizgowego po zamontowaniu na badanej oponie

Ogniwa łańcucha wykonane były ze stalowego pręta o przekroju kwadratowym o wymiarach 7×7 mm i miały kształt owalny o wymiarach 42×27 mm. Na każdym z ogniw przylegających do centralnej części bieznika zamontowane były ogniwa dodatkowe pełniące rolę ostróg. Łańcuch wyposażony był w układ napinający, co zapewniało równomierne rozmieszczenie na całym obwodzie opony niezależne od jej chwilowej deformacji.

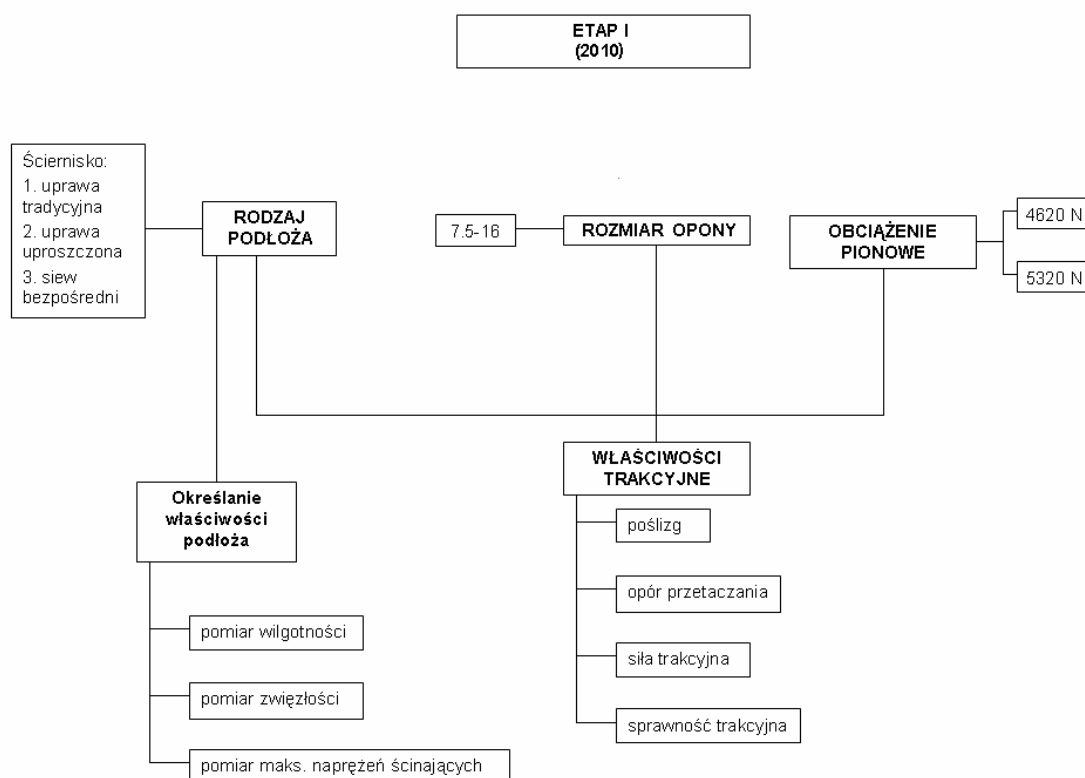
5. Metodyka badań

5.1. Koncepcja realizacji badań

W przyjętej koncepcji realizacji badań założono, że będą one prowadzone w okresie dwuletnim. W pierwszym roku przewidziano badania rozpoznawcze, których celem była wstępna ocena właściwości trakcyjnych wybranych opon na wybranych podłożach. Wyniki uzyskane w tym etapie badań pozwoliły na weryfikację poprawności doboru opony, podłoży oraz parametrów eksploatacyjnych. Badania drugiego etapu miały na celu wykazanie zależności pomiędzy właściwościami trakcyjnymi badanych kół, a rodzajem podłoża i parametrami eksploatacyjnymi. W drugim etapie badań, oprócz wyznaczenia siły trakcyjnej i sprawności trakcyjnej dokonano również bilansu mocy kół wyposażonych w badane opony, co pozwoliło na pełną ocenę energetyczną ich współpracy z odmiennymi podłożami.

5.1.1. Etap I – badania rozpoznawcze

Pierwszy etap badań mający charakter rozpoznawczy przeprowadzono w 2010 roku. Koncepcję tych badań przedstawiono na rysunku 5.1.



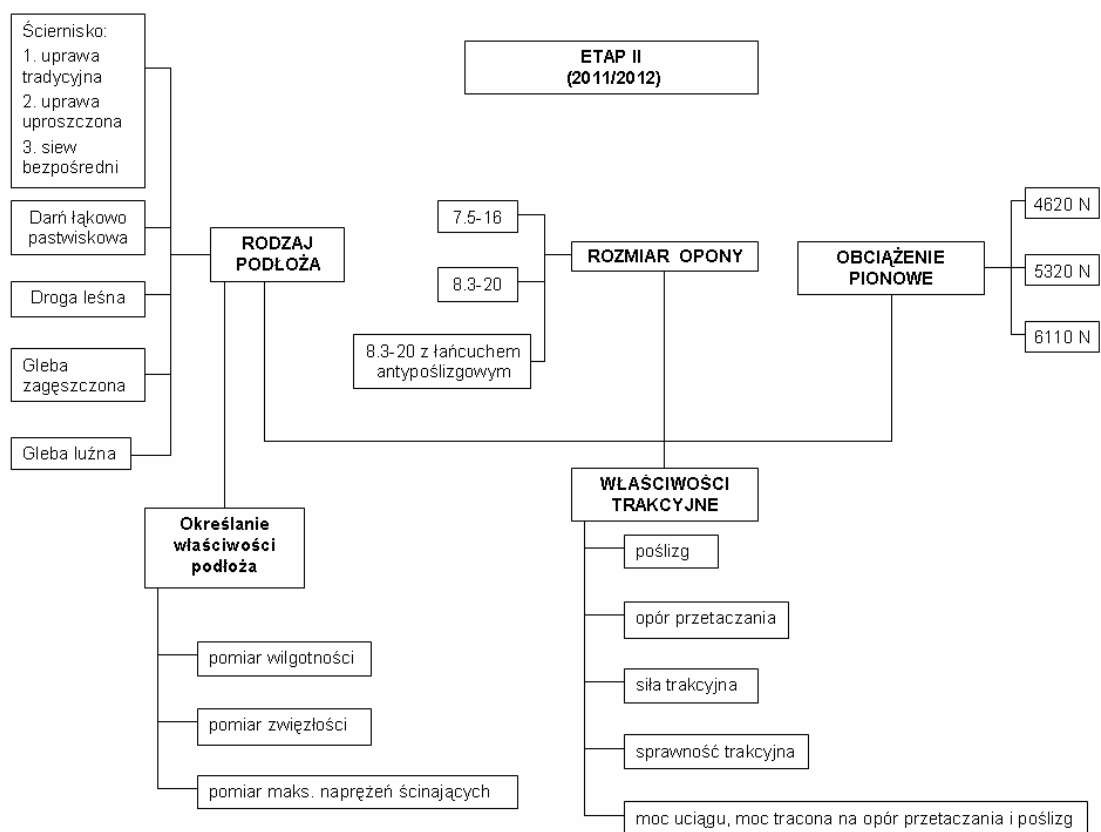
Rys. 5.1. Plan badań I etapu

Zgodnie z przyjętą koncepcją realizacji celów pracy badania rozpoznawcze przeprowadzono na ścierniskach po rzepaku ozimym uprawianym trzema różnymi systemami uprawowymi. Właściwości trakcyjne określone były na podstawie analizy wartości poślizgu, oporu przetaczania, siły trakcyjnej i sprawności trakcyjnej. Badana była jedna opona – 7.5-16, stosowano dwa poziomy obciążenia pionowego (4620 i 5320 N). Charakterystykę podłoży oraz opony użytej do badań przedstawiono w rozdziale *Przedmiot i warunki badań*.

Założono, że w przypadku wystąpienia istotnych różnic we właściwościach trakcyjnych na różnych podłożach podczas pierwszego etapu badań, do drugiego etapu przyjęte zostaną dodatkowe rodzaje podłoży, o jeszcze większym zróżnicowaniu właściwości. Założono ponadto, że jeśli w pierwszym etapie badań zostanie wykazany istotny wpływ obciążenia pionowego, to w drugim etapie zostanie przyjęty dodatkowy (wyższy) poziom obciążenia, w celu dalszej analizy wpływu obciążenia na właściwości trakcyjne. W przypadku braku istotnego wpływu obciążenia na właściwości trakcyjne w pierwszym etapie, w drugim etapie badań również przewidziano zastosowanie dodatkowego poziomu obciążenia, aby wykazać czy istnieje taki poziom obciążenia, który spowoduje zmiany właściwości trakcyjnych. Ponadto, do badań drugiego etapu przyjęto dodatkową oponę o takiej samej konstrukcji, lecz różnych wymiarach zewnętrznych, w celu ustalenia czy rozmiar opony ma wpływ na właściwości trakcyjne koła.

5.1.2. Etap II – badania właściwe

Po weryfikacji poprawności doboru warunków badań (rozmiar opony, rodzaj podłoża, wielkości obciążeń pionowych) w trakcie badań rozpoznawczych, przystąpiono do badań właściwych. Plan tych badań przedstawiono na rysunku 5.2. Plan ten zakładał przeprowadzenie badań dla dwóch opon: 7.50-16 i 8.3-20. Opona 7.5-16 będzie badana na ścierniskach, glebie zagęszczonej i luźnej, natomiast opona 8.3-20 – na ścierniskach, gruntowej drodze leśnej, darni łąkowej oraz glebie zagęszczonej i luźnej. Wprowadzony został ponadto trzeci poziom obciążenia pionowego badanych kół (6110 N). W przypadku opony 8.3-20 przewidziano również zbadanie wpływu stosowania łańcucha antypoślizgowego na właściwości trakcyjne. Oprócz określenia siły trakcyjnej, oporu przetaczania i sprawności trakcyjnej w etapie drugim przewidziano dokonanie bilansu mocy na badanych kołach, w oparciu o wartości mocy dostarczanej do koła, mocy uciągu, mocy traconych na opór przetaczania i poślizg.



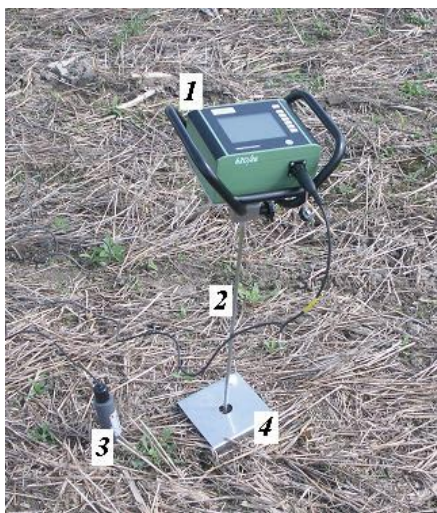
Rys. 5.2. Plan badań II etapu

Uzyskane wyniki badań II etapu wykorzystane miały zostać do oceny transmisji mocy z silnika ciągnika na koła i podłoże, z uwzględnieniem całego zakresu zmienności warunków eksploatacji. Analizę taką planowano przeprowadzić w odniesieniu do hipotetycznego ciągnika, który mógł być zakwalifikowany do klas uciągu 4.0 i 6.0 kN. Celem takiej analizy miało być wykazanie, jakie muszą być parametry pracy silnika ciągnika aby siła trakcyjna na różnych podłożach była rozwijana przy maksymalnej sprawności trakcyjnej. Analizę przeprowadzono dla dwóch wariantów opon na osi napędowej (7.5-16 i 8.3-20), przy różnych poziomach obciążenia pionowego i przy różnych prędkościach jazdy. Uwzględniono przy tym różne wartości przełożeń w układzie napędowym przyjętego ciągnika.

5.2. Określanie parametrów podłoża

5.2.1. Pomiar wilgotności i zwięzłości

Określanie wilgotności względnej i zwięzłości podłoża odbywało się przy użyciu urządzenia Penetrologger firmy Eijkelkamp przedstawionego na rysunku 5.3.

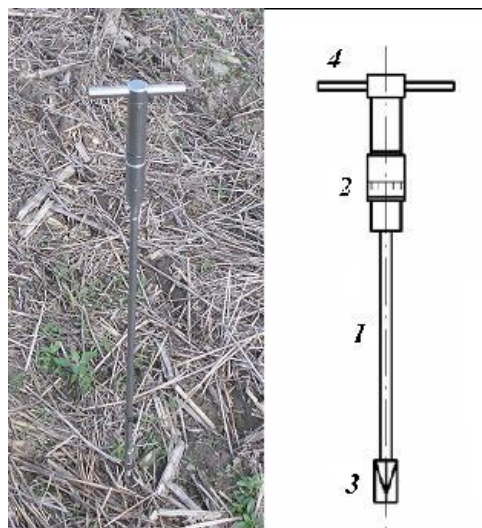


Rys. 5.3. Urządzenie Penetrologger do pomiaru wilgotności i zwięzłości podłoża: 1 – głowica z elektronicznym układem rejestrującym, 2 – żerdź sondująca z końcówką stożkową, 3 – sonda Theta-Probe do pomiaru wilgotności, 4 – płytka odbiciowa

Pomiar zwięzłości polegał na zagłębieniu w podłożu żerdzi pomiarowej (2) wraz z końcówką stożkową. W badaniach stosowano końcówkę o kącie wierzchołkowym 60° i polu podstawy 1 cm^2 . Zwięzłość określana była w warstwie $0 - 0,3 \text{ m}$ – pomiar głębokości możliwy był dzięki płytce odbiciowej (4). Wartości zwięzłości w sposób ciągły były rejestrowane w układzie elektronicznym umieszczonym w głowicy (1). Wilgotność względna badanych podłoży określana była przy użyciu sondy Theta-Probe (3) współpracującej z elektronicznym układem rejestrującym urządzenia. Pomiar wilgotności polegał na wbiciu końcówek pomiarowych sondy w glebę (głębokość $0,05 \text{ m}$) i odczycie wskazań na wyświetlaczu urządzenia. Dokładność pomiaru zwięzłości wynosiła 1 kPa , zakres pomiaru $0 - 10 \text{ MPa}$, wilgotność względna była mierzona z dokładnością $0,1\%$, w zakresie $0 - 100\%$. Każdy pomiar wilgotności i zwięzłości wykonywano w pięciu powtórzeniach.

5.2.2. Pomiar maksymalnych naprężeń ścinających

Maksymalne naprężenia ścinające określone były z wykorzystaniem testera naprężeń ścinających z sondą skrzydełkową firmy Geonor (rys. 5.4). Zasadniczym elementem tego testera był dwuczęściowy trzpień (1) z zamontowanym układem dynamometrycznym (3). Na końcu trzpienia zamontowana była końcówka pomiarowa w postaci skrzydełek (4). Badanie polegało na zagłębieniu końcówki pomiarowej w badanym podłożu na wymaganą głębokość oraz wykonaniu obrotu za pomocą uchwytu (2) aż do ścięcia podłoża. Następnie odczytywano wartość naprężenia na podziałce (3).



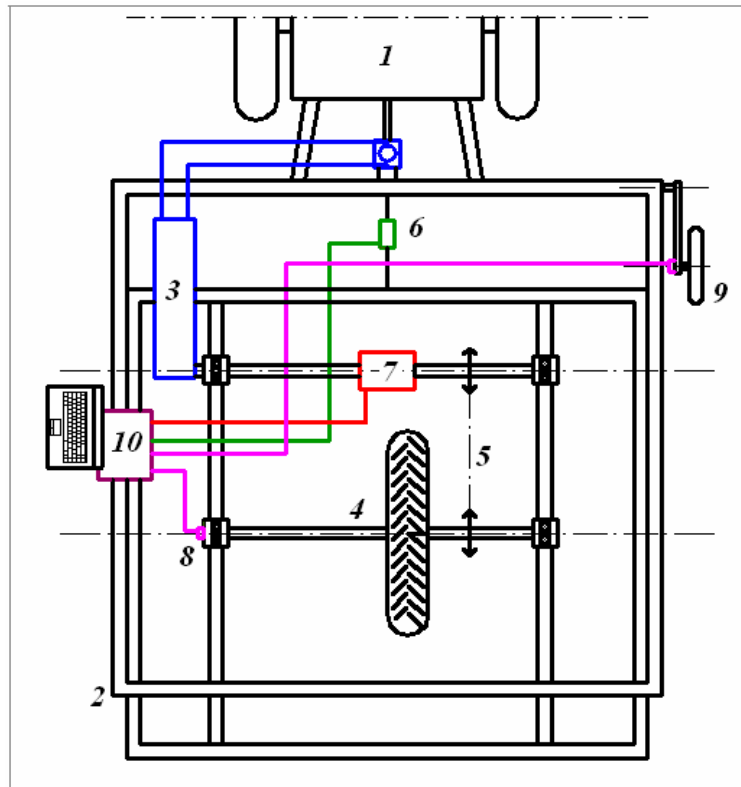
Rys. 5.4. Widok ogólny i schemat sondy skrzydełkowej Geonor VANE H-60: 1 – trzpień, 2 – układ dynamometryczny z podziałką, 3 – końcówka pomiarowa (skrzydełka), 4 – uchwyt

Dokładność pomiarowa przedstawionego urządzenia wynosiła 2 kPa, natomiast zakres pomiarowy 0 – 260 kPa. Na każdym z badanych podłoży dokonywano pomiarów na trzech głębokościach (0,05; 0,10 i 0,15 m), każdy pomiar wykonywany był w pięciu powtórzeniach.

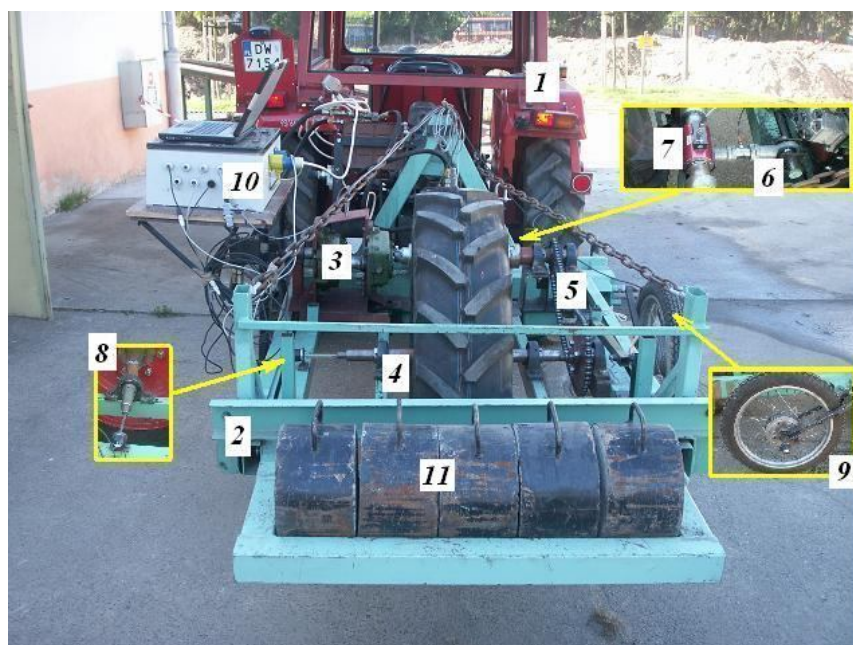
5.3. Określanie właściwości trakcyjnych

Zgodnie z przyjętą koncepcją badań wyznaczano właściwości trakcyjne kół wyposażonych w badane opony. W tym celu mierzono wartości siły uciągu, momentu obrotowego na badanych kołach oraz wartości drogi teoretycznej i rzeczywistej badanego koła. Uzyskane w ten sposób dane umożliwiły obliczenie wartości poślizgu, siły trakcyjnej, oporu przetaczania oraz sprawności trakcyjnej. W dalszej kolejności w oparciu o uzyskane wyniki sporządzono bilans mocy na kołach wyposażonych w badane opony.

Do badań trakcyjnych wykorzystano specjalistyczne stanowisko zaprojektowane i wykonane w Instytucie Inżynierii Rolniczej we Wrocławiu. Stanowisko było przystosowane do współpracy z ciągnikiem rolniczym, który był źródłem energii dla urządzeń napędowych i pomiarowych stanowiska. Takie rozwiązanie zapewniało pełną mobilność stanowiska oraz możliwość wielokrotnego przeprowadzania pomiarów dla potrzeb analizy statystycznej. Schemat oraz widok ogólny stanowiska przedstawiono na rysunkach 5.5 i 5.6.



Rys. 5.5. Schemat stanowiska do badań właściwości trakcyjnych: 1 – ciągnik klasy 6,0 kN, 2 – rama, 3 – hydrauliczno - mechaniczny układ napędowy, 4 – wał z badanym kołem, 5 – przekładnia łańcuchowa, 6 – siłomierz, 7 – momentomierz umieszczony na pośrednim wale napędowym, 8 – czujnik pomiaru drogi teoretycznej, 9 – koło z czujnikiem do pomiaru drogi rzeczywistej, 10 – układ rejestrujący, 11 – obciążniki



Rys. 5.6. Widok ogólny stanowiska do badań trakcyjnych (opis jak na rysunku 5.5)

Przedstawione na powyższych rysunkach stanowisko współpracowało z ciągnikiem rolniczym klasy 6,0 kN. Bazą dla całego stanowiska była dwuczęściowa rama (2); w tylnej

części tej ramy zamontowano wał z badanym kołem (4). Napęd koła uzyskiwany był od wałka odbioru mocy ciągnika za pośrednictwem kilkustopniowej przekładni redukującej (3), wału pośredniego oraz przekładni łańcuchowej (5). Przednia i tylna część ramy połączone były suwliwie, między tymi częściami umieszczono siłomierz indukcyjny (6) do pomiaru siły uciągu. Dokładności pomiaru siłomierza wynosiła 1 N, a zakres 0 – 20000 N. Moment obrotowy na badanych kołach mierzony był z wykorzystaniem momentomierza indukcyjnego (7) o dokładności 1 Nm i zakresie 0 – 3000 Nm, umieszczonego na wale pośrednim. Wartość drogi teoretycznej i rzeczywistej badanych kół były wyznaczane z wykorzystaniem czujników obrotowo – impulsowych MOK40. W przypadku pomiaru drogi teoretycznej czujnik ten (8) umieszczony był przy wale z badanym kołem, natomiast przy pomiarze drogi rzeczywistej czujnik zamontowano na dodatkowym kole (9). Wartościami mierzonymi przez czujniki MOK40 były kąty obrotu, które następnie przeliczano na wartości dróg. Dokładność pomiaru kąta wynosiła 0,1°. Wszystkie dane uzyskane podczas pomiarów przesyłane były do elektronicznego układu rejestrującego (10) współpracującego z komputerem przenośnym. Poziomy obciążenia pionowego kół dobierano poprzez zmianę ilości obciążników (11) umieszczanych w tylnej części stanowiska. W przypadku, gdy obciążniki nie były umieszczone w osi pionowej koła dokonywano obliczeń na podstawie wartości momentu działania ciężaru.

Stanowisko było agregatowane z ciągnikiem za pośrednictwem trójpunktowego układu zawieszenia, przy czym sposób połączenia umożliwiał pełne kopiowanie nierówności terenu podczas przejazdów w trakcie badań.

Badania polegały na wymuszeniu obrotu badanego koła za pośrednictwem wałka odbioru mocy ciągnika, w wyniku czego uzyskiwano ruch postępowy stanowiska i ciągnika (skrzynia biegów ciągnika przełączona była w położenie neutralne). W końcowym etapie pomiaru stanowisko było stopniowo zatrzymywane hamulcem zasadniczym ciągnika - w ten sposób możliwe było uzyskanie pełnego zakresu poślizgu badanych kół. Podczas badania w sposób ciągły rejestrowane były wartości siły uciągu, momentu obrotowego i dróg. Każdy z pomiarów wykonywano w pięciu powtórzeniach – liczba ta była niezbędna ze względu na późniejszą statystyczną obróbkę wyników badań.

Wartości promienia dynamicznego były wyznaczane na podstawie drogi przebytej przez badane koło po wykonaniu pięciu pełnych obrotów; osobno dla każdego obciążenia pionowego. Pomiar taki odbywał się przy wyłączonym napędzie badanego koła,

do pomiaru drogi wykorzystywany był czujnik obrotowo – impulsowy MOK40 zamontowany na kole dodatkowym.

5.4. Opracowanie wyników badań

Uzyskane podczas badań trakcyjnych dane posłużyły do obliczenia wartości poślizgu, siły trakcyjnej i sprawności trakcyjnej, a także do sporządzenia bilansu mocy badanych kół. Wartości poślizgu obliczano z wykorzystaniem zmierzonych wartości drogi rzeczywistej i teoretycznej kół, zgodnie ze wzorem 1.

$$\delta = 100 \left(1 - \frac{s_R}{s_T} \right) \quad [1]$$

gdzie:

δ – poślizg [%],

s_R – droga rzeczywista [m],

s_T – droga teoretyczna [m].

Wartości dróg s_R i s_T były wyznaczone na podstawie kątów obrotów mierzonych przez czujniki obrotowo – impulsowe.

Wartość siły trakcyjnej obliczano wykorzystując zmierzone wartości siły uciągu i momentu obrotowego, zgodnie ze wzorem 2.

$$P_T = \frac{M_O}{r_D} \quad [2]$$

gdzie:

P_T – siła trakcyjna [N],

M_O – moment obrotowy [N],

r_D – promień dynamiczny [m].

Sprawność trakcyjną badanych kół wyznaczano zgodnie ze wzorem 3, wykorzystując zmierzone wartości siły uciągu, momentu obrotowego i promienia dynamicznego oraz obliczone wartości poślizgu.

$$\eta = \frac{P_U}{M_O} r_D (100 - \delta) \quad [3]$$

gdzie:

η – sprawność trakcyjna [%],

P_U – siła uciągu [N],

M_O – moment obrotowy [Nm],
 r_D – promień dynamiczny koła [m],
 δ – poślizg [%].

Wartości oporu przetaczania kół obliczano na podstawie różnicy wartości siły trakcyjnej i siły uciągu, co przedstawia wzór 4.

$$P_f = P_T - P_U \quad [4]$$

gdzie:

P_f – opór przetaczania [N],
 P_T – siła trakcyjna [N],
 P_U – siła uciągu [N].

Przeprowadzenie bilansu energetycznego wymagało znajomości wartości mocy dostarczanej do koła, mocy uciągu oraz mocy traconych na opór przetaczania i poślizg koła. Moc uciągu obliczana była jako iloczyn siły uciągu oraz prędkości rzeczywistej badanego koła, zgodnie ze wzorem 5.

$$N_H = P_H v_R \quad [5]$$

gdzie:

N_H – moc uciągu [W],
 P_H – siła uciągu [N],
 v_R – prędkość rzeczywista [ms^{-1}].

Prędkość rzeczywista została obliczona jako stosunek drogi rzeczywistej do czasu:

$$v_R = \frac{s_R}{t} \quad [6]$$

gdzie:

v_R – prędkość rzeczywista [ms^{-1}]
 s_R – droga rzeczywista [m],
 t – czas pomiaru [s].

Moc wykorzystywana na pokonanie oporów przetaczania stanowiła iloczyn oporu przetaczania i prędkości rzeczywistej (wzór 7).

$$N_f = P_f v_R \quad [7]$$

gdzie:

N_f – moc wykorzystywana na pokonanie oporów przetaczania [W],

P_f – opór przetaczania [N],

v_R – prędkość rzeczywista [ms^{-1}].

Moc traconą na poślizg koła obliczano zgodnie z zależnościami 8 - 11.

$$N_\delta = P_T (r_D - r_\delta) \omega_T \quad [8]$$

$$r_\delta = \frac{v_R}{\omega_T} \quad [9]$$

$$\omega_T = \frac{v_T}{r_D} \quad [10]$$

$$v_T = \frac{s_T}{t} \quad [11]$$

gdzie:

N_δ – moc tracona na poślizg koła [W],

P_T – siła trakcyjna [N],

r_D – promień dynamiczny koła [m],

r_δ – promień poślizgu koła [m],

ω_T – teoretyczna prędkość kątowa koła [s^{-1}],

v_R – prędkość rzeczywista koła [ms^{-1}],

v_T – prędkość teoretyczna koła [ms^{-1}].

t – czas pomiaru [s].

Suma mocy uciągu N_H , mocy wykorzystywanej na pokonanie oporu przetaczania N_f i mocy traconej na poślizg N_δ stanowiła moc dostarczaną do koła N_k , zgodnie ze wzorem 12.

$$N_k = N_H + N_f + N_\delta \quad [12]$$

gdzie:

N_k – moc dostarczana do koła [W],

N_H – moc uciągu [W],

N_f – moc wykorzystywana na pokonanie oporów przetaczania [W],

N_δ – moc tracona na poślizg koła [W].

5.5. Analiza statystyczna wyników badań

Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem pakietu Statistica 9.0. W pierwszej kolejności przeprowadzone zostały testy na normalność rozkładu badanych cech (test Shapiro-Wilka) i na jednorodność wariancji (test Levene'a).

Na tej podstawie wybierano test, który miał ocenić wpływ czynników na analizowane cechy. W przypadku, gdy cecha posiadała rozkład zgodny z normalnym, o jednorodnych wariancjach stosowano test parametryczny – analizę wariancji. Jeżeli któryś z warunków stosowalności testów parametrycznych nie został spełniony (brak rozkładu zgodnego z normalnym bądź niejednorodność wariancji) analizę wpływu czynników przeprowadzano z wykorzystaniem nieparametrycznego testu Kruskala-Wallisa.

W przypadku, gdy został wykazany istotny wpływ danego czynnika na analizowaną cechę przeprowadzano testy porównań wielokrotnych mające wykazać, między którymi poziomami czynnika występowały istotne różnice.

6. Wyniki badań

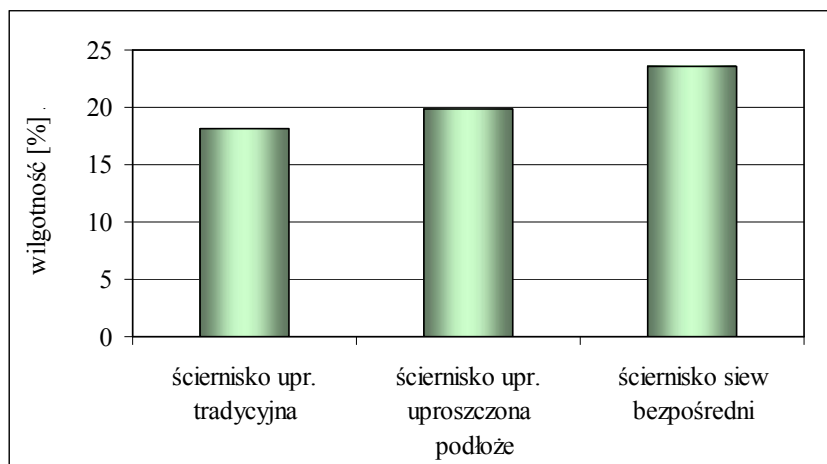
6.1. Badania etapu I (2010)

6.1.1. Właściwości podłoża

Badania etapu I przeprowadzone zostały na ścierniskach pozostałych po zbiorze rzepaku uprawianego trzema różnymi technologiami (tradycyjny system uprawy, uproszczony system uprawy oraz siew bezpośredni). Przypuszczać można, że odmienność technologii uprawowych i związany z nimi różny stopień ingerencji w glebę może mieć wpływ na parametry podłoża, dlatego wykonano badania wilgotności, zwięzłości oraz maksymalnych naprężeń ścinających.

Wilgotność

Zgodnie z przyjętym planem badań na badanych podłożach dokonano pomiarów wilgotności aktualnej. Każdy z pomiarów został wykonany w pięciu powtórzeniach. Na rysunku 6.1 przedstawiono średnie wartości wilgotności badanych podłoży.



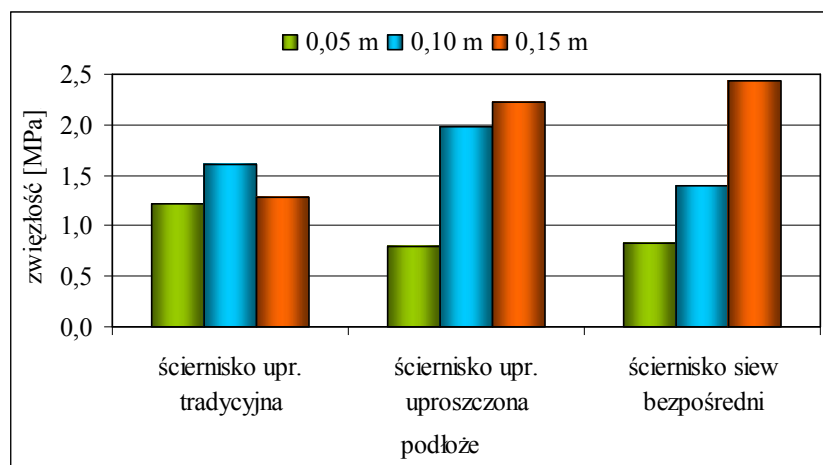
Rys. 6.1. Zestawienie wilgotności podłoży w badaniach etapu I

Z powyższego zestawienia wynika, że największą wilgotnością (24%) odznaczało się ściernisko w siewie bezpośrednim. Przypuszczalnie sytuacja taka może mieć związek z większą zdolnością gleby do zatrzymywania wody – może to być spowodowane mniejszą ilością zabiegów agrotechnicznych. Najmniejszą wilgotność (18%) zaobserwowano na ściernisku powstałym po uprawie tradycyjnej. Względne różnice w wartościach wilgotności dochodziły do 20%, toteż należy się spodziewać, że różnice te mogą mieć wpływ na parametry wytrzymałościowe badanych podłoży. Przypuszczalnie,

większa wilgotność oznaczać może zmniejszenie wytrzymałości podłoża objawiające się spadkiem mniejszymi wartościami zwięzłości i naprężeń ścinających.

Zwięzłość

Na rysunku 6.2 zestawiono wartości zwięzłości dla trzech głębokości pomiaru (0,05; 0,10 i 0,15 m).



Rys. 6.2. Zestawienie zwięzłości podłoża w badaniach etapu I

Analiza danych przedstawionych na rysunku 6.2 pozwala stwierdzić, że w poszczególnych technologiach uprawy gleby wartości zwięzłości oraz ich zmiany wraz z głębokością pomiaru różniły się między sobą. W przypadku ścierniska w uprawie tradycyjnej maksymalną wartość zwięzłości równą 1,6 MPa stwierdzono na głębokości 0,10 m. W dwóch pozostałych systemach uprawowych zaobserwowano natomiast tendencję wzrostową wartości zwięzłości wraz ze zwiększaniem głębokości pomiaru. Istotny jest przy tym fakt, że przy najmniejszej głębokości pomiaru wartości zwięzłości w uprawie uproszczonej i siewie bezpośrednim były porównywalne (kolejno 0,7 i 0,8 MPa), natomiast na większych głębokościach wystąpiły pewne różnice w wartościach zwięzłości. W uprawie uproszczonej zwięzłość na głębokości 0,10 m była wyższa niż w siewie bezpośrednim; odwrotna sytuacja występuje na głębokości 0,15 m. Największa zmierzona wartość zwięzłości dotyczyła ścierniska w siewie bezpośrednim, na głębokości 0,15 m (2,4 MPa).

Różna charakterystyka zmian wartości zwięzłości spowodowana może być odmiennymi technologiami uprawy; w przypadku uprawy tradycyjnej w wyniku stosowania orki, dochodziło do odwracania warstwy gleby na głębokości powyżej 15 cm, toteż na tych głębokościach nie obserwuje się znacznego przyrostu zwięzłości.

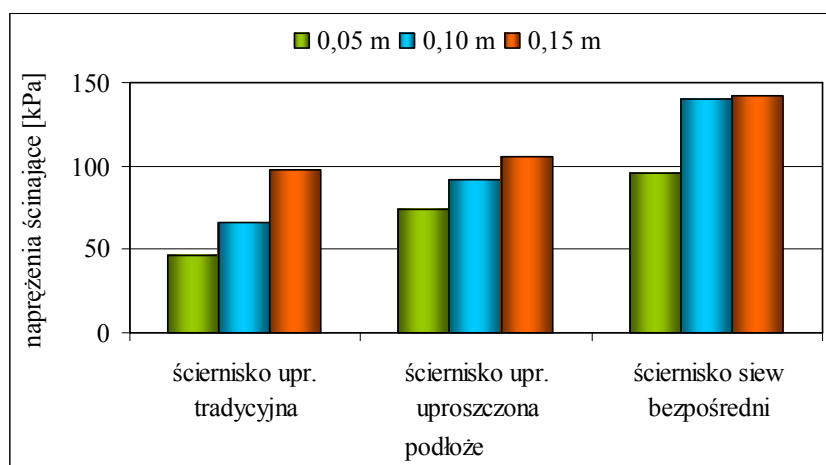
W uproszczonym systemie uprawy głębokość oddziaływania elementów maszyn była mniejsza niż przy systemie tradycyjnym, natomiast przy siewie bezpośrednim ingerencja w strukturę gleby ograniczała się do zabiegu siewu za pomocą specjalistycznego siewnika.

Wyniki pomiarów zwięzłości na najniższej głębokości (0,05 m) wydają się korespondować z wartościami wilgotności aktualnej. Na ściernisku w uprawie tradycyjnej, na którym wartość wilgotności była najmniejsza stwierdzono największą wartość zwięzłości. Niższa wartość zwięzłości na ściernisku w uprawie uproszczonej może być z kolei spowodowana jego wyższą wilgotnością. W przypadku ścierniska w siewie bezpośrednim wartość zwięzłości na głębokości 0,05 m była porównywalna z wartością na ściernisku w uprawie uproszczonej, pomimo odmiennych wartości wilgotności obu tych podłoży. Przypuszczać należy, że w tym przypadku wartość zwięzłości była funkcją zarówno wilgotności podłoża, jak i odmiennej agrotechniki.

Należy zaznaczyć, że różnice w wartościach zwięzłości mogą mieć wpływ na właściwości trakcyjne pojazdu eksploatowanego na danym podłożu. Wyższe wartości zwięzłości oznaczać mogą mniejszą tendencję do zagłębiania się koła pojazdu w podłoże. W taki wypadek przenoszenie siły trakcyjnej odbywać będzie się z przewagą siły tarcia. Z uwagi na mniejsze zagłębienie koła należy się też wówczas spodziewać mniejszych strat związanych z oporem przetaczania koła.

Maksymalne naprężenia ścinające

Na rysunku 6.3 dokonano zestawienia wartości maksymalnych naprężeń ścinających na podłożach badanych w etapie I, dla trzech głębokości pomiaru. Sposób przedstawienia tych wartości jest analogiczny jak w przypadku zwięzłości.



Rys. 6.3. Zestawienie maksymalnych naprężeń ścinających w badaniach etapu I

Z danych zobrazowanych na powyższym rysunku wynika, że najniższymi wartościami naprężeń ścinających odznaczało się ściernisko po uprawie tradycyjnej – tendencję taką zaobserwowano na trzech głębokościach wykonywania pomiaru. W przypadku ściernisk w uprawie tradycyjnej i uproszczonej stwierdzono wzrost wartości naprężeń wraz ze zwiększaniem głębokości pomiaru. Jedynie w przypadku ścierniska w siewie bezpośrednim nie stwierdzono istotnej różnicy pomiędzy wartościami naprężeń na głębokościach 0,10 i 0,15 m. Na tym też podłożu zaobserwowano najwyższą wartość naprężeń ścinających (142 kPa).

Wartości naprężeń ścinających tylko w niewielkim stopniu wydają się być powiązane z wartościami zwężłości i wilgotności. Jedynie na głębokości pomiaru 0,15 m zaobserwowano, że wyższe wartości naprężeń ścinających odpowiadały wyższym wartościom zwężłości. Analizując zależność naprężeń ścinających na głębokości 0,05 m od wilgotności stwierdzono, że wyższa wilgotność oznaczała wyższe wartości naprężeń.

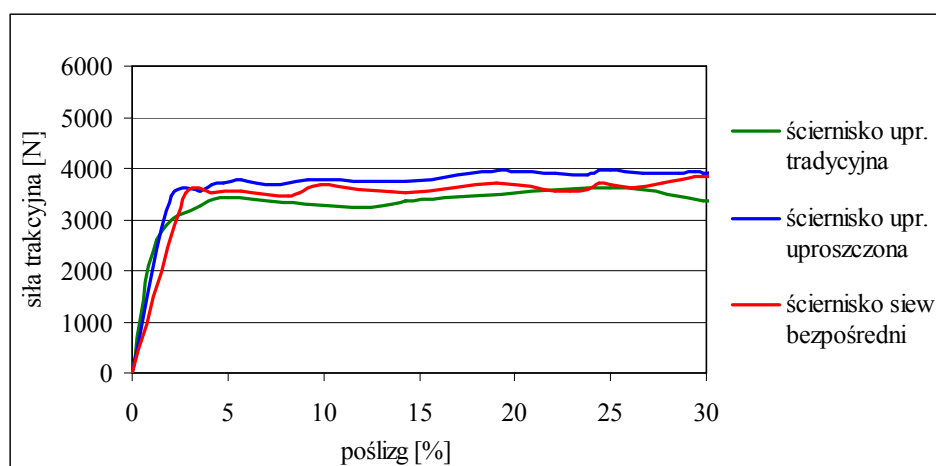
Odmienne wartości naprężeń ścinających mogą oznaczać różne warunki przenoszenia siły trakcyjnej. Przypuszczalnie na podłożach charakteryzujących się dużymi wartościami naprężeń ścinających koło pojazdu będzie miało mniejszą tendencję do toczenia się z poślizgiem (przy przenoszeniu siły trakcyjnej wystąpi przewaga siły tarcia).

6.1.2. Właściwości trakcyjne

Zgodnie z przyjętą koncepcją, jako cel badań trakcyjnych I etapu przyjęto wyznaczenie właściwości trakcyjnych opony 7.50-16 na wybranych podłożach. Badania te przeprowadzane były przy dwóch poziomach obciążenia pionowego koła (4620 i 5320 N). Analizowanymi właściwościami trakcyjnymi były: siła trakcyjna, opór przetaczania i sprawność trakcyjna. Wyznaczone zostały również wartości poślizgu koła wyposażonego w badaną oponę, co w efekcie umożliwiło ustalenie zależności pomiędzy poślizgiem koła a jego właściwościami trakcyjnymi.

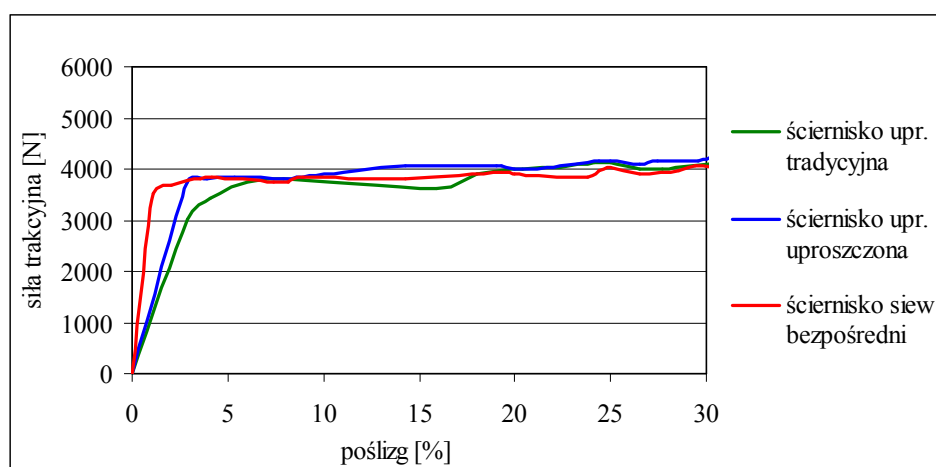
Siła trakcyjna

Jednym z głównych celów przeprowadzania badań trakcyjnych było wyznaczenie wartości sił trakcyjnych na różnych podłożach. W celu scharakteryzowania zmian siły przy różnych warunkach ruchu koła dokonano graficznego przedstawienia zależności siły trakcyjnej od poślizgu, osobno dla obu poziomów obciążenia pionowego koła. Na rysunku 6.4 przedstawiono taki przebieg przy niższym poziomie obciążenia pionowego (4620 N).



Rys. 6.4. Przebieg siły trakcyjnej w funkcji poślizgu przy obciążeniu pionowym 4620 N

Z przebiegu przedstawionego na rysunku 6.4 wynika, że charakter zmian siły trakcyjnej na wszystkich trzech badanych podłożach był bardzo zbliżony. W zakresie niskich poślizgów (0 – 3%) obserwowano narastanie wartości siły trakcyjnej, po przekroczeniu poślizgu 3% następuje stabilizacja zmian siły trakcyjnej. Różnice w wartościach sił trakcyjnych na poszczególnych podłożach są niewielkie - nieco mniejsze wartości tego parametru wystąpiły na ściernisku uprawianym systemem tradycyjnym.



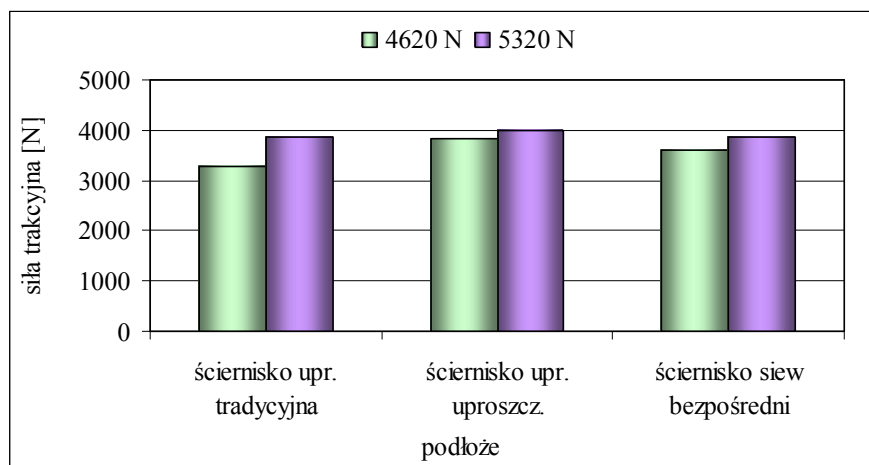
Rys. 6.5. Przebieg siły trakcyjnej w funkcji poślizgu przy obciążeniu pionowym 5320 N

Zwiększenie obciążenia do 5320 N (rys.6.5) skutkowało pewną zmianą przebiegów siły trakcyjnej w funkcji poślizgu. Największe różnice dotyczą wielkości przyrostów siły przy poślizgach z zakresu 0 – 5%; największy przyrost zaobserwować można na ściernisku w siewie bezpośrednim. Zbliżony przebieg zaobserwować można w przypadku ścierniska w uprawie uproszczonej, przy czym ustabilizowanie zmian siły trakcyjnej następuje tu przy nieco wyższym poślizgu niż w przypadku siewu bezpośredniego. Najbardziej odmienny przebieg dotyczy ścierniska w uprawie tradycyjnej – przy poślizgach z zakresu

0 – 4% obserwuje się znaczny przyrost siły trakcyjnej, po przekroczeniu poślizgu 4% przyrost jest nieco mniejszy.

Charakter przedstawionych przebiegów siły trakcyjnej jedynie w pewnym stopniu nawiązuje do wyników badań przedstawianych w literaturze. Podobnie jak we wcześniejszych pracach dotyczących właściwości trakcyjnych na podłożach rolniczych [Lyasko 2010b, Smerda, Cupera 2010, Elwaleed i in. 2006b, Zoz, Grisso 2003, Wulfsohn i in. 2009] obserwowano wzrost wartości siły trakcyjnej przy niskich poślizgach, a następnie jej stabilizację. Pewna odmienność dotyczyła wartości poślizgu, przy którym siła trakcyjna przestawała przyrastać. Na podstawie przedstawionych przebiegów stwierdzono, że znaczny przyrost siły trakcyjnej występował do poślizgu z zakresu 3 – 6%, natomiast w literaturze spotkać się można z sytuacjami, gdy siła trakcyjna stabilizuje się dopiero przy poślizgu 20% [Rosca i in. 2004a, Al-Janobi 1997, Grisso i in. 1992], a niekiedy nawet 30% [Wulfsohn i in. 1988, Gholkar i in. 2009].

W celu ustalenia wpływu obciążenia pionowego na zmiany wartości siły trakcyjnej dokonano zestawienia średnich wartości tego parametru obliczonych przy poślizgu z zakresu 0 – 30%. Zestawienie takie przedstawiono na rysunku 6.6.



Rys. 6.6. Średnie wartości siły trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań przy poślizgu 0 – 30%

Analizując diagram przedstawiony na powyższym rysunku można stwierdzić, że zwiększanie obciążenia pionowego skutkowało wzrostem siły trakcyjnej na wszystkich analizowanych podłożach. Największy przyrost (o 17%) stwierdzono na ściernisku w uprawie tradycyjnej, zaś najniższy (o 5%) – na ściernisku w uprawie uproszczonej. Przy wyższym poziomie obciążenia pionowego praktycznie nie zaobserwowano różnic w wartościach siły trakcyjnej pomiędzy poszczególnymi systemami uprawowymi.

Natomiast przy niższym poziomie obciążenia niższa wartość siły trakcyjnej dotyczyła ścierniska w uprawie tradycyjnej. Przyporządkowując wartości siły trakcyjnej na poszczególnych podłożach do odpowiadających im wartości zwężłości i naprężeń ścinających stwierdzono, że przy niższym poziomie obciążenia pionowego wyższe wartości siły trakcyjnej dotyczyły podłoża o większych wartościach parametrów wytrzymałościowych. Zapewne ma to związek z mniejszą skłonnością tych podłoży do deformacji i mniejszymi stratami związanymi z poślizgiem oraz oporem przetaczania.

Uzyskane wyniki są zgodne z wynikami innych badań; w większości prac dotyczących układu koło – podłoże wykazywano bowiem, że zwiększenie obciążenia pionowego skutkowało wzrostem siły trakcyjnej [Burt i in. 1983, Lyne i in. 1983, Wulfsohn i Upadhyahya 1988, Xu i in. 1991, Jun i in. 2004, Narang i in. 2006]. Niewielkie różnice w wartościach sił przy różnych technologiach uprawy są z kolei zgodne z wynikami przedstawionymi w pracy Jenane i Bashford [1995].

W celu określenia wpływu przyjętych czynników na wartości siły trakcyjnej przeprowadzono analizę statystyczną. Jako czynniki przyjęto rodzaj podłoża i obciążenie pionowe. Z uwagi na to, że wartości siły trakcyjnej odczytywane były dla poślizgów 5, 10, 15, 20, 25 i 30% parametr ten przyjęty został jako trzeci czynnik. W pierwszej kolejności dokonano oceny zgodności normalności rozkładu siły trakcyjnej za pomocą testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla siły trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Podłoże	śc. uprawa tradycyjna	0,874805	0,000749
	śc. uprawa uproszczona	0,917538	0,010666
	śc. siew bezpośredni	0,890863	0,001938
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,945991	0,016698
	5320 N	0,936240	0,006517
Poślizg koła	5%	0,904929	0,070065
	10%	0,921800	0,139118
	15%	0,917726	0,117823
	20%	0,918004	0,117823
	25%	0,902394	0,043258
	30%	0,910874	0,089142

Hipoteza zerowa zakładała, że rozkład wartości siły trakcyjnej w poszczególnych populacjach jest zgodny z rozkładem normalnym. Przyjęcie hipotezy zerowej było możliwe jedynie wówczas, gdy wartość prawdopodobieństwa była większa niż założony poziom istotności $\alpha = 0,05$. Według danych przedstawionych w tabeli zgodność z rozkładem normalnym wystąpiła w przypadku pięciu populacji w obrębie trzeciego czynnika – poślizgu koła.

Z racji tego, że nie został spełniony pierwszy warunek stosowalności wieloczynnikowej analizy wariancji ocenę wpływu czynników na wartości siły trakcyjnej przeprowadzono z wykorzystaniem nieparametrycznego testu Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki tego testu przedstawiono w tabeli 6.2.

Tabela 6.2. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla siły trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań

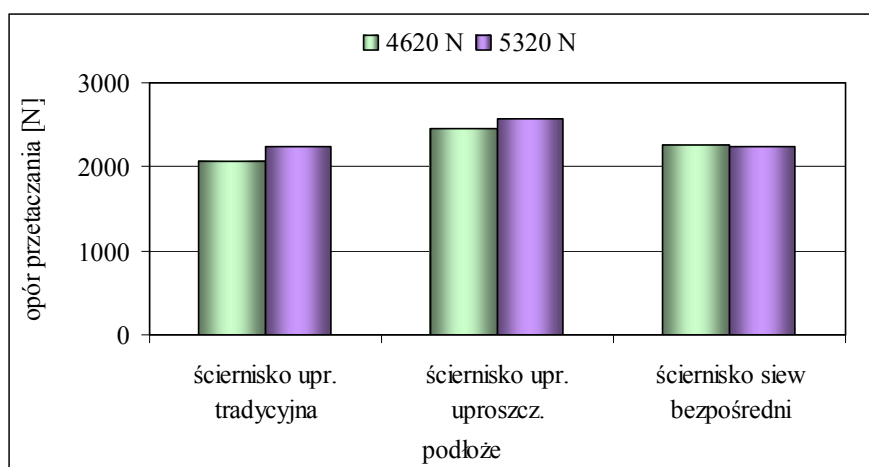
Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rodzaj podłoża	13,17116	0,0014
Obciążenie pionowe koła	6,98662	0,0822
Poślizg koła	11,25403	0,0466

W teście Kruskala-Wallisa hipoteza zerowa zakładała, że nie ma istotnego wpływu czynnika na wartości analizowanej zmiennej. Przyjęcie tej hipotezy zachodzi, gdy wartość p jest wyższa od wartości α . Na podstawie uzyskanych wyników (tab. 6.2) wykazano, że rodzaj podłoża miał istotny wpływ na wartości siły trakcyjnej; nie zaobserwowano istotnego wpływu obciążenia pionowego. Ponadto stwierdzono, że przy różnych wartościach poślizgu wartości siły trakcyjnej różniły się istotnie. Przeprowadzony test porównań wielokrotnych wykazał, że istotne różnice w wartościach siły trakcyjnej występowały na ściernisku w uprawie tradycyjnej i uproszczonej, nie stwierdzono natomiast istotnych różnic pomiędzy wartościami siły trakcyjnej w uprawie tradycyjnej i siewie bezpośrednim oraz przy uprawie uproszczonej i siewie bezpośrednim. Ponadto stwierdzono, iż największe różnice wystąpiły między zakresami poślizgów 5 – 15% i 20 – 30%.

Opór przetaczania

Drugą właściwością trakcyjną analizowaną w I etapie badań był opór przetaczania. Na opór ten składał się zarówno opór przetaczania badanego koła, jak i opór kół ciągnika rolniczego, z którym współpracowało stanowisko pomiarowe. Średnie wartości oporu

przetaczania obliczone dla poślizgu w zakresie 0 – 30%, przy obu poziomach obciążenia pionowego przedstawiono na rysunku 6.7.



Rys. 6.7. Średnie wartości oporu przetaczania opony 7.5-16 w I etapie badań przy poślizgu 0 – 30%

Analiza wykresu przedstawionego na powyższym rysunku pozwala stwierdzić, że wyższe wartości oporu przetaczania wystąpiły na ściernisku w uprawie uproszczonej. Opór przetaczania jest zależny zarówno od odkształcalności ogumienia jak i podłoża [Komandi 1999, Rebat, Loghavi 2006], zatem jeśli ciśnienie w ogumieniu i obciążenie koła się nie zmienia opór może być jedynie funkcją odkształcalności podłoża. Różnice w wartościach oporu przetaczania na badanych podłożach mogą wynikać z odmiennych ich zwięzłości. Analizując ten parametr (rysunek 6.2) zaobserwować można, że w strefie bezpośredniego oddziaływania koła (głębokość do 0,05 m) najniższa zwięzłość występowała w uproszczonej technologii uprawy. Na tym też podłożu stwierdzono najwyższy opór przetaczania – przypuszczalnie może mieć to związek ze zwiększoną energią zużywaną na odkształcanie tego podłoża. Dostrzeżono ponadto zależność pomiędzy wartością oporu przetaczania a wartościami naprężeń ścinających; przy niskich wartościach naprężeń obserwowano wyższe wartości oporu przetaczania. Przypuszczalnie jest to powodowane większą skłonnością koła do toczenia z poślizgiem (mniejsza wytrzymałość podłoża) a w efekcie większą tendencją do zagłębiania się w podłoże.

Przedstawione wartości oporów są wyższe niż przedstawiane w literaturze wartości oporów toczenia opon o zbliżonych średnicach [Błaszkiwicz, Szafarz 2006, 2009, Kolator 2006]. Taka sytuacja spowodowana jest faktem, że wyznaczony opór przetaczania uwzględniał nie tylko opór toczenia samej badanej opony, lecz również opór przetaczania ciągnika, przy czym masa ciągnika była wyższa niż obciążenie pionowe badanego koła.

Różnice w wartościach oporu przetaczania wynikające z różnych systemów uprawowych były analogiczne jak w innych pracach, gdzie stwierdzano, że w siewie bezpośrednim opór przetaczania jest najmniejszy [Botta i in. 2012].

W odniesieniu do oporu przetaczania przeprowadzono analizę statystyczną w sposób analogiczny jak w przypadku siły trakcyjnej. W tabeli 6.3. przedstawiono wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.

Tabela 6.3. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla oporu przetaczania opony 7.5-16 w I etapie badań

Czynnik	Poziom czynnik	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Podłoże	śc. uprawa tradycyjna	0,950392	0,107588
	śc. uprawa uproszczona	0,947798	0,089145
	śc. siew bezpośredni	0,904894	0,004656
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,950368	0,025814
	5320 N	0,957807	0,054982
Poślizg koła	5%	0,879173	0,025281
	10%	0,945199	0,354721
	15%	0,911752	0,092381
	20%	0,959102	0,584390
	25%	0,935373	0,241120
	30%	0,923605	0,149742

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w powyższej tabeli nie wszystkie populacje miały rozkład zgodny z normalnym, zatem do oceny wpływu czynników na wartości oporu przetaczania zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki tego testu przedstawiono w tabeli 6.4.

Tabela 6.4. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla oporu przetaczania opony 7.5-16 w I etapie badań

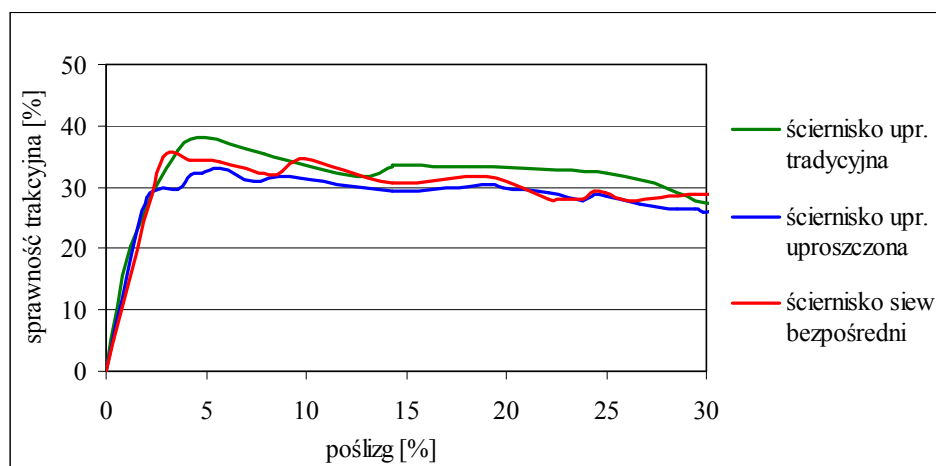
Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rodzaj podłoża	17,59006	0,0002
Obciążenie pionowe koła	2,30337	0,1291
Poślizg koła	61,47806	0,0005

Na podstawie wyników przedstawionych w powyższej tabeli stwierdzono, że rodzaj podłoża miał istotny wpływ na wartości oporu przetaczania badanej opony. Stwierdzono

również, że przy różnych poślizgach koła wartości oporu przetaczania były statystycznie różne. Test porównań wielokrotnych wykazał, że w przypadku porównania ścierniska w siewie bezpośrednim ze ścierniskiem w uprawie tradycyjnej nie wystąpiły istotne różnice w wartościach oporu przetaczania. Podobnie jak w przypadku siły trakcyjnej istotnie różne wartości oporu przetaczania wystąpiły przy zakresach poślizgów 5 – 15% i 20 – 30%. Nie stwierdzono wpływu obciążenia koła na wartość oporu przetaczania.

Sprawność trakcyjna

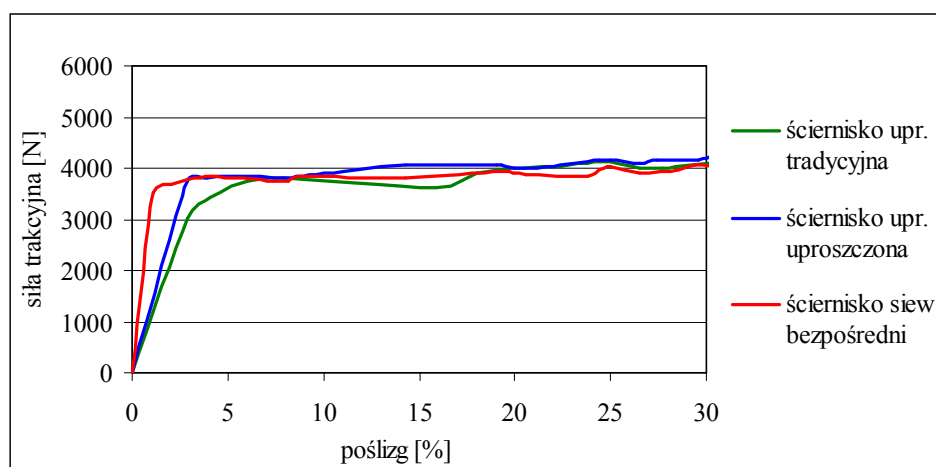
Zgodnie z przyjętą koncepcją badań w I etapie oprócz wartości siły trakcyjnej i oporu przetaczania wyznaczono również sprawność trakcyjną. Podobnie jak w przypadku siły trakcyjnej parametr ten przedstawiono w funkcji poślizgu. Na rysunku 6.8 przedstawiono przebieg sprawności przy mniejszym poziomie obciążenia pionowego koła (4620 N).



Rys. 6.8. Przebieg sprawności trakcyjnej w funkcji poślizgu przy obciążeniu pionowym 4620 N

Analiza przebiegu przedstawionego na rysunku 6.8 pozwala stwierdzić, że charakter zmian sprawności trakcyjnej w funkcji poślizgu na różnych podłożach był zbliżony. We wszystkich trzech przypadkach zaobserwowano narastanie sprawności przy niskich poślizgach. Najniższą wartość sprawności trakcyjnej zaobserwowano w przypadku ścierniska w uprawie uproszczonej, zaś najwyższą w uprawie tradycyjnej. Maksymalne wartości sprawności występowały przy poślizgach w zakresie 3 – 6%; najniższa wartość poślizgu przy sprawności maksymalnej wystąpiła w przypadku ścierniska w siewie bezpośrednim i wniosła 3,5%. Na pozostałych dwóch ścierniskach wartości poślizgu przy sprawności maksymalnej wynosiły ok. 5%.

Na kolejnym rysunku przedstawiono przebiegi sprawności trakcyjnej dla wyższego poziomu obciążenia pionowego koła (5320 N).



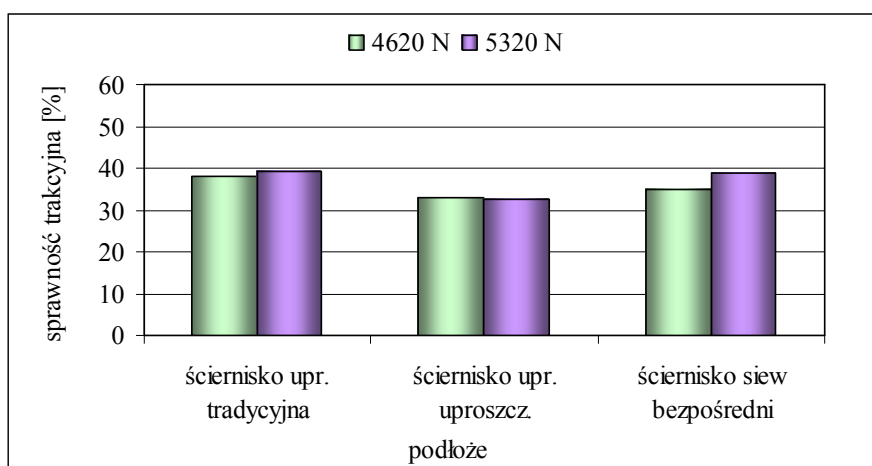
Rys. 6.9. Przebieg sprawności trakcyjnej w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N

Przy wyższym poziomie obciążenia pionowego koła (rysunek 6.9) charakter zmian sprawności trakcyjnej jest nieco inny niż przy mniejszym obciążeniu. W przypadku ścierniska w siewie bezpośrednim wzrost sprawności trakcyjnej jest największy i występuje przy niskich wartościach poślizgu (0 – 2%). Maksymalną wartość sprawności trakcyjnej zaobserwowano przy poślizgu równym 5%. Na ściernisku w systemie uproszczonym wzrost sprawności trakcyjnej następuje przy poślizgach z zakresu 0 – 4%, po czym następuje pewna stabilizacja zmian wartości sprawności. Dopiero po przekroczeniu poślizgu równego 15% wartości sprawności zaczynają spadać. Na trzecim z badanych podłoży maksimum sprawności osiągnięto przy poślizgu równym 8%, po przekroczeniu tego poślizgu następował spadek wartości sprawności. Ponowny, nieznaczny wzrost tego parametru zaobserwowano po przekroczeniu poślizgu równego 16%. Zauważyć można ponadto, iż nieco niższe wartości sprawności dotyczyły ścierniska w uprawie tradycyjnej.

Opisywane powyżej charakterystyki zmian sprawności trakcyjnej są w pewnym stopniu zgodne z wynikami badań przedstawianymi w literaturze. W dużej części prac przebiegi te posiadają zbliżony charakter zmian: przy niskich wartościach poślizgu następuje zazwyczaj znaczny przyrost wartości sprawności, po uzyskaniu wartości maksymalnej obserwuje się powolny spadek [Rosca i in. 2004b, Wolf i in. 1996, Zoz i in. 2003, Zoz i in. 1999, Grisso i in. 1992, Xu i in. 1991]. Pewne różnice dotyczą jednak poślizgu, przy którym występuje sprawność maksymalna. W uzyskanych wynikach badań sprawność

maksymalna występuje przy poślizgach z zakresu 3 – 8%, tymczasem w literaturze spotkać się można z sytuacjami kiedy poślizg ten przekracza 15, a nawet 20% [Musonda i in. 1989, Jenane, Bashford 1995, Domier, Willans 1978, Senatore, Sandu 2011b, Wulfsohn i in. 1988, Simikić i in. 2012].

Podobnie jak w przypadku siły trakcyjnej dokonano oceny wpływu zwiększenia obciążenia pionowego na wartości sprawności. Na rysunku 6.10 przedstawiono maksymalne wartości tego parametru na trzech podłożach, przy obu poziomach obciążenia pionowego.



Rys. 6.10. Maksymalne wartości sprawności trakcyjnych opony 7.5-16 przy obu poziomach obciążenia pionowego koła

Wzrost obciążenia pionowego koła skutkował zmianą maksymalnej wartości sprawności trakcyjnej jedynie w przypadku ścierniska w siewie bezpośrednim. Wartość sprawności wzrosła w tym przypadku o 4 punkty procentowe (11%). W pozostałych dwóch przypadkach zmiany wartości sprawności trakcyjnej nie przekraczały 2%. Najniższe wartości sprawności trakcyjnej, przy obu poziomach obciążenia pionowego, dotyczyły ścierniska w technologii uproszczonej. Najwyższą wartość sprawności przy niższym poziomie obciążenia zaobserwowano na ściernisku w tradycyjnym systemie uprawowym, przy wyższym poziomie obciążenia pionowego najwyższą sprawność osiągnięta została na ściernisku w siewie bezpośrednim.

Analiza zależności sprawności trakcyjnej od parametrów podłoża wykazała, że wyższe wartości sprawności dotyczyły ścierniska w uprawie tradycyjnej czyli podłoża, na którym wartość zwężłości na głębokości 0,05 m była najwyższa. Przypuszczalnie może mieć to związek z mniejszą skłonnością wierzchniej warstwy podłoża do deformacji i z potwierdzoną wcześniej mniejszą wartością oporu przetaczania.

Przedstawione wartości maksymalne są odmienne niż w większości wyników przedstawianych w literaturze, z dostępnych prac wynika bowiem, że na ścierniskach maksymalna wartość sprawności wynosi 50 – 70% [Jenane, Bashford 1995, Bashford i in. 1993, Bashford i in. 1999, Simikić i in. 2012]. Zaznaczyć jednak należy, że wyniki takie dotyczyły opon o średnicach zewnętrznych znacznie większych niż opona przyjęta do badań (średnice powyżej 1500 mm czyli ponad dwukrotnie większe niż średnica opony 7.5-16). Ponadto stosowane były również wyższe wartości obciążeń pionowych (powyżej 15000 N).

Dla sprawności trakcyjnej przeprowadzono analizę statystyczną analogicznie jak dla siły trakcyjnej i oporu przetaczania. W pierwszej kolejności sprawdzono zgodność rozkładu badanej cechy z rozkładem normalnym za pomocą testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki tego testu przedstawiono w tabeli 6.5.

Tabela 6.5. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań

Czynnik	Poziom czynnik	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Podłoże	śc. uprawa tradycyjna	0,942580	0,061145
	śc. uprawa uproszczona	0,987078	0,942185
	śc. siew bezpośredni	0,979054	0,713426
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,966248	0,131317
	5320 N	0,981085	0,547896
Poślizg koła	5%	0,970820	0,812971
	10%	0,956484	0,535425
	15%	0,985978	0,990758
	20%	0,938617	0,274378
	25%	0,948050	0,395252
	30%	0,950137	0,427168

Z przedstawionej powyżej tabeli wynika, że we wszystkich populacjach rozkład sprawności trakcyjnej był zgodny z rozkładem normalnym. Dokonano zatem oceny jednorodności wariancji za pomocą testu Levene'a na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Tabela 6.6. Wyniki testu jednorodności wariancji (Levene'a) dla sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań

Zmienna	Wartość testu F	Prawdopodobieństwo p
Sprawność trakcyjna	3,158585	0,000019

Przedstawiona w powyższej tabeli wartość prawdopodobieństwa p jest mniejsza niż założony poziom istotności α , zatem są podstawy do odrzucenia hipotezy o jednorodności wariancji – nie został spełniony drugi warunek stosowalności wieloczynnikowej analizy wariancji. Ocenę wpływu czynników na wartości sprawności przeprowadzono z wykorzystaniem testu Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 6.7.

Tabela 6.7. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rodzaj podłoża	16,52886	0,0003
Obciążenie pionowe koła	7,05491	0,1055
Poślizg koła	24,76652	0,0002

Analiza wyników przedstawionych w powyższych tabelach pozwala stwierdzić, że jedynie obciążenie pionowe okazało się czynnikiem nieistotnym. W teście porównań wielokrotnych wykazano, że istotne różnice w wartościach sprawności wystąpiły między ścierniskiem w uprawie tradycyjnej i ścierniskiem w uprawie uproszczonej. Wykazano również różnice w wartościach sprawności osiąganych przy skrajnych poślizgach (istotne różnice przy poślizgach 5 i 25, 30%).

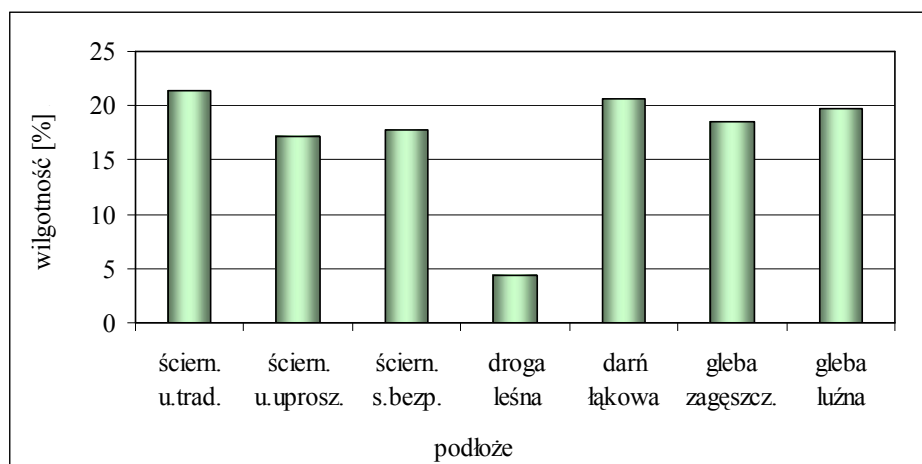
6.2. Badania etapu II (2011, 2012)

6.2.1. Właściwości podłoża

Analogicznie jak w przypadku badań etapu pierwszego w kolejnym etapie badań określono właściwości badanych podłoży. Zgodnie z koncepcją, oprócz opony 7.5-16 badanej w etapie I badano dodatkowo oponę 8.3-20. Ponadto do badań wyznaczono dodatkowe podłoża: darń łąkowy, leśną drogę gruntową, glebę zagęszczoną oraz glebę luźną. Opona 8.3-20 badana była na wszystkich przyjętych podłożach, natomiast oponę 7.50-16 badano na ścierniskach, glebie zagęszczonej i glebie luźnej.

Wilgotność

Podobnie jak w przypadku badań I etapu wilgotność aktualna określana była na podstawie pięciu pomiarów, których wyniki posłużyły do obliczenia wartości średnich. Wartości te przedstawiono na rysunku 6.11.



Rys. 6.11. Zestawienie wilgotności podłoży w badaniach etapu II

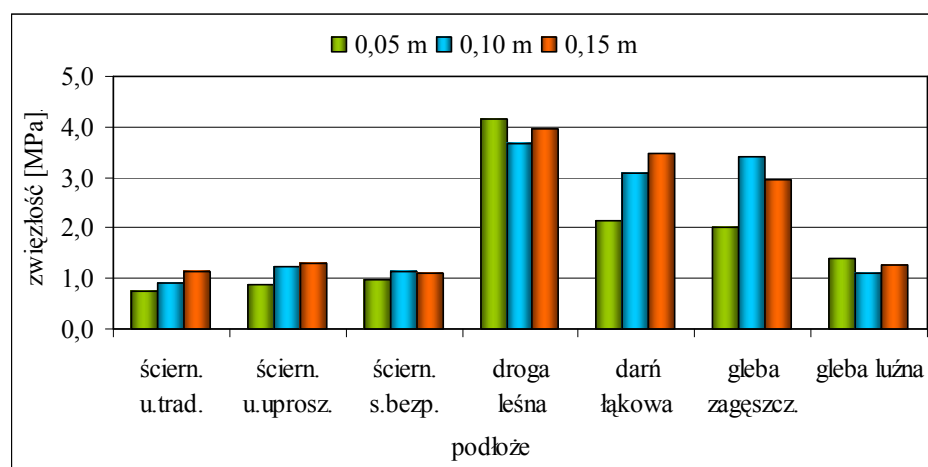
Analizując powyższy wykres zaobserwować można, że najniższą wilgotnością (4%) cechowała się gruntowa droga leśna – mogło być to spowodowane brakiem opadów atmosferycznych; zgodnie z danymi meteorologicznymi (przedstawionymi w rozdziale *Przedmiot i warunki badań*) w okresie poprzedzającym badania suma opadów była mniejsza niż średnia z wielolecia, a podłoże drogi stanowił piasek luźny i słabo gliniasty, czyli utwory o znikomej możliwości retencjonowania wód opadowych. W okresie poprzedzającym badania na ścierniskach (lipiec 2011) suma opadów była prawie dwukrotnie wyższa niż średnia z wielolecia. Ta sytuacja nie znalazła jednak potwierdzenia w wartościach wilgotności; zawierały one się w zakresie 17 – 21% (w poprzednim roku wartości wilgotności były na podobnym poziomie, natomiast w okresie przed badaniami nie stwierdzono wówczas nadmiernych opadów). Podobna tendencja wystąpiła na darni łąkowej. W przypadku gleb wilgotności zawierały się w zakresie 18,5 – 20% (w okresie poprzedzającym badania suma opadów była znacznie niższa niż średnia z wielolecia).

Przypuszczalnie duże różnice w wartościach wilgotności na badanych podłożach mogły mieć wpływ na parametry wytrzymałościowe tych podłoży, a w konsekwencji na właściwości trakcyjne pojazdu eksploatowanego na tych podłożach. Spodziewać się należy, że niskiej wilgotności podłoża może towarzyszyć wzrost jego wytrzymałości efektem czego może być mniejsza tendencja do zagłębiania się elementów układu jezdnych pojazdów.

Zwięzłość

Drugim parametrem charakteryzującym stan podłoży w II etapie badań była zwięzłość. Podobnie jak w I etapie badań pomiar na każdym z podłoży i na każdej

głębokości dokonywany był w pięciu powtórzeniach, z których obliczano średnią. Na rysunku 6.12 zestawiono wartości zwięzłości wszystkich badanych podłoży.



Rys. 6.12. Zestawienie zwięzłości podłoży w badaniach etapu II

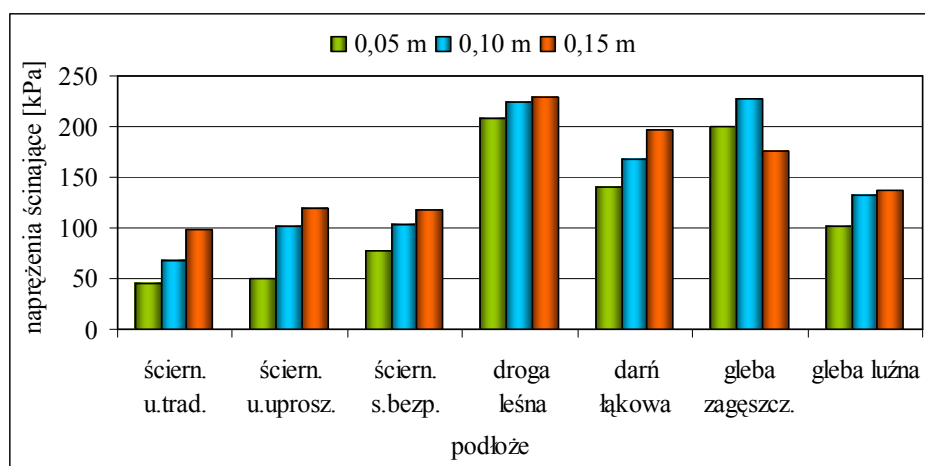
Z przedstawionego powyżej rysunku wynika, że najbardziej zwięzłym podłożem była gruntowa droga leśna – maksymalne wartości zwięzłości przekraczały w tym przypadku 4 MPa. Wysoka wartość zwięzłości mogła być w tym przypadku powodowana nie tylko właściwościami mechanicznymi samego podłoża, ale również jego niską wilgotnością (rys. 6.11). Wartości zwięzłości na darni wyniosły 2,1; 3,1 i 3,5 MPa kolejno dla głębokości 0,05; 0,10 i 0,15 m, zaobserwowano zatem przyrosty tego parametru wraz ze zwiększaniem głębokości pomiaru. W przypadku ściernisk maksymalne wartości zwięzłości również były zależne od głębokości przeprowadzania pomiaru – na najniższej głębokości (0,05 m) wyższe wartości zwięzłości odpowiadały ściernisku w siewie bezpośrednim. Natomiast przy dwóch pozostałych głębokościach pomiaru wyższa zwięzłość wystąpiła w uprawie uproszczonej. W siewie bezpośrednim wystąpiło najmniejsze zróżnicowanie wartości zwięzłości przy różnych głębokościach pomiaru – przypuszczalnie mogło to mieć związek z brakiem zabiegów agrotechnicznych spulchniających i odwracających glebę. Na glebie luźnej najwyższą zwięzłość (1,4 MPa) zaobserwowano przy najmniejszej głębokości pomiaru, zaś najniższą na głębokości 0,10 m. Na glebie zagęszczonej największa zwięzłość wystąpiła na głębokości 0,10 m.

Porównując wartości zwięzłości i wilgotności zaobserwować można, że na drodze leśnej, na której wartość wilgotności była najmniejsza wystąpiły najwyższe wartości zwięzłości. Przypuszczać należy, że niska zawartość wody w tym podłożu mogła przyczynić się do wzrostu jego wytrzymałości. Podobna sytuacja dotyczyła darni łąkowej.

Spodziewać należy się, że większe niż w I etapie badań różnice wartości zwięzłości spowodują większą odmienność właściwości trakcyjnych opon eksploatowanych na tych podłożach. Przypuszczalnie wysoka wartość zwięzłości (np. na drodze leśnej czy darni łąkowej) skutkować może zmniejszonym oporem przetaczania i w efekcie mniejszymi stratami energii przy przenoszeniu siły napędowej.

Maksymalne naprężenia ścinające

Wartości naprężeń ścinających na badanych podłożach wyznaczone były analogicznie jak w I etapie badań (po 5 pomiarów, z których obliczono średnie arytmetyczne). Na rysunku 6.13 przedstawiono średnie wartości tego parametru na wszystkich podłożach, na głębokościach 0,05; 0,10 i 0,15 m.



Rys. 6.13. Zestawienie maksymalnych naprężeń ścinających w badaniach etapu II

Analizując powyższy rysunek stwierdzić można, że najwyższe wartości analizowanego parametru występowały na drodze leśnej i glebie zagęszczonej, zaś najniższe – na ścierniskach. Proporcje pomiędzy wartościami naprężeń ścinających wydają się być zbliżone do proporcji dotyczących wartości zwięzłości. Na wszystkich podłożach poza glebą zagęszczoną obserwowano wzrost wartości analizowanego parametru wraz ze zwiększaniem głębokości pomiaru. W przypadku ściernisk zaobserwowano pewną odmienność w siewie bezpośrednim. Na ściernisku w tym systemie uprawowym wartość naprężeń przy najmniejszej głębokości pomiaru była wyższa niż w przypadku dwóch pozostałych ściernisk.

Podobnie jak w przypadku zwięzłości wartości naprężeń ścinających mogą determinować właściwości trakcyjne pojazdu eksploatowanego na badanych podłożach. Wyższe wartości naprężeń będą w tym przypadku oznaczać większą wytrzymałość

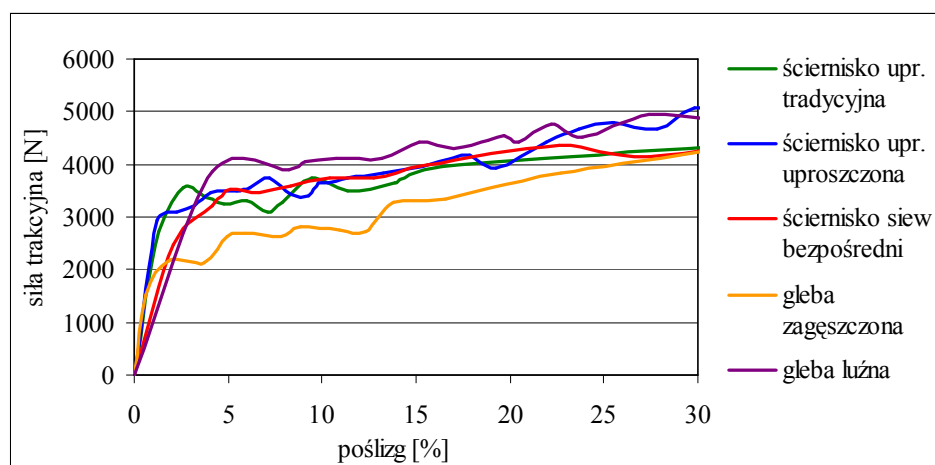
na naprężenia styczne pochodzące od kół pojazdu. Różnice w wartościach naprężeń na różnych podłożach skutkować mogą odmiennymi warunkami przenoszenia siły trakcyjnej (z przewagą ścinania na podłożach o małej wartości naprężeń, bądź z przewagą tarcia na podłożach o dużej wytrzymałości na naprężenia ścinające).

6.2.2. Właściwości trakcyjne

Zgodnie z przyjętą koncepcją realizacji celów pracy, w badaniach drugiego etapu wyznaczono właściwości trakcyjne dwóch opon przy trzech poziomach obciążenia pionowego. Właściwości trakcyjne były określane za pomocą wartości siły trakcyjnej, oporu przetaczania i sprawności trakcyjnej, ponadto przeprowadzono bilans mocy kół wyposażonych w obie badane opony. Bilans ten obejmował wyznaczenie oraz porównanie wartości mocy dostarczanej do koła (całkowitej), mocy uciągu, mocy traconej na opór przetaczania i mocy traconej na poślizg. Na wybranych podłożach została dokonana ocena wpływu stosowania łańcucha antypoślizgowego na właściwości trakcyjnej jednej z badanych opon.

Siła trakcyjna

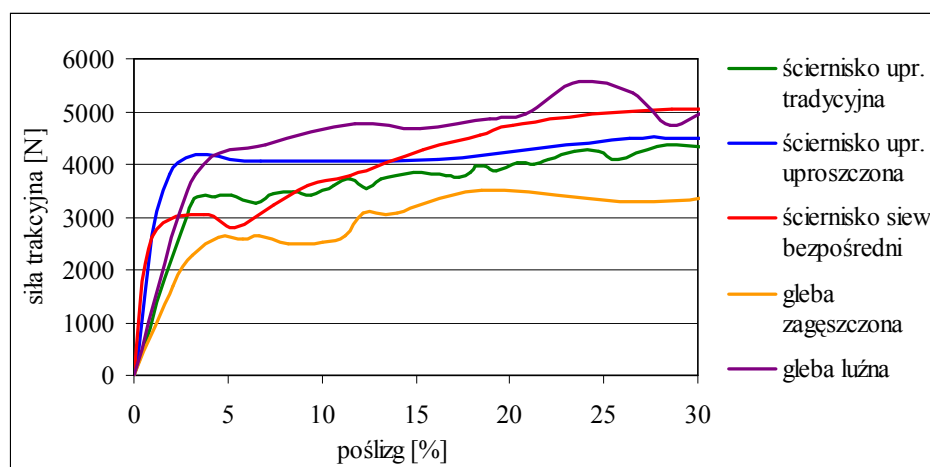
W wyniku przeprowadzonych pomiarów obliczono wartości siły trakcyjnej oraz poślizgu badanych opon. Umożliwiło to sporządzenie graficznych zależności siły trakcyjnej od poślizgu. Na rysunku 6.14 przedstawiono taką zależność dla opony 7.50-16 przy najmniejszym poziomie obciążenia pionowego (4620 N). Zgodnie z przyjętą koncepcją właściwości trakcyjne opony 7.5-16 wyznaczone były na pięciu rodzajach podłożu (ścierniska w trzech systemach uprawowych, gleba zagęszczona oraz gleba luźna).



Rys. 6.14. Przebieg siły trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N

Analiza przedstawionego powyżej wykresu pozwala stwierdzić, że na poszczególnych podłożach wystąpiły różne zmiany wartości siły trakcyjnej w funkcji poślizgu. We wszystkich przypadkach cechą wspólną przebiegów był wzrost siły przy niskich wartościach poślizgu, a następnie stabilizacja z niewielkimi zmianami. Dla poszczególnych podłoży zaobserwowano różne wartości poślizgu, przy którym siła przestawała przyrastać. Na ścierniskach w uprawie tradycyjnej i uproszczonej charakter zmian siły trakcyjnej w funkcji poślizgu był zbliżony; w obu przypadkach największy przyrost wartości siły występował przy poślizgach z zakresu 0 – 3%. Nieco mniejsze wartości przyrostu zaobserwowano na ściernisku w siewie bezpośrednim i na glebie luźnej – stabilizacja wartości siły trakcyjnej następowała przy poślizgu około 5%. Najbardziej odmienny przebieg dotyczył gleby zagęszczonej; w przypadku tego podłoża zaobserwowano najniższe wartości siły trakcyjnej, największy przyrost wartości tego parametru występował przy poślizgach z zakresu 0 – 2%. Jednak po przekroczeniu tego poślizgu nie obserwowano stabilizacji wartości siły, lecz jej dalszy powolny przyrost.

Na rysunku 6.15 przedstawione zostały przebiegi siły trakcyjnej opony 7.50-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu pionowym 5320 N.

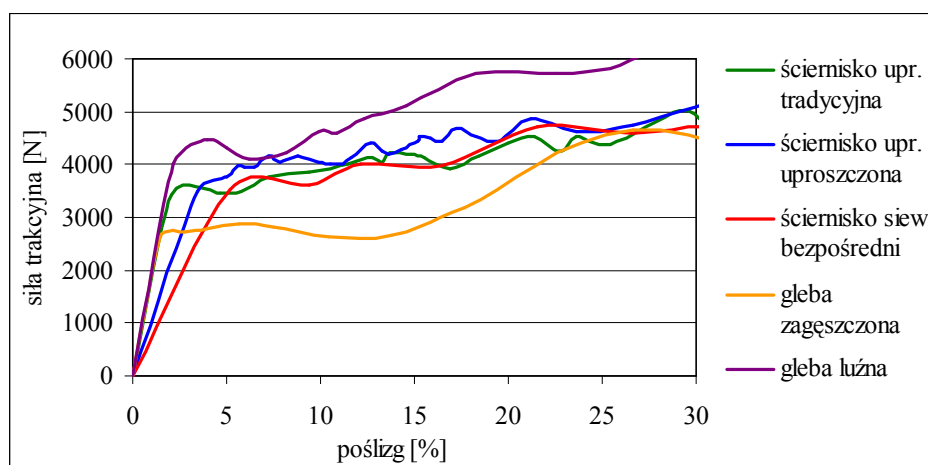


Rys. 6.15. Przebieg siły trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N

Z powyższego zestawienia wynika, że największym przyrostem wartości siły trakcyjnej charakteryzowały się ścierniska w uprawie uproszczonej oraz w siewie bezpośrednim. Podobnie jak przy mniejszym poziomie obciążenia, najniższymi wartościami siły trakcyjnej charakteryzowała się gleba zagęszczona, na podłożu tym początkowy przyrost siły odpowiadał poślizgom z zakresu 0 – 5%, następnie zaobserwować można stabilizację wartości analizowanego parametru (ponowny wzrost

następuje po przekroczeniu poślizgu równego 12%). W przypadku gleby luźnej początkowy wzrost wartości siły trakcyjnej odpowiada poślizgom z zakresu 0 – 4%, ponadto zaobserwować można, że wartości siły trakcyjnej na tym podłożu są wyższe niż na pozostałych podłożach.

Przebiegi siły trakcyjnej dla opony 7.5-16 przy najwyższym poziomie obciążenia (6110 N) przedstawiono na rysunku 6.16. Analizując te przebiegi zaobserwować można pewne różnice w porównaniu do przebiegów przy dwóch poprzednich poziomach obciążenia. Zauważyć można, że w przypadku ściernisk różnice w wartościach siły trakcyjnej występowały jedynie przy poślizgach 0 – 5%, powyżej tego zakresu wartości siły były porównywalne. W przeważającej części rozpatrywanego zakresu najwyższymi wartościami analizowanego parametru charakteryzowała się gleba luźna. Przebieg siły na glebie zagęszczonej odznaczał się przyrostem przy poślizgach 0 – 2%, a następnie stabilizacją i niewielkim spadkiem przy poślizgu z zakresu 2 – 14%. Przy wyższych wartościach poślizgu obserwowano natomiast przyrost wartości siły trakcyjnej.

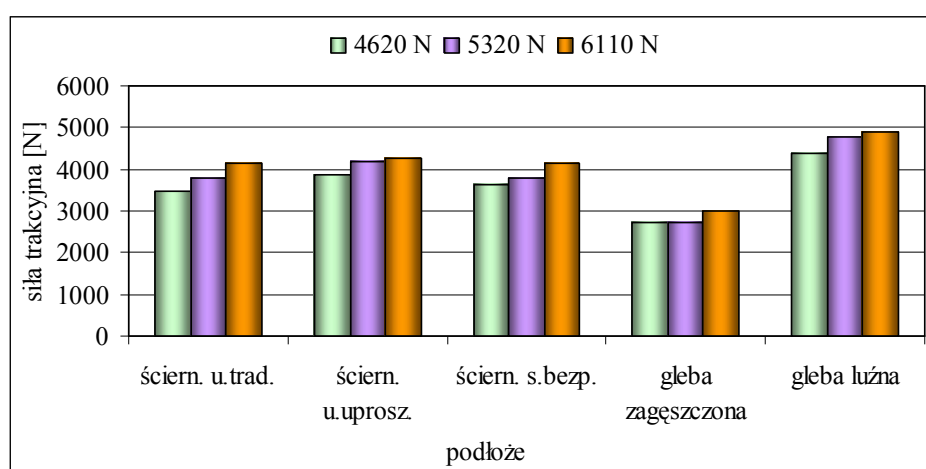


Rys. 6.16. Przebieg siły trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N

Przebiegi uzyskane na podstawie badań są nieco odmienne od przebiegów przedstawianych w literaturze. W odniesieniu do ściernisk zaobserwować można podobną tendencję jak w badaniach I etapu; przy niskich poślizgach obserwuje się znaczny wzrost wartości siły trakcyjnej, następnie jej stabilizację. Jednakże w odróżnieniu od wyników przedstawianych w literaturze [Jenane, Bashford 1995, Wulfsohn i in. 2009, Bashford i in. 1999, Diserens, Battiato 2012] stabilizacja wartości siły następuje przy niższych wartościach poślizgu. Podobną tendencję zaobserwowano w przypadku dwóch pozostałych podłoży; zarówno na glebie zagęszczonej, jak i na luźnej największe przyrosty siły

występowały przy poślizgach nieprzekraczających 10%. W pracach opisujących wyniki badań na takich podłożach spotkać się można z sytuacjami, kiedy przebieg siły trakcyjnej ma bardziej łagodny charakter, niejednokrotnie nie można wskazać konkretnej wartości poślizgu, przy której następuje stabilizacja siły trakcyjnej [Wulfsohn i in. 1988, Lyasko 2010b, Elwaleed i in. 2006a, Al-Janobi 1997, Gholkar i in. 2009].

W celu określenia różnic w wartościach siły trakcyjnej przy różnych poziomach obciążenia pionowego dokonano zestawienia średnich wartości siły obliczanych dla poślizgu z zakresu 0 – 30%. Zestawienie takie w odniesieniu do wszystkich analizowanych podłoży, na których badana była opona 7.5-16 zaprezentowano na rysunku 6.17.



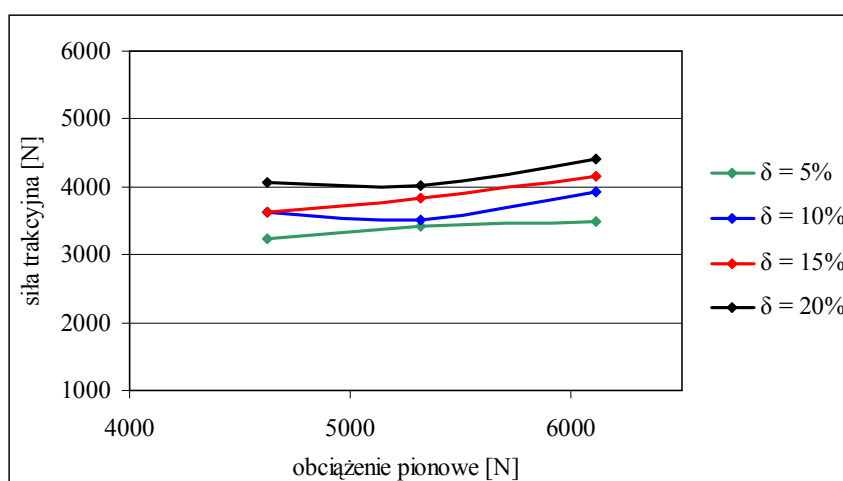
Rys. 6.17. Średnie wartości siły trakcyjnej opony 7.5-16 przy poślizgu 0 – 30%, przy wszystkich poziomach obciążenia pionowego

Analiza powyższego zestawienia pozwala stwierdzić, że przy wszystkich trzech poziomach obciążenia najwyższe wartości siły trakcyjnej wystąpiły na glebie luźnej. W większości przypadków zaobserwowano tendencję wzrostową siły trakcyjnej na skutek zwiększania obciążenia; wyjątek stanowi gleba zagęszczona, gdzie nie zaobserwowano różnic pomiędzy wartością siły przy najmniejszym i środkowym poziomie obciążenia, a zastosowanie najwyższego obciążenia powodowało wzrost wartości siły o 10%.

Zaobserwowano, że wartości siły trakcyjnej opony 7.5-16 ściśle korespondują z wartościami zwięzłości i naprężeń ścinających podłoży, na których badana była ta opona. Najniższe wartości siły trakcyjnej stwierdzono bowiem na glebie zagęszczonej czyli na podłożu o największej zwięzłości. W przypadku ściernisk i gleby luźnej, których zwięzłości nie różniły się znacząco zaobserwowano natomiast zbliżone wartości siły trakcyjnej.

Analizując wartości siły na ścierniskach można znaleźć analogię do pracy Jenane i Bashford [1995], w której nie stwierdzono istotnych różnic w wartościach sił na ścierniskach w różnych technologiach uprawy. Wpływ obciążenia pionowego koła jest zbliżony do tendencji przedstawianych w literaturze. Wykazywano bowiem, że zwiększenie obciążenia pionowego skutkuje wzrostem siły trakcyjnej [Jun i in. 2004, Xu i in. 1991, Gholkar i in. 2009, Wulfsohn i Upadhyaya 1988], zaznaczyć jednak należy, że wartości przyrostów siły trakcyjnej były niewielkie (nie przekraczały 20%).

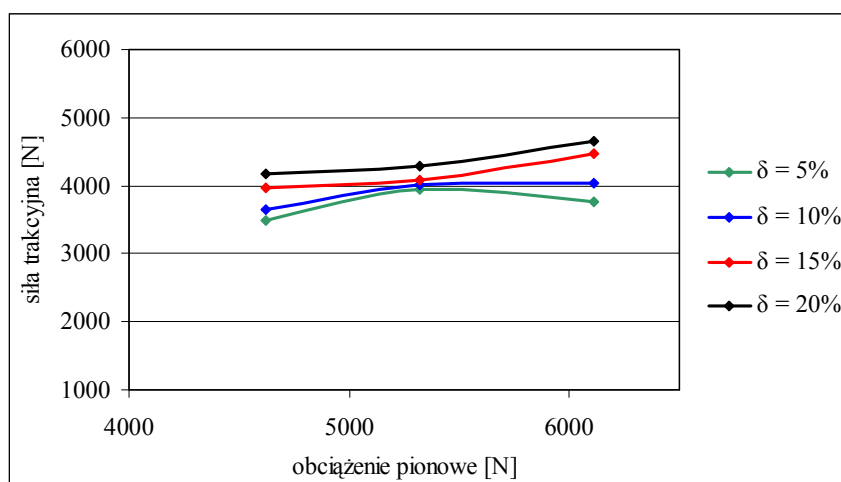
Opisywanie wpływu obciążenia pionowego na średnie wartości siły trakcyjnej jest niewystarczające gdyż nie uwzględnia poślizgu. Z tego powodu dokonano zestawień wartości siły trakcyjnej przy trzech poziomach obciążenia pionowego, przy poślizgach 5, 10, 15 i 20%; Na rysunku 6.18 przedstawiono wartości siły trakcyjnej przy różnych obciążeniach pionowych i poślizgach na ściernisku w uprawie tradycyjnej.



Rys. 6.18. Wartości siły trakcyjnej opony 7.50-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej

Zgodnie z powyższym zestawieniem wzrost poślizgu skutkował wzrostem wartości siły trakcyjnej. Ponadto zaobserwować można, że przy poślizgach 10 i 20% pierwsze zwiększenie obciążenia (z 4620 do 5320 N) skutkowało spadkiem wartości siły, dopiero zastosowanie najwyższego poziomu obciążenia (6110 N) spowodowało wzrost wartości analizowanego parametru. Natomiast przy poślizgach 5 i 15% zwiększanie obciążenia skutkowało wzrostami siły, jednak wartości tych przyrostów nie przekraczały 10%.

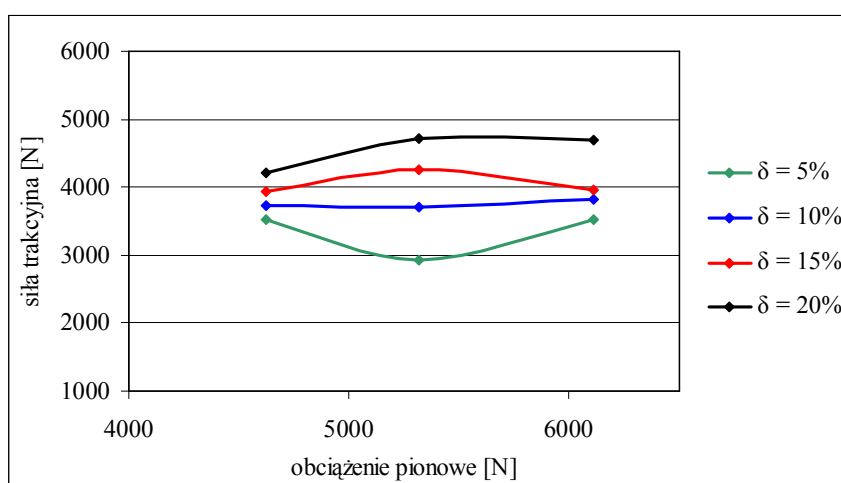
Zestawienie wartości siły trakcyjnej przy różnych poślizgach i obciążeniach pionowych koła na ściernisku w uprawie uproszczonej pokazano na rysunku 6.19.



Rys. 6.19. Wartości siły trakcyjnej opony 7.50-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie uproszczonej

Analizując powyższy rysunek zaobserwować można, że podobnie jak w poprzednim przypadku wyższe wartości sił trakcyjnych występowały przy wyższych poślizgach koła. Ponadto charakter zmian siły trakcyjnej na skutek zwiększania obciążenia jest różny dla poszczególnych wartości poślizgu. Przy niskich poślizgach (5 i 10%) zwiększenie obciążenia z 4620 do 5320 N skutkowało wzrostem wartości siły (o około 10%), natomiast dalsze dociążanie nie powodowało już przyrostu (przy poślizgu 5% obserwuje się w tej sytuacji spadek wartości siły). Przy wyższych poślizgach zwiększanie obciążenia oznaczało wzrost siły trakcyjnej, wartości przyrostów nie przekraczały jednak 10%.

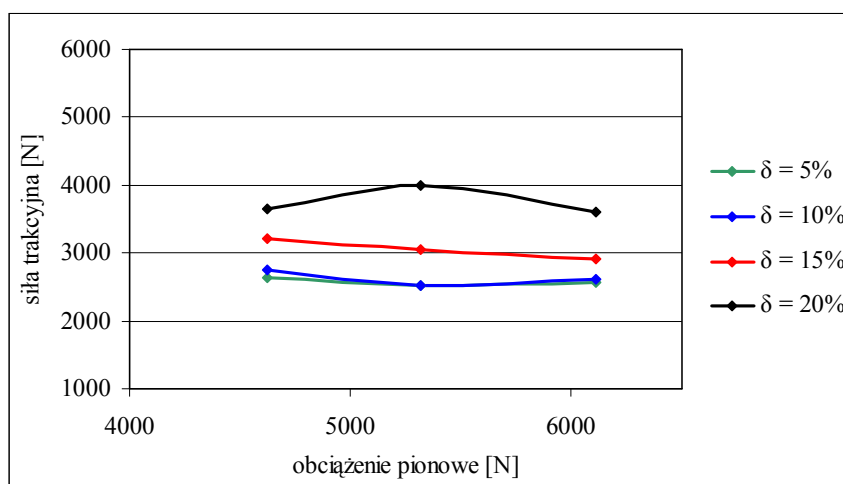
Na rysunku 6.20 przedstawiono wartości siły przy różnych poślizgach i obciążeniach pionowych koła na ściernisku w siewie bezpośrednim.



Rys. 6.20. Wartości siły trakcyjnej opony 7.50-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w siewie bezpośrednim

Różnice w zmianach wartości siły przy różnych poślizgach były wyższe niż w dwóch poprzednio omawianych przypadkach. Jedynie przy poślizgu równym 10% praktycznie nie wystąpiły zmiany siły trakcyjnej na skutek zwiększania obciążenia. Przy najmniejszym poślizgu zwiększenie obciążenia z 4620 do 5320 N skutkowało spadkiem siły o 21%, dalsze zwiększenie obciążenia powodowało wzrost siły do wartości odpowiadającej pierwszemu poziomowi obciążenia. Przy poślizgach 15 i 20% pierwsze zwiększenie obciążenia skutkowało wzrostami siły. Zastosowanie obciążenia 6110 N oznaczało spadek wartości siły (przy poślizgu 15%) oraz brak jej zmiany (przy poślizgu 20%).

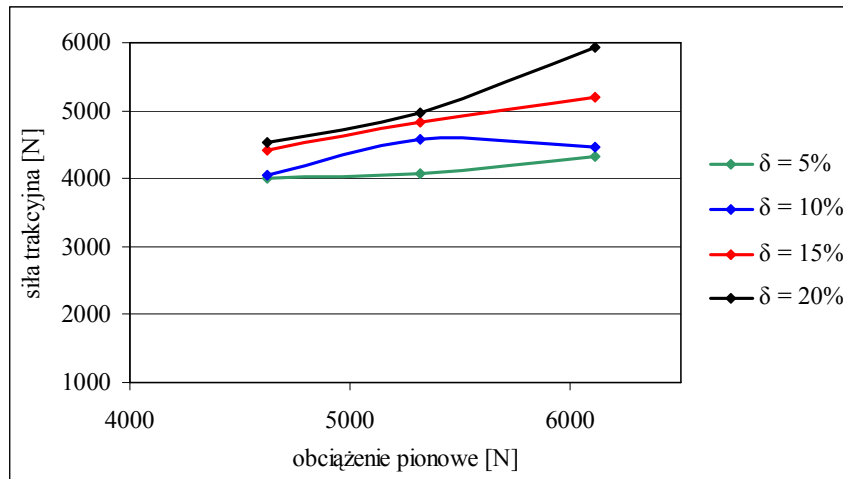
Na rysunku 6.21 przedstawiono wartości siły trakcyjnej przy różnych obciążeniach i poślizgach na kolejnym rodzaju podłoża – glebie zagęszczonej.



Rys. 6.21. Wartości siły trakcyjnej opony 7.50-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie zagęszczonej

W odróżnieniu od poprzednio omawianych podłoży, na glebie zagęszczonej zaobserwować można brak różnic w wartościach siły występujących przy poślizgach 5 i 10%. Przy tych poślizgach zauważalny jest ponadto brak wpływu zmiany obciążenia na wartości siły trakcyjnej. Przy poślizgu równym 15% stosowanie wyższych obciążeń pionowych skutkuje niewielkimi spadkami wartości siły (o ok. 5%). Przy najwyższym rozpatrywanym poślizgu pierwsze zwiększenie obciążenia powodowało wzrost siły trakcyjnej o 10% dalsze zwiększenie obciążenia oznaczało spadek o 9%.

Wartości siły trakcyjnej przy różnych poziomach obciążenia pionowego i poślizgu na ostatnim z podłoży, na którym badana była opona 7.5-16 przedstawiono na rysunku 6.22.



Rys. 6.22. Wartości siły trakcyjnej opony 7.50-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie luźnej

Na glebie luźnej (rys. 6.22), w porównaniu do dwóch poprzednich rodzajów podłoży, obserwuje się wyższe wartości siły trakcyjnej przy wszystkich poślizgach i dla wszystkich obciążeń pionowych. Zwiększanie obciążenia pionowego skutkowało wzrostem wartości siły trakcyjnej jedynie przy poślizgach 15 i 20%. W pierwszym przypadku zwiększenie obciążenia z 4620 N do 5320 N spowodowało wzrost siły trakcyjnej o 9%, natomiast zastosowanie najwyższego poziomu obciążenia skutkowało wzrostem wartości siły o 8%. Przy największym poślizgu obserwowano jeszcze większe przyrosty siły w miarę zwiększania obciążenia; wyniosły one kolejno 10 i 19%. Przy poślizgu równym 10% początkowe zwiększenie obciążenia pionowego spowodowało wzrost wartości siły trakcyjnej, jednak dalsze zwiększanie obciążenia skutkowało spadkiem wartości siły.

W celu określenia wpływu przyjętych czynników na wartości siły trakcyjnej dokonano analizy statystycznej. Oprócz rodzaju podłoża i poziomu obciążenia pionowego jako czynnik przyjęto w tym przypadku wielkość poślizgu koła (wartości siły trakcyjnej odczytywane były dla poślizgów 5, 10, 15, 20, 25 i 30%), analogicznie jak przy opracowywaniu wyników I etapu badań. W pierwszej kolejności sprawdzono zgodność rozkładu analizowanej zmiennej (siły trakcyjnej) z rozkładem normalnym za pomocą testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; wyniki tego testu przedstawiono w tabeli 6.8. Zgodnie z uzyskanymi wynikami każda populacja w obrębie wszystkich trzech czynników posiadała rozkład zgodny z normalnym, zatem spełniony został pierwszy warunek stosowalności wieloczynnikowej analizy wariancji. Konieczne było sprawdzenie drugiego z warunków czyli wykonanie testu na jednorodność wariancji (tabela 6.9).

Tabela 6.8. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla siły trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Podłoże	śc. uprawa tradycyjna	0,988543	0,883835
	śc. uprawa uproszczona	0,974460	0,300517
	śc. siew bezpośredni	0,981174	0,551917
	gleba zagęszczona	0,966710	0,137722
	gleba luźna	0,977031	0,383766
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,992962	0,917810
	5320 N	0,979631	0,170217
	6110 N	0,986013	0,450553
Poślizg koła	5%	0,985824	0,849464
	10%	0,978393	0,556039
	15%	0,971175	0,319215
	20%	0,977528	0,523031
	25%	0,981494	0,680567
	30%	0,969455	0,276673

Tabela 6.9. Wyniki testu jednorodności wariancji (Levene'a) dla siły trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań

Zmienna	Wartość testu F	Prawdopodobieństwo p
Siła trakcyjna	2,025128	0,000034

Przedstawiona wartość p jest mniejsza od założonego poziomu istotności, zatem nie można przyjąć hipotezy o jednorodności wariancji. Z uwagi na to, że nie został spełniony drugi warunek stosowalności wieloczynnikowej analizy wariancji, do oceny wpływu czynników na wartości siły trakcyjnej zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (tab. 6.10).

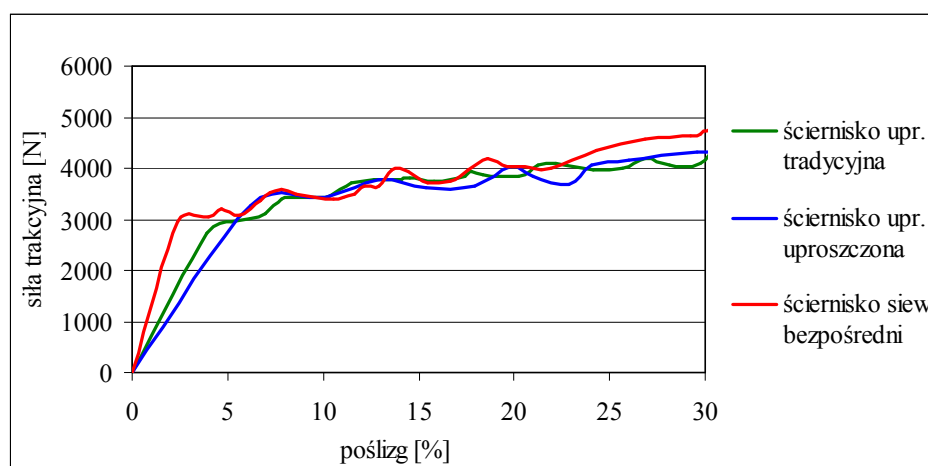
Tabela 6.10. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla siły trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rodzaj podłoża	123,3474	0,0004
Obciążenie pionowe koła	1,086488	0,5809
Poślizg koła	61,8221	0,0001

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 6.10 stwierdzić można, że jedynie poziom obciążenia pionowego koła nie miał istotnego wpływu na wartości siły trakcyjnej opony 7.5-16. W przypadku pozostałych dwóch czynników wartości prawdopodobieństwa p były znacznie niższe niż założony poziom istotności, toteż stwierdzono, że czynniki te miały istotny wpływ na wartości siły trakcyjnej.

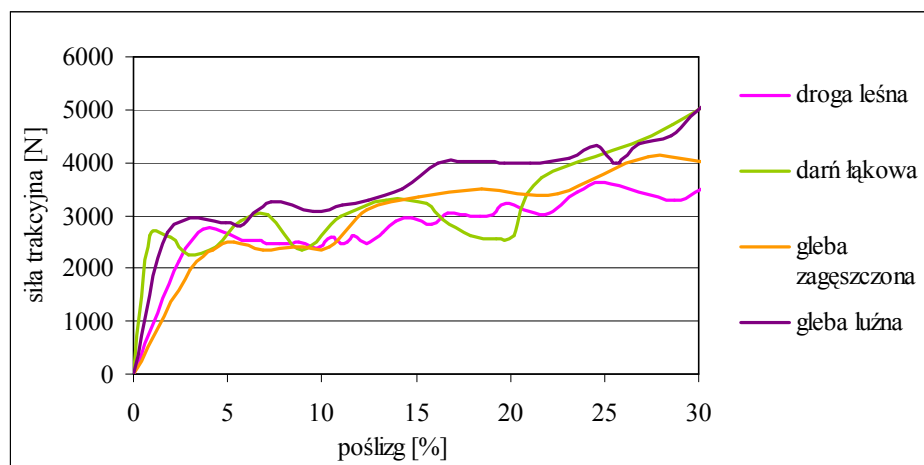
Dla poszczególnych zmiennych grupujących (czynników) przeprowadzono testy porównań wielokrotnych. W przypadku podłoża test taki wykazał, że nie wystąpiły istotne różnice w wartościach siły w przypadku dwóch par podłoży: ściernisko w uprawie tradycyjnej – ściernisko w siewie bezpośrednim oraz ściernisko w uprawie uproszczonej – ściernisko w siewie bezpośrednim. We wszystkich pozostałych kombinacjach wystąpiły istotne różnice. Dla drugiej zmiennej grupującej (poziom obciążenia pionowego) nie wystąpiły istotne różnice pomiędzy żadnym z poziomów zmiennej, co tłumaczy brak istotności tego czynnika. W przypadku poślizgu koła (trzecia zmienna grupująca) istotne różnice w wartościach siły dotyczyły następujących par: 5-20, 5-25, 5-30, 10-20, 10-25, 10-30, 15-25 i 15-30.

Wartości siły trakcyjnej dla drugiej z badanych opon (8.3-20) zostały przedstawione w sposób analogiczny jak w przypadku opony 7.50-16, różnica dotyczyła jedynie ilości podłoży – w przypadku opony 8.3-20 badania przeprowadzono dodatkowo na leśnej drodze gruntowej oraz darni łąkowej. Na rysunku 6.23 przedstawiono przebiegi siły trakcyjnej w funkcji poślizgu dla opony 8.3-20 na ścierniskach przy najmniejszym poziomie obciążenia pionowego (4620 N).



Rys. 6.23. Przebiegi siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N na ścierniskach

Analizując przedstawiony przebieg zauważyć można, że największe różnice w wartościach siły trakcyjnej w poszczególnych systemach uprawowych dotyczyły niskich poślizgów; przy poślizgach w zakresie 0 – 5% największy przyrost siły trakcyjnej wystąpił na ściernisku w siewie bezpośrednim, natomiast najmniejszy – w przypadku uprawy uproszczonej. Po przekroczeniu poślizgu równego 10% wartości siły trakcyjnej we wszystkich trzech uprawach utrzymują się na zbliżonym poziomie.

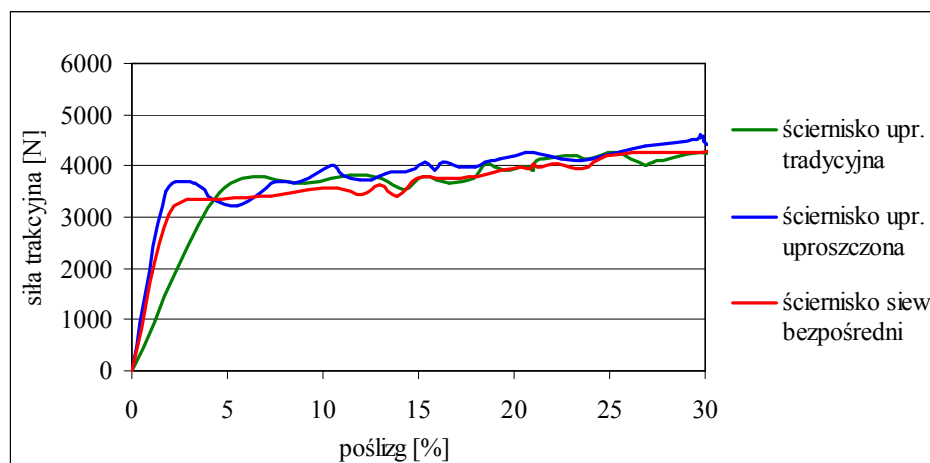


Rys. 6.24. Przebieg siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N na drodze, darni oraz glebach

Analiza przebiegów siły trakcyjnej na pozostałych podłożach (rys. 6.24) pozwala stwierdzić, że różnice pomiędzy wartościami sił na poszczególnych podłożach są większe niż miało to miejsce w przypadku ściernisk. Przy niskich poślizgach (0 – 5%) największy przyrost siły trakcyjnej wystąpił w przypadku darni łąkowej, natomiast najmniejszy w przypadku gleby zagęszczonej. Po przekroczeniu poślizgu równego 2% najwyższe wartości siły trakcyjnej stwierdzono na glebie luźnej; tendencja ta utrzymywała się aż do poślizgu równego 25%. W zakresie poślizgów 5 – 10% wyraźnie niższe wartości siły trakcyjnej występowały na drodze gruntowej oraz glebie zagęszczonej. W przypadku tego drugiego podłoża obserwuje się pewien wzrost wartości siły przy poślizgach 10 – 12% a następnie jej ustabilizowanie. Największe wahania wartości siły trakcyjnej w miarę wzrostu poślizgu zaobserwowano na darni łąkowej.

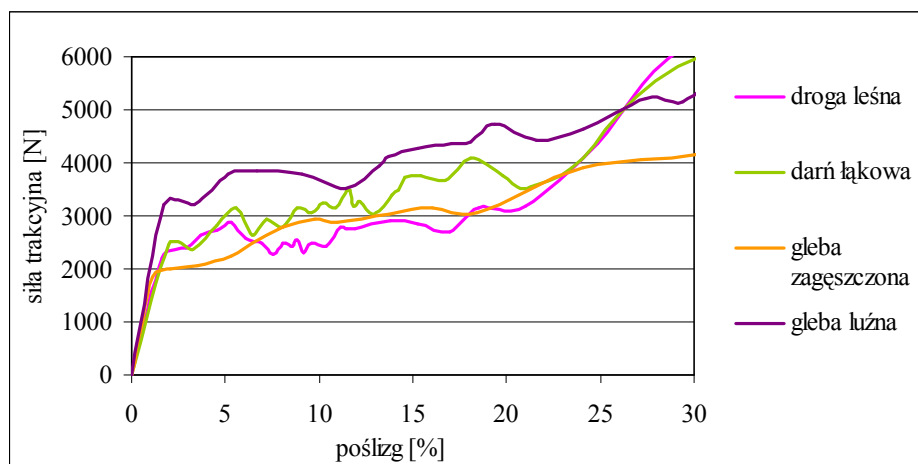
Na rysunku 6.25 przedstawiono przebiegi siły trakcyjnej w funkcji poślizgu opony 8.3-20 przy obciążeniu 5320 N na ścierniskach. Charakter zmian powyższych przebiegów jest w tym przypadku nieco inny niż to miało miejsce przy niższym poziomie obciążenia pionowego koła. Różnice dotyczą tempa przyrostu siły przy niskich wartościach poślizgu. W przypadku niższego poziomu obciążenia stwierdzono, że siły przyrastały przy

poślizgach z zakresu 0 – 7%, natomiast przy obciążeniu 5320 N przyrosty obserwuje do poślizgu równego 4%. W zakresie poślizgu 4 – 13% niższe wartości siły trakcyjnej występowały na ściernisku w siewie bezpośrednim. Najmniejsze wartości początkowych przyrostów stwierdzono w przypadku uprawy tradycyjnej.



Rys. 6.25. Przebieg siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N na ścierniskach

Przebiegi siły trakcyjnej na drodze, darni, glebie zagęszczonej i luźnej przy obciążeniu koła 5320 N przedstawiono na rysunku 6.26.

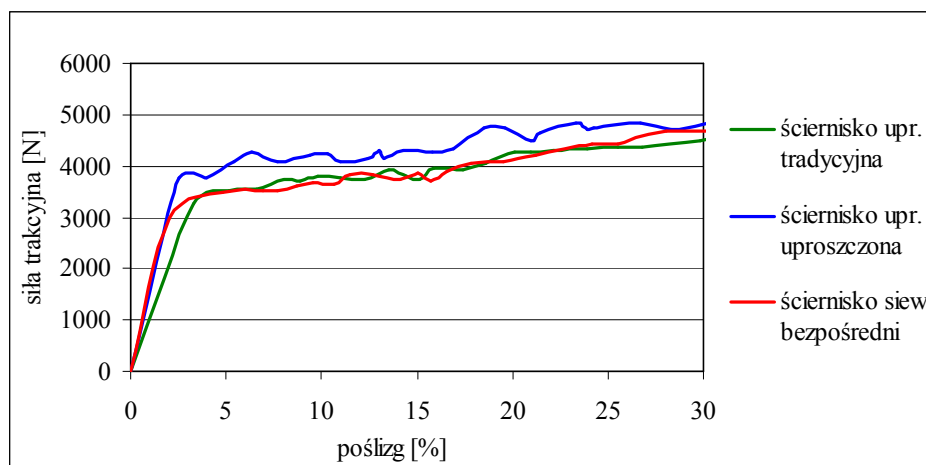


Rys. 6.26. Przebieg siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N na drodze, darni oraz glebach

Przy obciążeniu pionowym równym 5320 N (rys. 6.26) przebiegi siły trakcyjnej odznaczały się znacznym przyrostem przy niskich wartościach poślizgu (0 – 2%). Pewną odmienność zaobserwowano na glebie zagęszczonej – wartości siły trakcyjnej na tym podłożu po ustabilizowaniu przebiegu były najmniejsze – tendencja ta utrzymywała się

w zakresie poślizgu 2 – 7%. Najwyższe wartości siły trakcyjnej, w znacznej części rozpatrywanego zakresu poślizgów, stwierdzono na glebie luźnej. Przy niskich poślizgach (0 – 5%) wartości siły trakcyjnej na darni i drodze leśnej były zbliżone, przy większych poślizgach wyższe wartości siły zaobserwowano na darni.

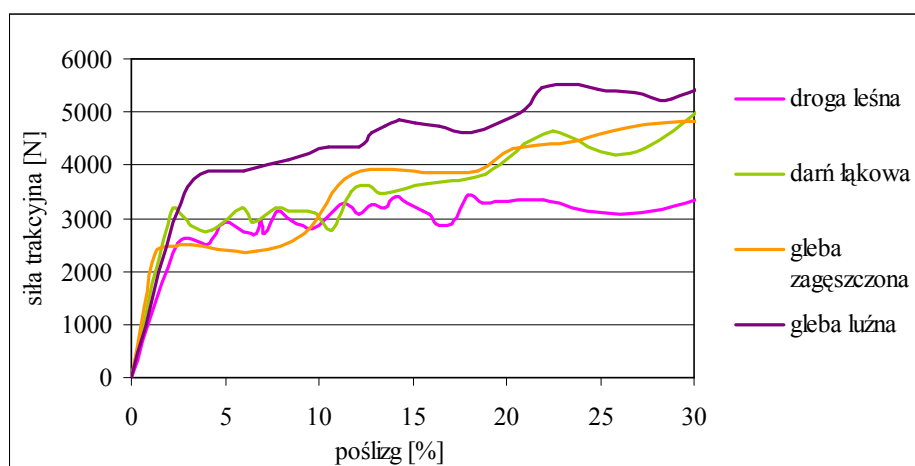
Na rysunku 6.27 zobrazowano przebiegi siły trakcyjnej na ścierniskach przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego koła (6110 N).



Rys. 6.27. Przebieg siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N na ścierniskach

Analiza przebiegu przedstawionego na rysunku 6.27 pozwala stwierdzić, że charakter zmian siły trakcyjnej na wszystkich trzech ścierniskach był zbliżony. Przy poślizgach z zakresu 0 – 4% większymi przyrostami charakteryzowały się ścierniska w uprawie uproszczonej i siewie bezpośrednim. Nieco wyższe wartości siły trakcyjnej po ustabilizowaniu przebiegów stwierdzono na ściernisku w uprawie uproszczonej. W przypadku dwóch pozostałych ściernisk wartości siły trakcyjnej były porównywalne.

Przebiegi siły trakcyjnej przy najwyższym poziomie obciążenia na pozostałych podłożach przedstawiono na rysunku 6.28. W tym przypadku tempo początkowego przyrostu wartości siły na wszystkich podłożach jest porównywalne. Po ustabilizowaniu przebiegów najwyższe wartości siły trakcyjnej zaobserwowano na glebie luźnej. Dla poślizgu w zakresie 3 – 10% wartości siły trakcyjnej na drodze leśnej oraz darni utrzymywały się na zbliżonym poziomie, przy większych poślizgach wyższe wartości siły uzyskano na darni. Gleba zagęszczona charakteryzowała się niskimi wartościami siły przy poślizgach 3 – 10%, przyrostem po przekroczeniu poślizgu 10% i kolejnym ustabilizowaniem przy poślizgach 11 – 20%.

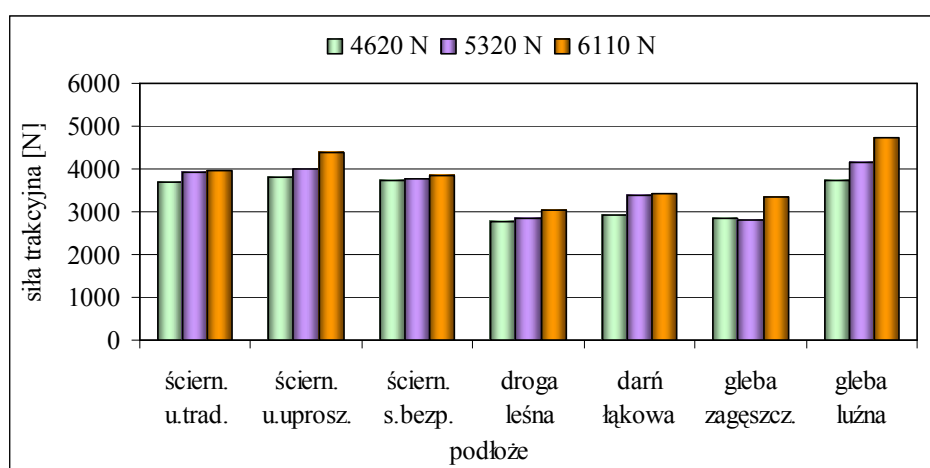


Rys. 6.28. Przebiegi siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N na drodze, darni oraz glebach

Charakter przedstawionych przebiegów, podobnie jak w przypadku opony 7.5-16, w pewnym tylko stopniu nawiązuje do wyników przedstawianych w literaturze. Rozpatrując przebiegi siły trakcyjnej na ścierniskach zaobserwować można, że przy wszystkich trzech poziomach obciążenia pionowego największe przyrosty siły występowały przy niskich poślizgach (0 – 7%) po czym następowało ustabilizowanie przebiegu. Natomiast w przedstawianych pracach przebiegi siły trakcyjnej na ścierniskach miały zazwyczaj wolniejsze tempo przyrostu – stabilizacja wartości siły następowała przy poślizgu 20 – 40% [Jenane, Bashford 1995, Wolf i in. 1996, Bashford i in. 1993, Bashford i in. 1999, Diserens, Battiato 2012]. Przebiegi siły trakcyjnej na glebie zagęszczonej i luźnej odznaczają się podobną tendencją, większość autorów wykazywała bowiem, że stabilizacja wartości siły następuje przy poślizgach powyżej 20% [Lyasko 2010b, Al-Janobi 1997, Gholkar i in. 2009, Bashford i in. 1993]. Jedynie w pracach Smerdy i Cupery [2010] oraz Elwaleeda [2006a] stwierdzono że przedstawiane przebiegi siły miały charakter zbliżony jak w przypadku uzyskanych wyników badań. Charakter zmian siły trakcyjnej na drodze leśnej jest zbliżony do wyników przedstawianych w pracach Białczyka [2010a] i Vechinskiego i in. [1998]. W przypadku podłoża zadarnionego tendencja zmian siły trakcyjnej w funkcji poślizgu była nieco odmienna niż w pracach Białczyka i in. [2008a, 2010c, 2010d], gdzie stwierdzono, że stabilizacja wartości siły trakcyjnej następuje przy wyższych poślizgach. Różnice w charakterach przebiegów uzyskanych podczas badań i przedstawianych w literaturze tłumaczyć należy odmiennością wymiarów zewnętrznych opon użytych podczas badań w porównaniu do opon używanych w badaniach innych autorów. Stosowane podczas badań opony

odznaczały się mniejszymi średnicami i szerokościami, co mogło mieć wpływ na charakter zmian siły trakcyjnej.

W celu ukazania różnic w wartościach siły trakcyjnej przy różnych obciążeniach pionowych dokonano zestawienia średnich wartości siły trakcyjnej obliczonych przy poślizgach z zakresu 0 – 30%. Zestawienie to zaprezentowano na rysunku 6.29.

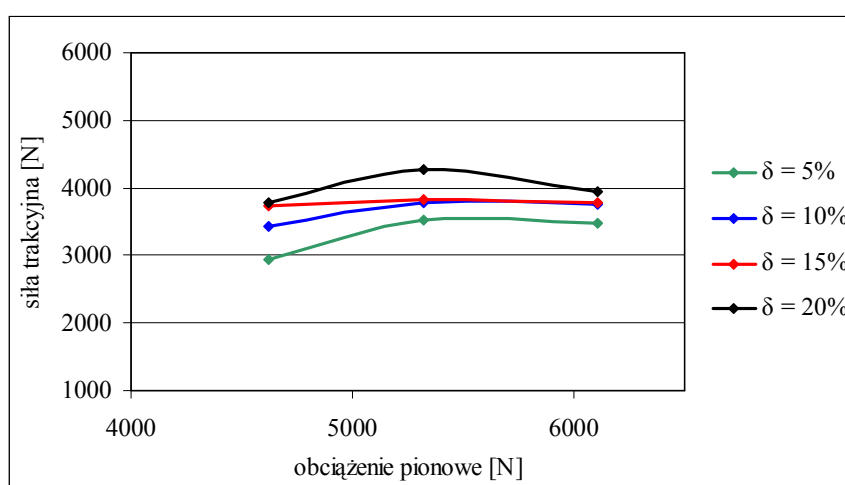


Rys. 6.29. Średnie wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy poślizgu 0 – 30%

Na podstawie powyższego zestawienia można stwierdzić, że w większości przypadków zwiększanie obciążenia pionowego skutkowało wzrostem wartości siły trakcyjnej. Najmniejsze zmiany siły trakcyjnej na skutek zwiększania obciążenia zaobserwowano na ścierniskach w uprawie tradycyjnej i uproszczonej. W przypadku gleby zagęszczonej pierwsze zwiększenie obciążenia praktycznie nie spowodowało zmiany wartości siły, dopiero zastosowanie najwyższego poziomu obciążenia skutkowało wzrostem wartości analizowanego parametru. Zwiększanie obciążenia pionowego powodowało największe zmiany wartości siły w przypadku gleby luźnej (przyrosty wyniosły kolejno 11 i 14%). Zaznaczyć należy, że w dostępnej literaturze [Jun i in. 2004, Xu i in. 1991, Gholkar i in. 2009, Wulfsohn i Upadhyaya 1988] wykazywano, że siła trakcyjna wzrasta wraz ze zwiększaniem obciążenia pionowego, jednak przedstawiane wyniki dotyczyły zazwyczaj maksymalnej wartości siły trakcyjnej z całego zakresu poślizgu, podczas gdy w opisywanych wynikach odniesiono się do wartości średniej obliczonej dla poślizgów z zakresu 0 – 30%. Niższe wartości siły trakcyjnej na drodze leśnej i glebie zagęszczonej mogą mieć związek z większą wytrzymałością tych podłoży. Wartości zwięzłości, jak i naprężeń ścinających na drodze oraz glebie zagęszczonej były wyższe niż na pozostałych podłożach (rys. 6.12, 6.13), konsekwencją czego mógł być

mniejszy opór przetaczania na tych podłożach. Jako, że siła trakcyjna jest sumą siły uciągu i oporu przetaczania, to istnieje możliwość, że przy większym oporze przetaczania wartości siły trakcyjnej będą wyższe. Również w literaturze najczęściej są opisywane przypadki, gdy na podłożach o wyższej wytrzymałości wartości siły trakcyjnej są wyższe [Jenane, Bashford 1995, Grisso i in. 1992, Bashford i in. 1993, Bashford i in. 1999].

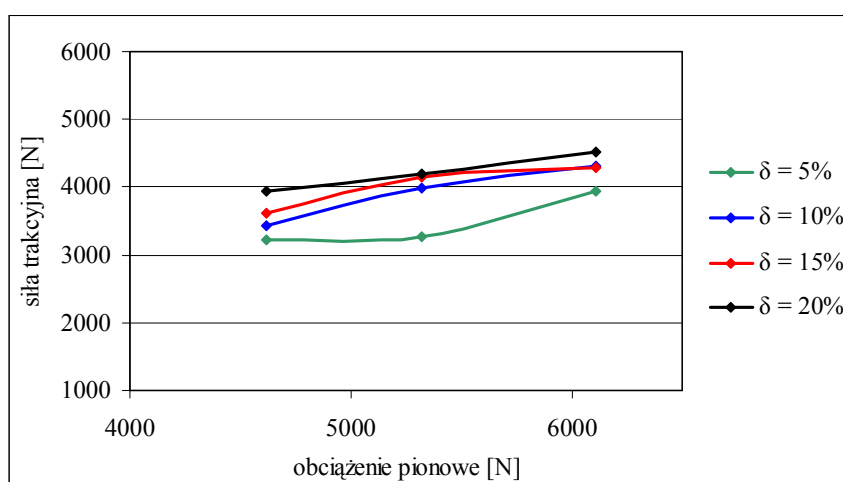
Podobnie jak w przypadku opony 7.50-16 dla opony 8.3-20 dokonano zestawień wartości siły trakcyjnej przy różnych poślizgach i obciążeniach pionowych, osobno dla każdego z siedmiu podłoży, na których badana była opona 8.3-20. Zestawienie wartości sił w odniesieniu do ścierniska w uprawie tradycyjnej przedstawiono na rysunku 6.30.



Rys. 6.30. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej

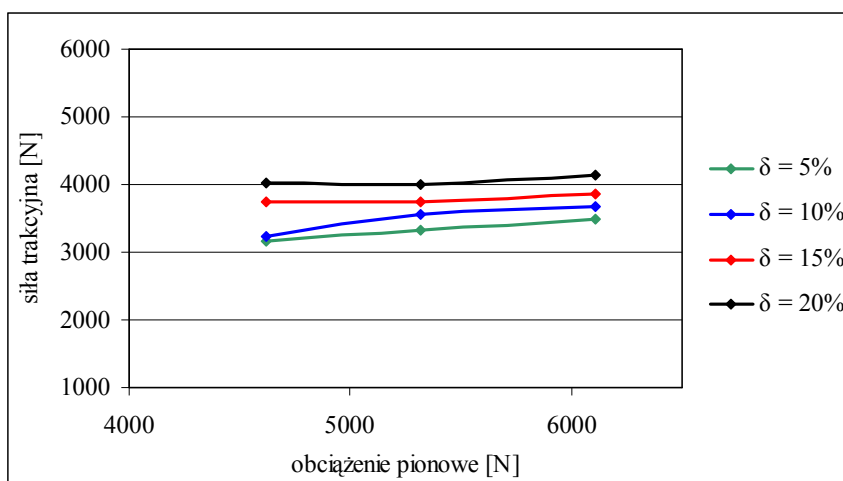
Analiza powyższego zestawienia pozwala na stwierdzenie, że najmniejsze zmiany wartości siły na skutek zwiększania obciążenia wystąpiły przy poślizgu równym 15%; w tym wypadku obydwie zmiany obciążenia nie powodowały zmian wartości siły trakcyjnej. Przy niskich poślizgach (5 i 10%) pierwsze zwiększenie obciążenia skutkowało wzrostem wartości siły, natomiast dalsze dociążanie praktycznie nie powodowało zmian. Przy najwyższym poślizgu zwiększenie obciążenia z 4620 do 5320 N spowodowało wzrost wartości siły o 13%, dalsze zwiększenie obciążenia skutkowało natomiast spadkiem o 8%. Zauważyć można ponadto, że przy obciążeniach pionowych 5320 i 6110 N wartości siły trakcyjnej przy poślizgach 10 i 15% utrzymywały się na zbliżonym poziomie. Zestawienie wartości siły trakcyjnej na drugim z badanych podłoży (ściernisku w uprawie uproszczonej) zilustrowano na rysunku 6.31. Tendencje zmian wartości siły trakcyjnej są w tym wypadku odmienne niż na ściernisku w uprawie tradycyjnej. Przy poślizgach 10,

15 i 20% zwiększanie obciążenia skutkowało wzrostem wartości siły trakcyjnej; najwyższe wartości przyrostów zaobserwowano przy poślizgu 10%. Pewną odmienność charakteru zmian siły trakcyjnej stwierdzono przy poślizgu 5%; pierwsze zwiększenie obciążenia pionowego nie wywołało zauważalnej zmiany siły trakcyjnej, zaś dalsze zwiększenie obciążenia skutkowało wzrostem wartości siły o 21%.



Rys. 6.31. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie uproszczonej

Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 na trzecim z badanych ściernisk zestawiono na rysunku 6.32.

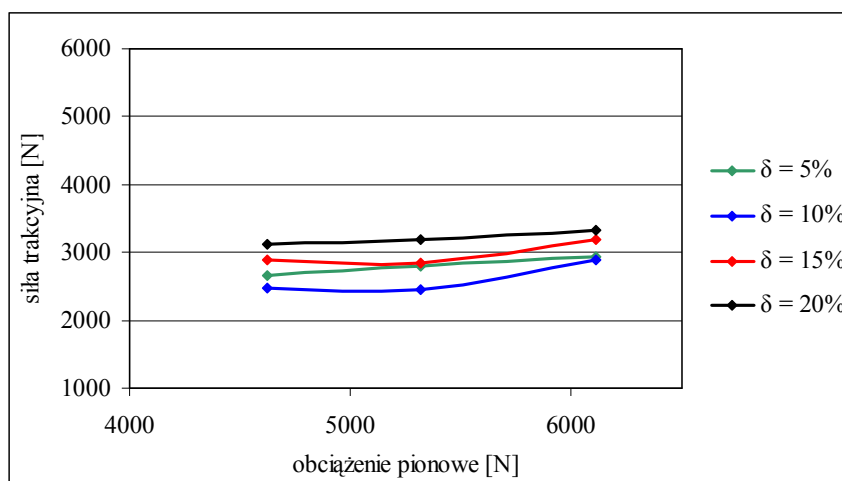


Rys. 6.32. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w siewie bezpośrednim

Analizując zestawienie dotyczące ścierniska w siewie bezpośrednim (rys. 6.32) zaobserwować można, że wyższe wartości siły trakcyjnej odpowiadały wyższym poślizgom. Przy poślizgach 15 i 20% zwiększanie obciążenia pionowego koła powodowało minimalne zmiany wartości siły trakcyjnej (przyrosty nie przekraczały 3%).

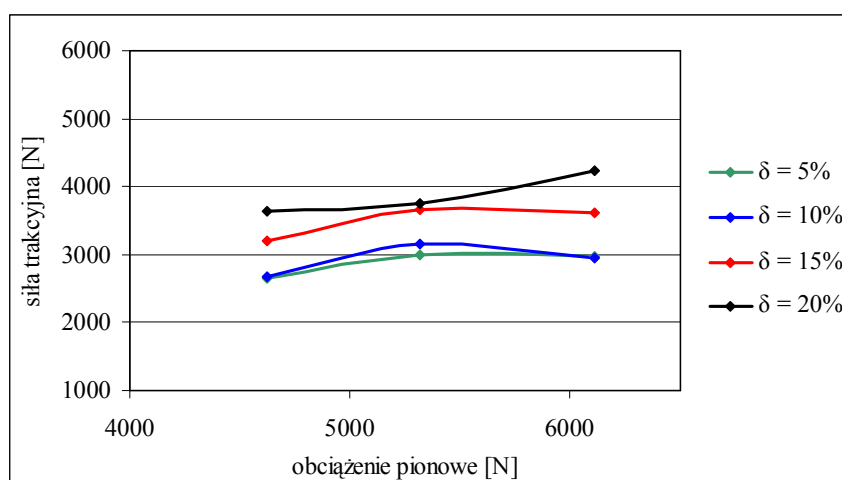
W przypadku niższych poślizgów większe przyrosty siły trakcyjnej obserwowano po pierwszym zwiększeniu obciążenia.

Na rysunku 6.33 przedstawiono wartości siły trakcyjnej przy różnych obciążeniach i poślizgach na gruntowej drodze leśnej.



Rys. 6.33. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na drodze leśnej

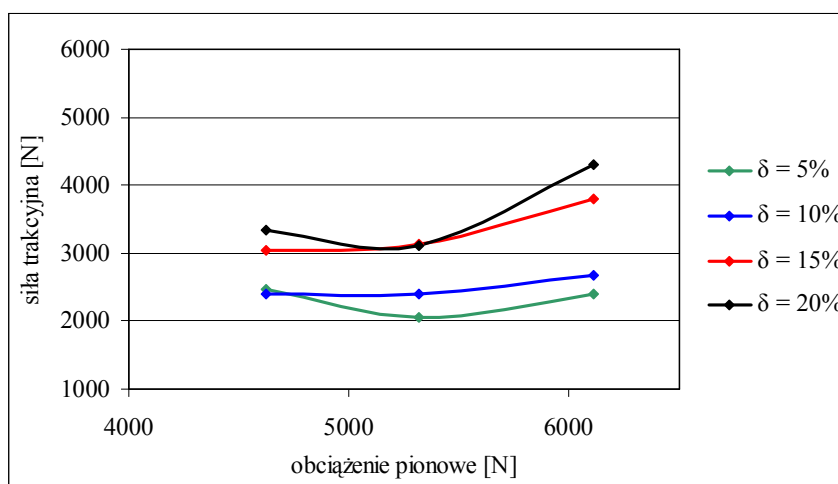
Na gruntowej drodze leśnej, w odróżnieniu od poprzednio omawianych podłoży, najniższe wartości siły wystąpiły przy poślizgu równym 10%. W tym też przypadku zaobserwowano największą zmianę wartości siły na skutek zwiększenia obciążenia pionowego z 5320 na 6110 N (wartość przyrostu wyniosła 18%). Najmniejsze zmiany wartości siły występowały przy najwyższym poślizgu; pierwsze zwiększenie obciążenia spowodowało przyrost wartości siły o 2%, kolejne zaś o 5%.



Rys. 6.34. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na darni

Analiza przebiegu sił na darni (rys. 6.34) pozwala zaobserwować pewną odmienność przebiegów siły w porównaniu do poprzednio omawianych podłoży. Wartości siły trakcyjnej przy poślizgach 5 i 10% są na zbliżonym poziomie – dotyczy to zwłaszcza skrajnych poziomów obciążenia pionowego. W obu tych przypadkach pierwsze zwiększenie obciążenia skutkowało wzrostem wartości siły, natomiast dalsze zwiększanie obciążenia powodowało spadek wartości analizowanego parametru. Przy poślizgu równym 20% zwiększanie obciążenia skutkowało przyrostami wartości siły, kolejno o 4 i 13%. Przy poślizgu 15% wzrost wartości siły osiągnięto jedynie po pierwszym zwiększeniu obciążenia.

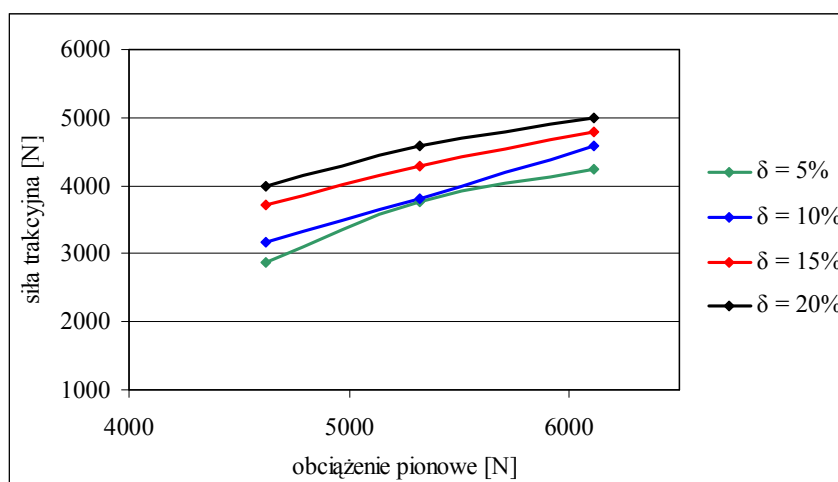
Na rysunku 6.35 zestawiono wartości sił przy różnych poślizgach i obciążeniach na glebie zagęszczonej.



Rys. 6.35. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie zagęszczonej

W przypadku gleby zagęszczonej zaobserwować można, że przy najmniejszym oraz największym poślizgu najniższa wartość siły występuje przy obciążeniu pionowym równym 5320 N. W przypadku poślizgu 10% wystąpiły najmniejsze zmiany wartości siły trakcyjnej na skutek zwiększania obciążenia pionowego. Jedynie przy poślizgu równym 15% obydwie zwiększenia obciążenia skutkowały wzrostem wartości siły trakcyjnej.

Wartości siły trakcyjnej przy różnych obciążeniach i poślizgach na glebie luźnej zilustrowano na rysunku 6.36. Analiza tego zestawienia pozwala stwierdzić, że zwiększanie obciążenia skutkowało wzrostem wartości siły trakcyjnej. Sytuacja taka wystąpiła przy wszystkich poślizgach. Najwyższe wartości przyrostów wystąpiły przy poślizgach 5 i 10%.



Rys. 6.36. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie luźnej

W odniesieniu do wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przeprowadzono analizę statystyczną w sposób analogiczny jak w przypadku opony 7.5-16, różnicę stanowiła jedynie liczba podłoży. Ocenę zgodności rozkładów w poszczególnych populacjach przeprowadzono z wykorzystaniem testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 6.11.

Tabela 6.11. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla siły trakcyjnej opony 8.3-20

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Podłoże	śc. uprawa tradycyjna	0,954413	0,038859
	śc. uprawa uproszczona	0,968216	0,160734
	śc. siew bezpośredni	0,969956	0,191911
	droga leśna	0,877908	0,000053
	darń łukowa	0,976804	0,375750
	gleba zagęszczona	0,932197	0,004467
	gleba luźna	0,968251	0,161307
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,979049	0,047679
	5320 N	0,985002	0,179604
	6110 N	0,988091	0,345021
Poślizg koła	5%	0,990012	0,891691
	10%	0,966314	0,081930
	15%	0,978755	0,346122
	20%	0,981341	0,454146
	25%	0,963156	0,056381
	30%	0,962409	0,041626

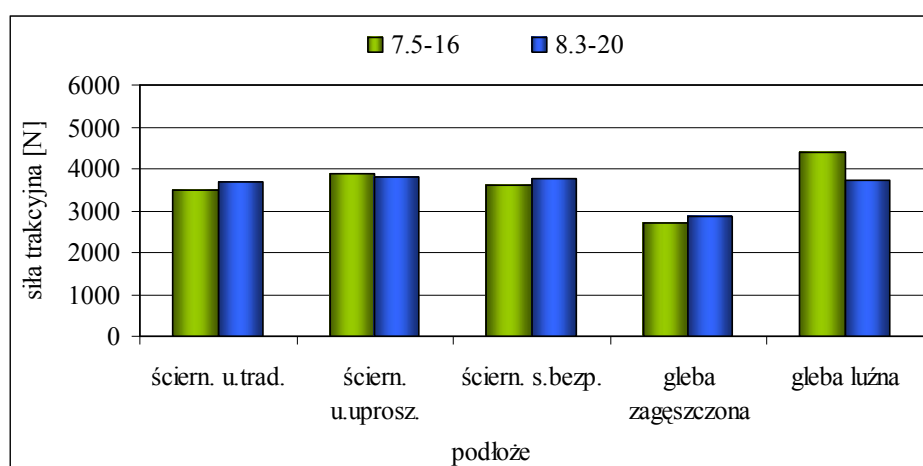
Z uwagi na to, że przy każdym czynniku występowały populacje, których rozkład nie był zgodny z normalnym, analizę wpływu czynników na wartość siły trakcyjnej opony 8.3-20 wykonano testem Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (tabela. 6.12).

Tabela 6.12. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla siły trakcyjnej opony 8.3-20

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rodzaj podłoża	98,87489	0,0006
Obciążenie pionowe koła	17,13625	0,0002
Poślizg koła	127,2502	0,0001

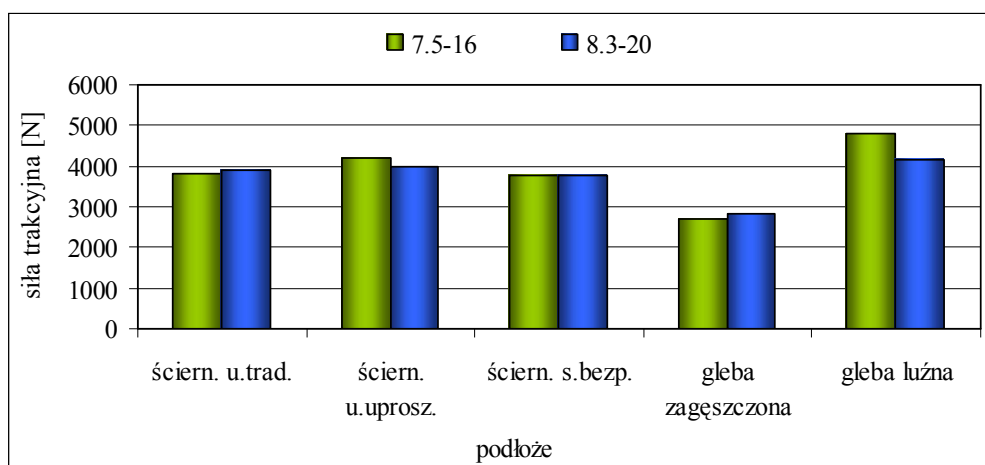
Zgodnie z wynikami przedstawionymi w powyższej tabeli wszystkie czynniki miały istotny wpływ na wartości siły trakcyjnej. Przeprowadzony test porównań wielokrotnych dla pierwszego z czynników (rodzaj podłoża) wykazał, że na poszczególnych ścierniskach wartości siły trakcyjnej nie różniły się istotnie, ponadto stwierdzono też brak istotnych różnic między darnią a ścierniskami, między glebą luźną a ścierniskiem w systemie uproszczonym oraz między glebą zagęszczoną a drogą leśną. Dla drugiego z czynników (obciążenie pionowe) istotne różnice w wartościach siły trakcyjnej wystąpiły między najniższym i najwyższym poziomem obciążenia. W przypadku trzeciej zmiennej grupującej (poślizg) brak istotnych różnic występował dla sąsiadujących wartości poślizgów (5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30).

W celu porównania wartości siły trakcyjnej obu badanych opon dokonano zestawień średnich wartości siły przy poślizgach z zakresu 0 – 30% obu opon. Zestawienie wartości sił przy najniższym poziomie obciążenia zilustrowano na rysunku 6.37.



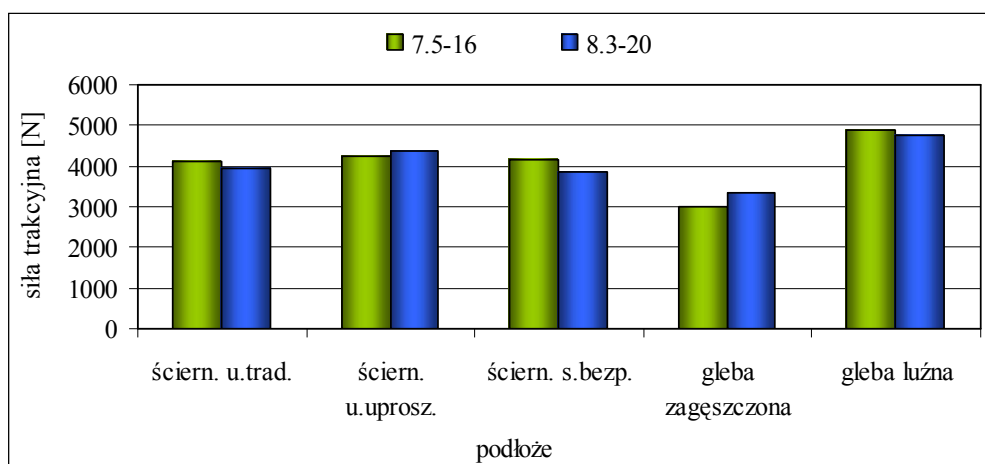
Rys. 6.37. Porównanie wartości siły trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 4620 N

Z zestawienia przedstawionego na rysunku 6.37 wynika, że największe różnice w wartościach siły między obiema oponami wystąpiły na glebie luźnej – na tym podłożu opona 7.5-16 charakteryzowała się siłą trakcyjną wyższą o 17%. W pozostałych przypadkach różnice w wartościach siły trakcyjnej obu opon nie przekraczały 5%. Opona 7.5-16 charakteryzowała się większymi zmianami siły trakcyjnej po zmianie podłoża.



Rys. 6.38. Porównanie wartości siły trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 5320 N

Przy wyższym poziomie obciążenia (rys. 6.38) wystąpiła podobna tendencja jak w poprzednio omawianym przypadku; największa różnica w wartościach siły trakcyjnej obu opon wystąpiła na glebie luźnej opona 7.5-16 charakteryzowała się na tym podłożu siłą trakcyjną o 15% wyższą niż opona 8.3-20. Zmiana rodzaju podłoża skutkowała większymi zmianami siły trakcyjnej w przypadku opony 7.5-16.



Rys. 6.39. Porównanie wartości siły trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 6110 N

Analiza zestawienia wartości sił trakcyjnych przy najwyższym poziomie obciążenia (rys. 6.39) pozwala stwierdzić, że maksymalne różnice w wartościach siły trakcyjnej obu opon nie przekraczały 11%. W odróżnieniu od poprzednio omawianych przypadków, największa różnica w wartościach siły wystąpiła na glebie zagęszczonej. Podobnie jak w dwóch poprzednich przypadkach wyższymi zmianami wartości siły na skutek zmiany rodzaju podłoża charakteryzowała się opona 7.5-16.

Powyższe zależności pomiędzy rozmiarem opony a wielkością siły trakcyjnej i jej zmianami na różnych podłożach mają zapewne związek z odmiennymi rozmiarami obu badanych opon. Przypuszczalnie, w przypadku zmiany podłoża z bardziej zwięzłego na mniej zwięzłe opona o mniejszych wymiarach miała większą tendencję do zgłębiania się, co powodowało zmianę sposobu przenoszenia siły trakcyjnej (zwiększenie przewagi udziału ścinania nad udziałem tarcia). W konsekwencji różnice wartości sił trakcyjnych na różnych podłożach były większe.

Przedstawione różnice wartości sił badanych opon znajdują w pewnym stopniu potwierdzenie w literaturze. Grisso i in. [1992] wykazali, że różnice w wartościach siły trakcyjnej opon o różnych średnicach na tym samym podłożu są niewielkie. Z kolei Bashford i in. [1993] stwierdzili, że na ściernisku największe wartości siły trakcyjnej uzyskiwała opona o najmniejszej szerokości, natomiast na zaoranej glebie wyższe siły cechowały oponę o największej szerokości i średnicy. Wulfsohn i in. [1988] nie wykazali istotnych różnic w wartościach siły trakcyjnej opon różniących się wymiarami zewnętrznymi.

W celu określenia wpływu rozmiaru opony na wartości siły trakcyjnej dokonano analizy statystycznej. Analizę taką przeprowadzono jedynie dla pięciu podłoży (wykluczono te podłoża, na których badana była jedynie opona 8.3-20). Przed określeniem wpływu czynników na wartości siły trakcyjnej dokonano oceny zgodności rozkładu siły trakcyjnej obu opon z rozkładem normalnym testem Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (tabela 6.13).

Tabela 6.13. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla siły trakcyjnej obu badanych opon

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Rozmiar opony	7.5-16	0,994579	0,452694
	8.3-20	0,983579	0,003395

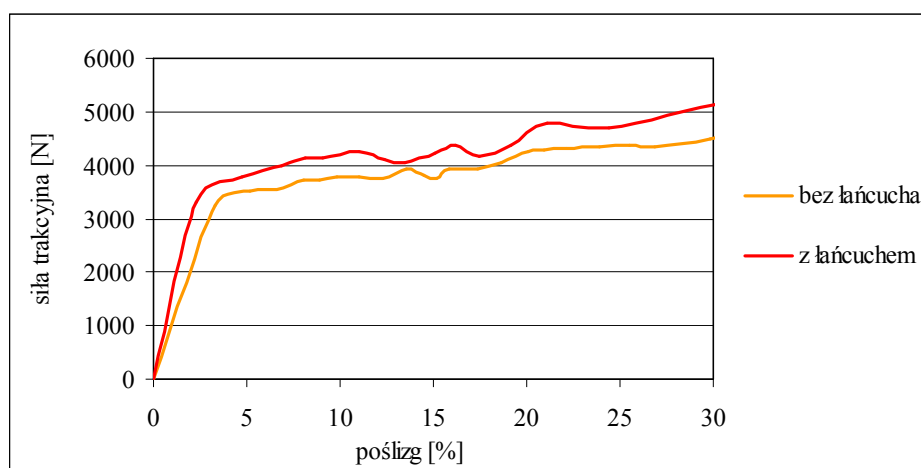
Zgodnie z danymi przedstawionymi w powyższej tabeli rozkład siły trakcyjnej opony 8.3-20 nie był zgodny z rozkładem normalnym. Z tego względu nie został spełniony pierwszy warunek stosowalności testów parametrycznych. Do oceny wpływu rozmiaru opony na wartość siły trakcyjnej zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, którego wyniki przedstawiono w tabeli 6.14.

Tabela 6.14. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla siły trakcyjnej obu badanych opon

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rozmiar opony	4,476120	0,0344

Przedstawiona w tabeli 6.13 wartość p jest niższa niż poziom istotności α , zatem nie ma podstaw do przyjęcia hipotezy o braku istotnych różnic między wartościami siły trakcyjnej (rozmiar opony miał istotny wpływ na wartość siły trakcyjnej).

Analizy zmian wartości siły trakcyjnej dokonano również dla opony 8.3-20 wyposażonej w łańcuch antypoślizgowy, na wybranych podłożach, przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego (6110 N). W celu określenia jaki wpływ ma stosowanie łańcucha, wartości sił trakcyjnych opony wyposażonej w łańcuch zestawiono z wartościami siły opony bez łańcucha antypoślizgowego. Na rysunku 6.40 przedstawiono przebiegi siły trakcyjnej w funkcji poślizgu na ściernisku w uprawie tradycyjnej.

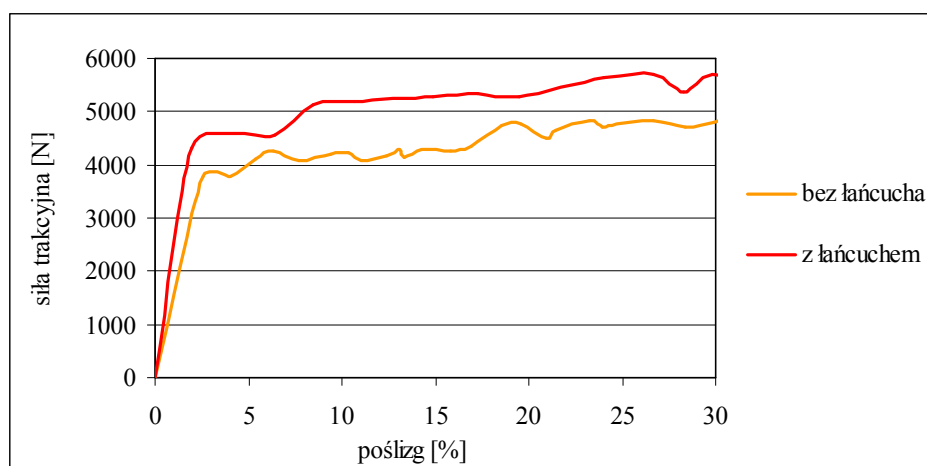


Rys. 6.40. Przebiegi siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na ściernisku w uprawie tradycyjnej

Analizując przedstawione powyżej przebiegi można stwierdzić, że stosowanie łańcucha antypoślizgowego na ściernisku w uprawie tradycyjnej skutkowało wzrostem wartości siły trakcyjnej w całym rozpatrywanym zakresie poślizgu – różnica w wartościach siły wyniosła około 10%. Ponadto, zaobserwować można, że przy

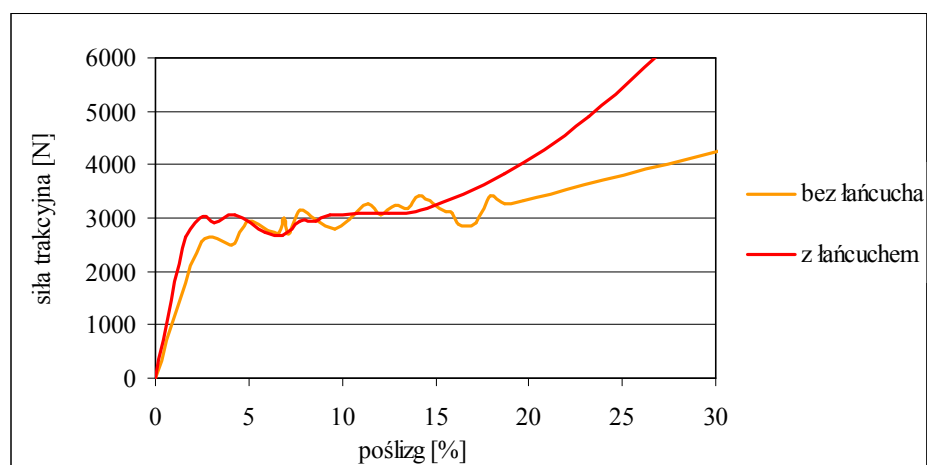
niewielkich poślizgach (0 – 3%) opona wyposażona w łańcuch charakteryzowała się nieco większym przyrostem siły trakcyjnej.

Na ściernisku w uprawie uproszczonej (przebiegi na rys. 6.41), stosowanie łańcucha antypoślizgowego skutkowało wyższymi wartościami siły trakcyjnej w całym analizowanym zakresie poślizgu – wartość siły dla opony z łańcuchem była wyższa średnio o 17%. W zakresie najmniejszych poślizgów (0 – 3%) opona wyposażona w łańcuch charakteryzowała się większym tempem przyrostu siły trakcyjnej.



Rys. 6.41. Przebiegi siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na ściernisku w uprawie uproszczonej

Porównanie przebiegów siły trakcyjnej opony z łańcuchem i bez łańcucha na drodze leśnej przedstawiono na rysunku 6.42.



Rys. 6.42. Przebiegi siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na drodze leśnej

Zastosowanie łańcucha antypoślizgowego na drodze leśnej (rys. 6.42) skutkowało wyższymi wartościami siły trakcyjnej dopiero po przekroczeniu poślizgu równego 15%. Można przypuszczać, że taka sytuacja ma związek z wysoką wytrzymałością nawierzchni drogi (wysokie wartości zwięzłości i naprężeń ścinających). Przy niskich poślizgach nie dochodzi do uszkodzania wierzchniej warstwy drogi, w związku z czym wgłębne działanie elementów łańcucha jest ograniczone. Przy wyższych poślizgach dochodzi do naruszenia struktury drogi, w wyniku czego ostrogi łańcucha mogą się zagłębić. W konsekwencji, przy wyższym poślizgu wartość siły trakcyjnej opony wyposażonej w łańcuch jest wyższa niż opony bez łańcucha.

Ocenę wpływu stosowania łańcucha antypoślizgowego na wartości siły trakcyjnej poparto analizą statystyczną. Oceniona została zgodność rozkładu badanej cechy z rozkładem normalnym za pomocą testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; wyniki tego testu przedstawiono w tabeli 6.15.

Tabela 6.15. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Stosowanie łańcucha antypoślizgowego	z łańcuchem	0,959267	0,063891
	bez łańcucha	0,970404	0,200831

Z uwagi na to, że badana cecha w obu populacjach posiadała rozkład zgodny z normalnym konieczne było sprawdzenie drugiego warunku stosowalności testu parametrycznego – przeprowadzenie testu jednorodności wariancji Levene’a na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (tab. 6.16).

Tabela 6.16. Wyniki testu jednorodności wariancji (Levene’a) dla siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego

Zmienna	Wartość testu F	Prawdopodobieństwo p
Sprawność trakcyjna	2,308186	0,001386

Zgodnie uzyskanym wynikiem testu (wartość p mniejsza niż założony poziom istotności) są podstawy do odrzucenia hipotezy o jednorodności wariancji, zatem nie został spełniony drugi warunek stosowalności wieloczynnikowej analizy wariancji. Do oceny wpływu stosowania łańcucha antypoślizgowego na wartości siły trakcyjnej zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, którego wyniki przedstawiono w tabeli 6.17.

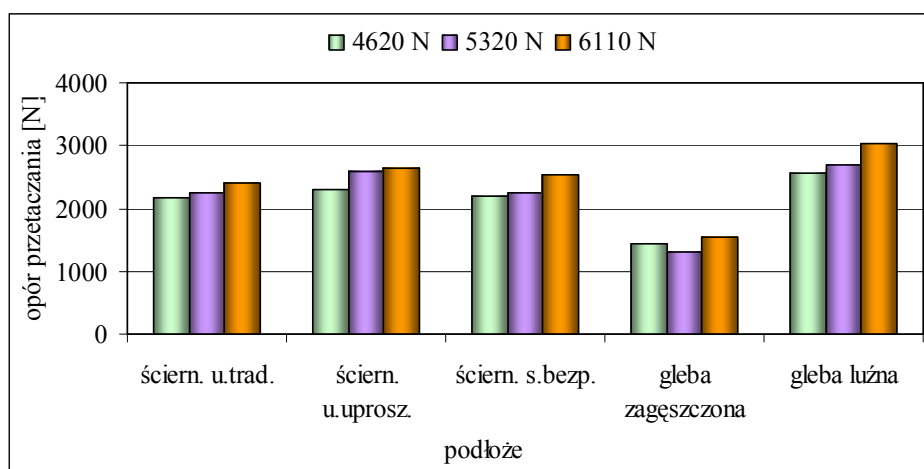
Tabela 6.17. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Stosowanie łańcucha antypoślizgowego	9,438593	0,0021

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w tabeli 6.17 stosowanie łańcucha antypoślizgowego miało istotny wpływ na wartości siły trakcyjnej.

Opór przetaczania

Zgodnie z przyjętą koncepcją badań wyznaczono oraz porównano wartości oporu przetaczania badanych opon na wszystkich analizowanych podłożach. Podobnie jak w I etapie badań opór ten był stanowiony przez sumę oporu przetaczania koła z badaną oponą oraz oporu kół ciągnika, z którym współpracowało stanowisko pomiarowe. Na rysunku 6.43 zestawiono średnie wartości oporu przetaczania opony 7.5-16 przy poślizgu z zakresu 0 – 30%.



Rys. 6.43. Średnie wartości oporu przetaczania opony 7.5-16 przy poślizgach 0 – 30% w II etapie badań

Z przedstawionego powyżej rysunku wynika, że najwyższe wartości oporu przetaczania występowały na glebie luźnej, zaś najniższe na glebie zagęszczonej. Przypuszczalnie taka sytuacja może mieć związek z różną wytrzymałością podłoża; na glebie zagęszczonej występowały najwyższe wartości zwężłości i naprężeń ścinających, co skutkowało mniejszą skłonnością tego podłoża. Na wszystkich podłożach z wyjątkiem gleby zagęszczonej zaobserwowano tendencję wzrostową wartości oporu

przetaczania na skutek zwiększania obciążenia pionowego koła – najwyższe wartości przyrostów wystąpiły na glebie luźnej.

Wartości oporu przetaczania opony 7.5-16 poddano analizie statystycznej. W celu określenia zgodności rozkładów w populacjach z rozkładem normalnym zastosowano test Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (tab. 6.18).

Tabela 6.18. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla oporu przetaczania opony 7.5-16 w II etapie badań

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Podłoże	śc. uprawa tradycyjna	0,990095	0,934010
	śc. uprawa uproszczona	0,964682	0,111735
	śc. siew bezpośredni	0,983703	0,669867
	gleba zagęszczona	0,917190	0,001172
	gleba luźna	0,969222	0,178118
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,974360	0,072022
	5320 N	0,968789	0,029076
	6110 N	0,987134	0,523886
Poślizg koła	5%	0,973289	0,378861
	10%	0,970002	0,289629
	15%	0,963021	0,159171
	20%	0,965972	0,205650
	25%	0,942346	0,026245
	30%	0,921739	0,004845

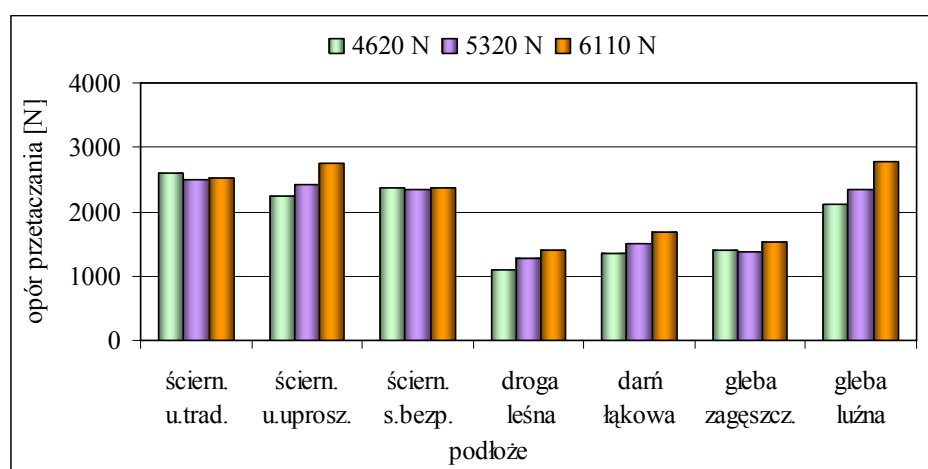
Przeprowadzona analiza wykazała, że w obrębie każdego czynnika występowała populacja, której rozkład nie był zgodny z rozkładem normalnym (wartość p niższa od założonego poziomu istotności α), toteż nie został spełniony warunek stosowania testu nieparametrycznego (wieloczynnikowej analizy wariancji). Do oceny wpływu czynników na wartość oporu przetaczania zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 6.19. Analiza wykazała, że rodzaj podłoża i poślizg koła miały istotny wpływ na wartości oporu przetaczania opony 7.5-16.

Tabela 6.19. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla oporu przetaczania opony 7.5-16 w II etapie badań

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rodzaj podłoża	109,2534	0,0004
Obciążenie pionowe koła	0,6077204	0,7380
Poślizg koła	62,21467	0,0008

Przeprowadzony test porównań wielokrotnych wykazał, że jedynie w przypadku ściernisk nie wystąpiły istotne różnice w wartościach oporu przetaczania. Brak różnic w wartościach oporu przetaczania przy różnych poziomach obciążenia pionowego tłumaczyć należy tym, że zmiany obciążenia pionowego dokonywane były jedynie na badanym kole, natomiast w oporze miał również udział opór kół ciągnika, z którym współpracowało stanowisko pomiarowe.

Wartości oporu przetaczania dla drugiej opony na wszystkich badanych podłożach i przy wszystkich poziomach obciążenia pionowego przedstawiono na rysunku 6.44.



Rys. 6.44. Średnie wartości oporu przetaczania opony 8.3-20 przy poślizgu 0 – 30%

Analizując dane przedstawione na powyższym rysunku można stwierdzić, że przy dwóch niższych poziomach obciążenia pionowego wyższe wartości oporu przetaczania wystąpiły na ścierniskach, natomiast przy najwyższym poziomie obciążenia najwyższe wartości oporu charakteryzowały glebę luźną. Wysokie wartości oporu na glebie luźnej i ścierniskach tłumaczyć można mniejszą wytrzymałością tych podłoży (opisywaną wartościami zwięzłości i naprężeń ścinających). Podłoże to odznaczało się mniejszymi wartościami zwięzłości niż gleba zagęszczona, droga oraz darń, toteż przypuszczać można, że zwiększony opór przetaczania miał związek z większą podatnością tego podłoża na odkształcanie. Potwierdzenie tej hipotezy można znaleźć również w przypadku drogi leśnej, na której wartości zwięzłości były najwyższe, a opór przetaczania najniższy.

Z uwagi na to, że opona 8.3-20 badana była na większej ilości podłoży niż opona 7.5-16 konieczne było przeprowadzenie osobnej analizy statystycznej. Analizę zgodności rozkładu oporu przetaczania opony 8.3-20 z rozkładem normalnym wykonano testem Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha=0,05$ (wyniki przedstawiono w tabeli 6.20).

Tabela 6.20. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla oporu przetaczania opony 8.3-20

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Podłoże	śc. uprawa tradycyjna	0,974825	0,311342
	śc. uprawa uproszczona	0,984744	0,719350
	śc. siew bezpośredni	0,969649	0,186021
	droga leśna	0,943827	0,013502
	darń łukowa	0,981073	0,547358
	gleba zagęszczona	0,952190	0,031014
	gleba luźna	0,954766	0,040278
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,965311	0,002552
	5320 N	0,978107	0,038650
	6110 N	0,982949	0,114094
Poślizg koła	5%	0,965148	0,071357
	10%	0,959041	0,034781
	15%	0,978974	0,354428
	20%	0,983663	0,568290
	25%	0,964568	0,066626
	30%	0,967006	0,088934

Zgodnie z danymi przedstawionymi w powyższej tabeli przy każdym z czynników można wyróżnić populację, która nie posiada rozkładu zgodnego z rozkładem normalnym. Z tego powodu nie jest możliwe zastosowanie wieloczynnikowej analizy wariancji do oceny wpływu czynników na wartość oporu przetaczania opony 8.3-20. Ocenę taką przeprowadzono z wykorzystaniem nieparametrycznego testu Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; wyniki przedstawiono w tabeli 6.21.

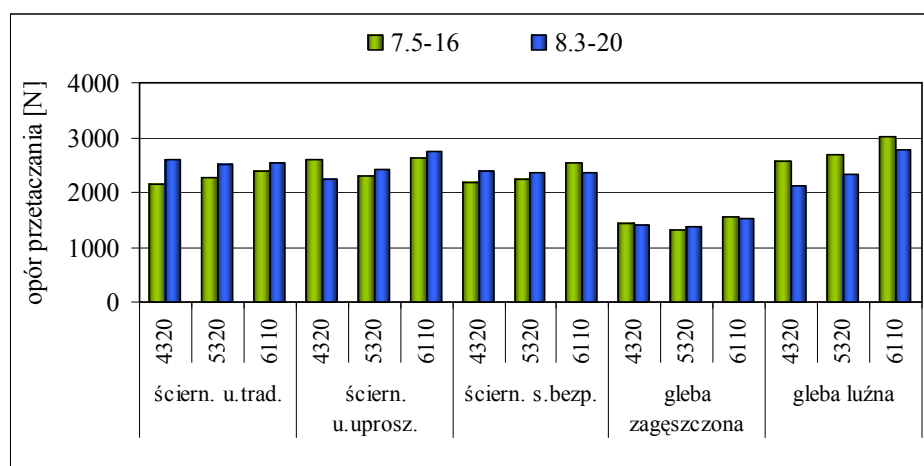
Tabela 6.21. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla oporu przetaczania opony 8.3-20

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rodzaj podłoża	197,5932	0,0001
Obciążenie pionowe koła	5,125073	0,0771
Poślizg koła	61,13846	0,0011

Analiza danych przedstawionych w tabeli 6.21 pozwala na stwierdzenie, że jedynie obciążenie pionowe nie miało wpływu na wartości oporu przetaczania. W teście porównań wielokrotnych dla pierwszego czynnika wykazano, że wartości oporu na wszystkich ścierniskach i na glebie luźnej nie różniły się istotnie, ponadto stwierdzono też brak różnic między glebą zagęszczoną, drogą i darnią. W przypadku drugiego czynnika nie

stwierdzono istotnych różnic między pierwszym a drugim poziomem obciążenia. W obrębie trzeciego czynnika analiza wykazała brak istotnych różnic w wartościach oporu przetaczania odpowiadającym zbliżonym wartościom poślizgu.

Wartości oporu przetaczania zostały wykorzystane do porównania obu badanych opon. Na rysunku 6.45 przedstawiono średnie wartości oporu przetaczania obliczone dla poślizgów z zakresu 0 – 30%. Zestawienie to nie uwzględnia wartości oporów na drodze leśnej i darni, ponieważ na tych podłożach badana była jedynie opona 8.3-20.



Rys. 6.45. Średnie wartości oporu przetaczania obu opon przy poślizgu 0 – 30%

Analizując wykres przedstawiony na powyższym rysunku stwierdzić można, że największe różnice w wartościach oporu przetaczania obu opon wystąpiły w przypadku gleby luźnej – na podłożu tym wyższymi wartościami oporu przetaczania charakteryzowała się opona 7.5-16 – taka sytuacja wystąpiła przy wszystkich trzech poziomach obciążenia pionowego. Odwrotną tendencję zaobserwowano na ściernisku w uprawie tradycyjnej, gdzie wyższe wartości oporu cechowały oponę 8.3-20. Najmniejsze różnice w wartościach oporu przetaczania obu opon wystąpiły na glebie zagęszczonej. Większymi zmianami wartości oporu przetaczania na skutek zmiany podłoża odznaczała się opona 7.5-16.

Ocenę wpływu rozmiaru opony na wartości oporu przetaczania poparto analizą statystyczną. Podobnie jak w poprzednich przypadkach określono zgodność rozkładu badanej cechy z rozkładem normalnym za pomocą testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; wyniki tego testu przedstawiono w tabeli 6.22. Z racji tego, że badana cecha nie posiadała rozkładu zgodnego z rozkładem normalnym (wartość p niższa od założonego poziomu istotności), do oceny wpływu czynnika zastosowano test

Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, którego wyniki przedstawiono w tabeli 6.23.

Tabela 6.22. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla oporu przetaczania obu badanych opon

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Rozmiar opony	7.5-16	0,987755	0,021600
	8.3-20	0,975112	0,000117

Tabela 6.23. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla oporu przetaczania obu badanych opon

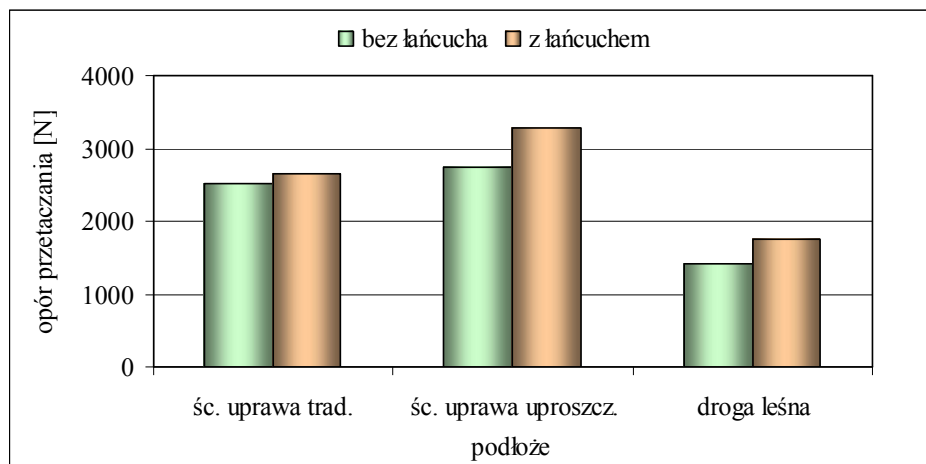
Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rozmiar opony	12,87517	0,0003

Zgodnie z powyższą tabelą wartość p jest niższa niż poziom istotności α , zatem są podstawy do odrzucenia hipotezy o braku wpływu czynnika na analizowaną cechę. Oznacza to, że rozmiar opony miał istotny wpływ na wartości oporu przetaczania.

Podobnie jak w przypadku badań I etapu, wartości zmierzonych oporów przetaczania różniły się od wyników przedstawianych w literaturze. W większości przypadków wartości te były wyższe od przedstawianych w innych pracach [Błaszkwicz, Szafarz 2006, 2009, Kolator 2006]. Analogicznie jak w przypadku I etapu badań pokreślić należy, że pomiar oporu przetaczania uwzględniał zarówno opór badanego koła, jak i kół ciągnika, będącego źródłem energii dla stanowiska, toteż zmierzona wartość była sumą oporu toczenia badanego koła i oporu kół ciągnika. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wartość oporu przetaczania zależy od obciążenia pionowego koła – w większości przypadków zwiększanie obciążenia skutkowało wzrostem oporu przetaczania. Taka sytuacja jest zgodna z wynikami przedstawianymi w literaturze; Perdok [1978] oraz Błaszkwicz i Szafarz [2009] również stwierdzili, że zwiększenie obciążenia koła skutkuje wzrostem oporu przetaczania. Zależność oporu przetaczania od rodzaju i stanu podłoża również jest zgodna z wynikami przedstawianymi w innych pracach; wykazywano, że na podłożach o mniejszej zwięzłości opór przetaczania jest większy [Perdok 1978, Botta i in. 2012].

Zgodnie z założoną koncepcją dokonano oceny wpływu stosowania łańcucha antypoślizgowego na wartości oporu przetaczania. Ocenę taką przeprowadzono jedynie na trzech podłożach (ściernisko w uprawie tradycyjnej, ściernisko w uprawie uproszczonej i droga leśna) przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego (6110 N). Na rysunku

6.46 zestawiono średnie wartości oporu przetaczania opony wyposażonej w łańcuch antypoślizgowy oraz opony bez takiego łańcucha. Wartości te zostały obliczone dla poślizgu z zakresu 0 – 30%.



Rys. 6.46. Średnie wartości oporu przetaczania opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego, przy poślizgu 0 – 30%

Analiza danych przedstawionych na powyższym rysunku pozwala stwierdzić, że stosowanie łańcucha antypoślizgowego skutkowało wzrostem wartości oporu przetaczania na wszystkich trzech podłożach. Największy wzrost wartości oporu (o 24%) wystąpił w przypadku drogi leśnej, na ścierniskach przyrosty te wyniosły 5% w uprawie tradycyjnej i 19% w uprawie uproszczonej. Przypuszczalnie, duży przyrost wartości oporu przetaczania na drodze leśnej tłumaczyć można w ten sposób, że na podłożu tym wgłębne działanie łańcucha antypoślizgowego było ograniczone z powodu dużej wytrzymałości tego podłoża. Ogniwa łańcucha utrudniały w tym przypadku toczenie opony i powodowały jej większą deformację promieniową zwiększając tym samym opór przetaczania. W przypadku podłoży o mniejszej wytrzymałości zwiększenie oporu przetaczania miało związek z zagłębianiem się elementów łańcucha w podłoże.

Powyższa ocena została zweryfikowana analizą statystyczną. W tabeli 6.24 przedstawiono wyniki testu zgodności rozkładów badanej cechy z rozkładem normalnym.

Tabela 6.24. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla oporu przetaczania opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Stosowanie łańcucha antypoślizgowego	z łańcuchem	0,972583	0,249903
	bez łańcucha	0,953645	0,035939

Zgodnie z uzyskanym wynikiem testu w jednej z populacji nie stwierdzono zgodności z rozkładem normalnym, zatem do oceny wpływu stosowania łańcucha na wartości oporu przetaczania zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (tab. 6.25).

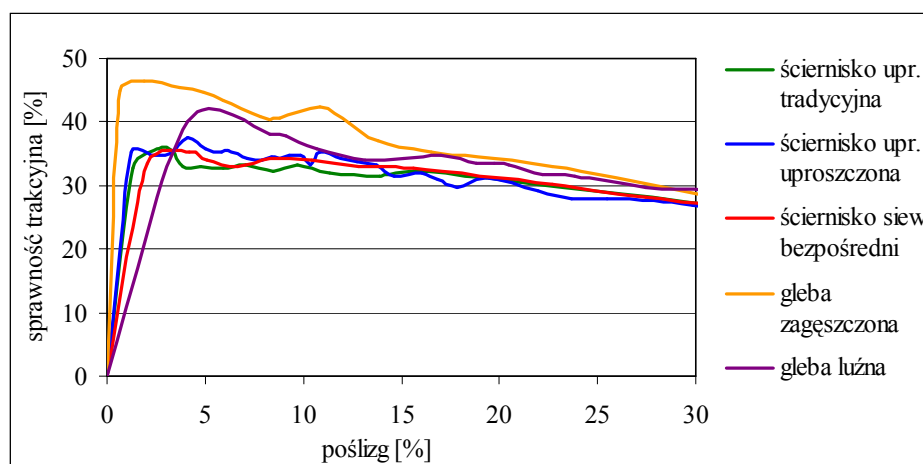
Tabela 6.25. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla oporu przetaczania opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Stosowanie łańcucha antypoślizgowego	7,144105	0,0075

Przedstawiona w powyższej tabeli wartość p jest niższa od założonego poziomu α , zatem stwierdzić można, że stosowanie łańcucha antypoślizgowego miało istotny wpływ na wartości oporu przetaczania opony 8.3-20.

Sprawność trakcyjna

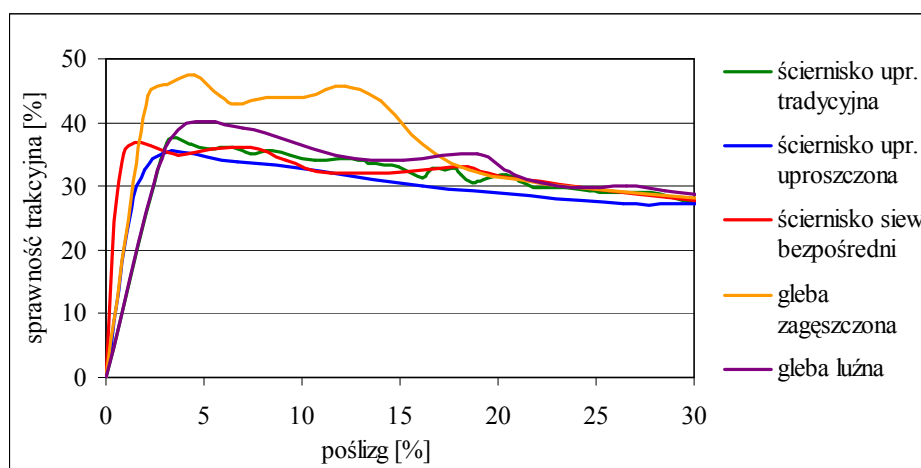
Analogicznie jak w I etapie badań wyznaczono sprawność trakcyjną opon, czyli parametr, który opisuje jaką część mocy dostarczanej do koła została wykorzystana w postaci siły uciągu. Znajomość wartości poślizgu i sprawności trakcyjnej pozwoliła na graficzne przedstawienie zależności tych dwóch parametrów, podobnie jak to miało miejsce w przypadku siły trakcyjnej. Zależność sprawności trakcyjnej od poślizgu dla opony 7.5-16 na wszystkich badanych podłożach przy najniższym poziomie obciążenia przedstawiono na rysunku 6.47.



Rys. 6.47. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N

Analizując przedstawione przebiegi zauważyć można, że w prawie całym rozpatrywanym zakresie poślizgu wyższe wartości sprawności trakcyjnej dotyczyły gleby zagęszczonej. W przypadku tego podłoża wystąpił ponadto największy przyrost sprawności przy niskich wartościach poślizgu; maksymalna wartość sprawności wystąpiła przy poślizgu około 2%. Nieco niższe wartości sprawności trakcyjnej zaobserwowano na glebie luźnej; na tym podłożu maksymalna wartość sprawności występowała przy poślizgu równym 5%. Rozpatrując przebiegi sprawności na ścierniskach stwierdzić można, że we wszystkich technologiach uprawy charakter zmian sprawności był zbliżony; maksymalne wartości sprawności występowały przy poślizgach 4 – 5%. Przebieg sprawności w siewie bezpośrednim odznaczał się nieco wolniejszym przyrostem i mniejszą wartością maksymalną.

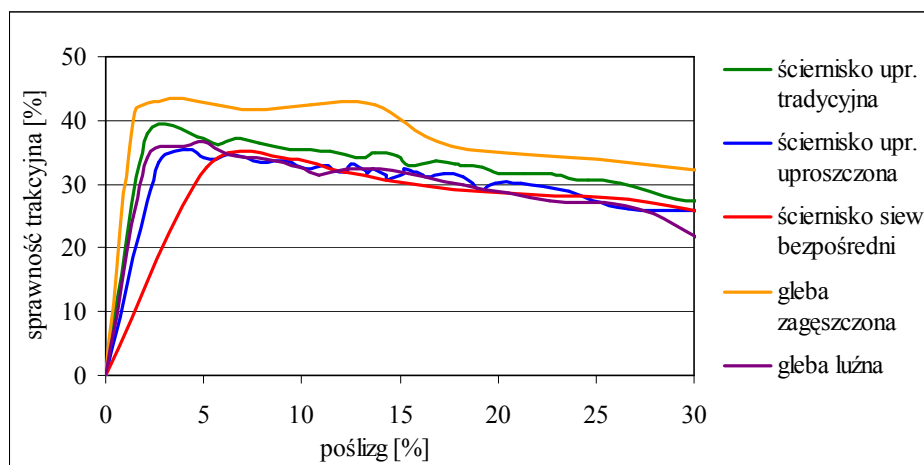
Przebiegi sprawności trakcyjnej opony 7.50-16 dla drugiego poziomu obciążenia pionowego zobrazowano na rysunku 6.48.



Rys. 6.48. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N

Przy wyższym poziomie obciążenia (rys. 6.48) zaobserwować można, że najwyższymi wartościami sprawności trakcyjnej odznaczała się ponownie gleba zagęszczona. Jednak przebieg sprawności w przypadku tego podłoża ma nieco inny kształt niż przy niższym poziomie obciążenia; w szerokim zakresie poślizgu (5 – 14%) wartość sprawności jest ustabilizowana. Największy przyrost sprawności przy niskich wartościach poślizgu wystąpił na ściernisku w siewie bezpośrednim, zaś najmniejszy na glebie luźnej. Ponadto, zauważyć można, że wartości sprawności na ściernisku w uprawie tradycyjnej były nieco wyższe niż miało to miejsce w przypadku ścierniska w uprawie uproszczonej.

Na rysunku 6.49 dokonano zestawienia przebiegów sprawności opony 7.5-16 przy najwyższym poziomie obciążenia.



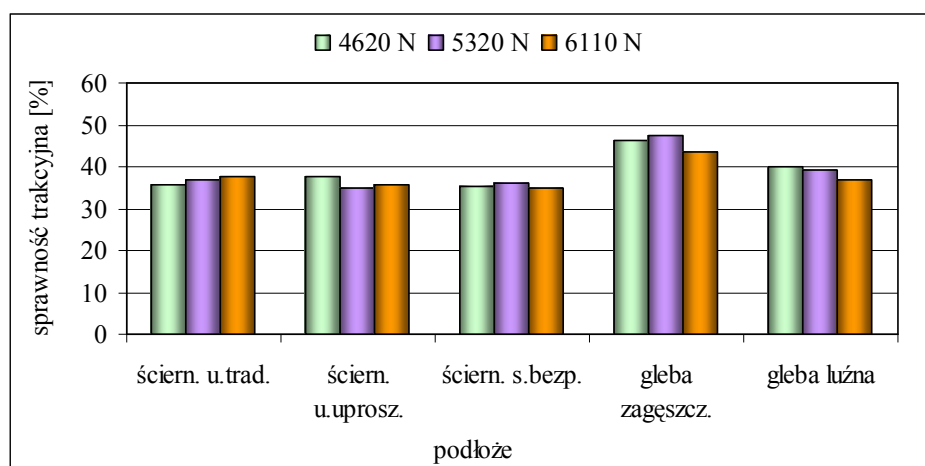
Rys. 6.49. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N

Zastosowanie najwyższego poziomu obciążenia skutkuje większą dysproporcją pomiędzy wartościami sprawności na glebie zagęszczonej i pozostałych podłożach. Wartości sprawności na glebie zagęszczonej były najwyższe w całym rozpatrywanym zakresie poślizgów, na tym też podłożu stwierdzono największy początkowy przyrost sprawności. Ponadto zaobserwować można różnice pomiędzy przebiegami sprawności na ściernisku w siewie bezpośrednim i ścierniskach w pozostałych dwóch systemach uprawowych – w przypadku siewu bezpośredniego wystąpił najmniejszy przyrost sprawności – maksymalna wartość została osiągnięta przy poślizgu 6%.

Ogólny charakter zmian sprawności trakcyjnej odpowiada wynikom przedstawianym w dostępnej literaturze. Inni autorzy wykazywali, że sprawność trakcyjna odznacza się szybkim wzrostem przy niskich wartościach poślizgu aż do osiągnięcia wartości maksymalnej. Po osiągnięciu tej wartości występuje zazwyczaj powolny spadek sprawności [Grisso i in. 1992, Zoz i in. 2003, Wulfsohn, Way 2009, Rosca i in. 2004b]. Charakter zmian wartości sprawności na ścierniskach jest zbliżony do wyników przedstawianych przez Bashforda i in. [1993, 1999] – w pracy tej wykazano, że maksymalne wartości sprawności trakcyjnej występowały przy poślizgach nieprzekraczających 8%, co jest zgodne z przebiegami przedstawianymi w niniejszej pracy. Natomiast w pracy Jenane, Bashford [1995] oraz Simikić i in. [2012] maksymalne wartości sprawności na ścierniskach odpowiadały wyższym poślizgom (10 – 15%). Analizując przebiegi sprawności na glebach zauważyć można, że część autorów

wykazywała, iż maksymalna wartość sprawności trakcyjnej osiągana była przy wyższych poślizgach; w pracach Grisso i in. [1992], Bashford i in. [1987], Wulfsohn i in. [1988] maksymalna sprawność trakcyjna na glebach występuje przy poślizgach 10 – 15%, spotkać się też można z sytuacjami, gdy maksimum sprawności jest osiągane przy poślizgach 20 - 30% [Musonda i in. 1989, Jenane, Bashford 1995, Xu i in. 1991, Senatore, Sandu 2011b].

Zestawienie maksymalnych wartości sprawności trakcyjnych opony 7.50-16 przy wszystkich trzech poziomach obciążenia pionowego przedstawiono na rysunku 6.50.

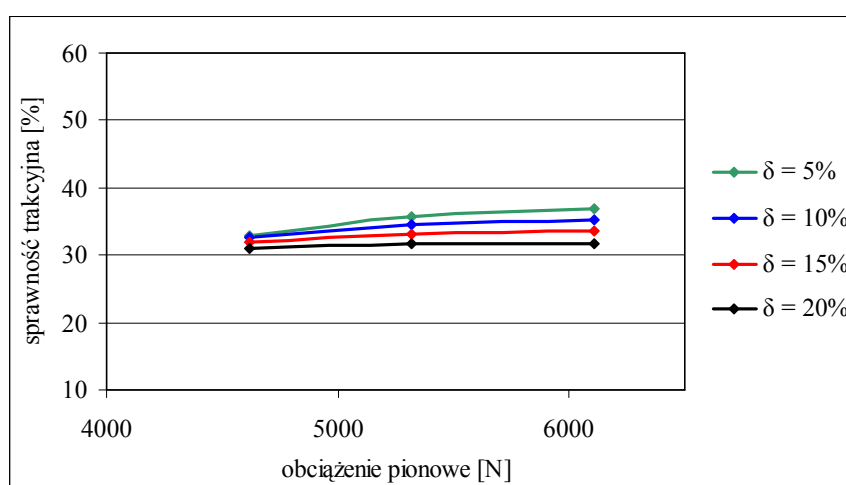


Rys. 6.50. Maksymalne wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań

Na podstawie powyższego zestawienia stwierdzić można, że najwyższe wartości sprawności trakcyjnej osiągnięte zostały na glebie zagęszczonej. W porównaniu z innymi podłożami gleba zagęszczona odznaczała się stosunkowo wysoką zwięzłością i najwyższymi wartościami naprężeń ścinających (rys. 6.12, 6.13). Z tego względu można przypuszczać, że wyższe sprawności osiągane na tym podłożu są efektem mniejszych strat związanych z deformacją pionową. Potwierdzenie tego przypuszczenia można znaleźć również w wartościach oporu przetaczania opony 7.5-16 (rys. 6.43) – w przypadku gleby zagęszczonej wartości te były najmniejsze. Na ścierniskach nie zaobserwowano różnic w wartościach sprawności trakcyjnej w poszczególnych systemach uprawowych. Ponadto na żadnym z podłoży nie zauważono wyraźnej tendencji zmian sprawności trakcyjnej na skutek zwiększania obciążenia pionowego koła. W literaturze można znaleźć potwierdzenie zależności wyższej sprawności na bardziej wytrzymałych podłożach [Jenane, Bashford 1995, 2000, Zoz i in. 1999, Jenane i in. 1996, Lee, Kim 1997, Zoz i in. 2003, Wolf i in. 1996, Grisso i in. 1992, Senatore Sandu 2011b]. Porównując różnice w wartościach sprawności w poszczególnych technologiach uprawy również znaleźć można analogię do wyników uzyskanych przez innych badaczy [Jenane, Bashford 1995,

Bashford 1993, Simikić i in. 2012]. W większości prac wartości sprawności są wyższe niż uzyskane w przypadku niniejszych wyników. Prawdopodobnie jest to spowodowane tym, że obciążeniem dla stanowiska badawczego był ciągnik, toteż na opór ruchu stanowiska badawczego składał się opór przetaczania badanych opon oraz opór kół ciągnika. Ponadto wyniki przedstawiane w literaturze dotyczyły badań opon o większych średnicach i przy wyższych obciążeniach pionowych.

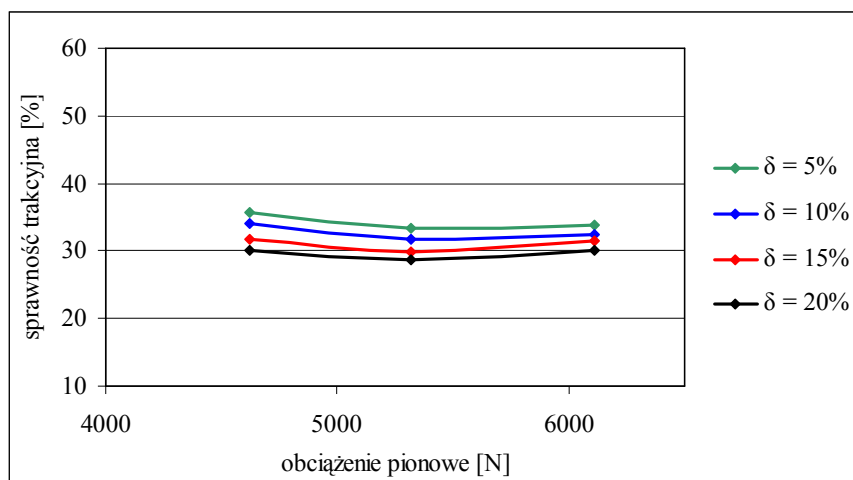
Analogicznie jak przy omawianiu siły trakcyjnej, w przypadku sprawności dokonano zestawień tego parametru przy różnych wartościach obciążenia i poślizgu. Zestawienie takie dla ścierniska w uprawie tradycyjnej przedstawiono na rysunku 6.51.



Rys. 6.51. Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej

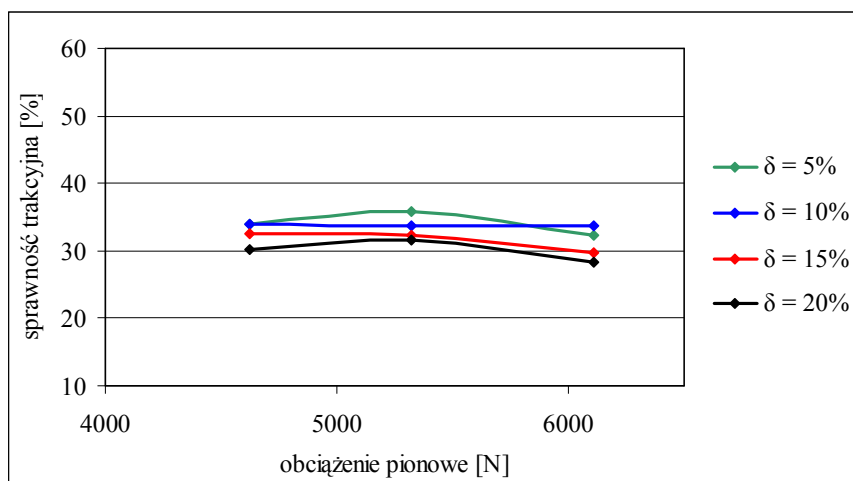
Analiza powyższego zestawienia pozwala na stwierdzenie, że wyższe wartości sprawności występowały przy niższych wartościach poślizgu. Ponadto, przy niższych poziomach obciążenia pionowego wystąpiły mniejsze różnice w wartościach sprawności przy poszczególnych poślizgach. Zwiększanie obciążenia pionowego skutkowało większymi zmianami sprawności trakcyjnej przy niskich wartościach poślizgu; w przypadku poślizgu 5% pierwsze zwiększenie obciążenia spowodowało wzrost sprawności o 3 punkty procentowe (9%), dalsze zwiększenie obciążenia skutkowało natomiast wzrostem o 1 punkt procentowy (3%). Nieco mniejsze wartości przyrostów można było zaobserwować przy poślizgach 10 i 15%. Przy największym poślizgu zmiana obciążenia skutkowałą niewielką zmianą sprawności trakcyjnej (różnice poniżej 3%).

Na rysunku 6.52 zilustrowano zestawienie wartości sprawności trakcyjnej na ściernisku w uprawie uproszczonej.



Rys. 6.52. Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie uproszczonej

Charakter zmian sprawności przedstawiony na powyższym rysunku jest odmienny niż w poprzednio omawianym przypadku. Największe różnice w wartościach sprawności przy poszczególnych poślizgach wystąpiły przy najniższym poziomie obciążenia pionowego. Zwiększenie obciążenia pionowego z 4620 do 5320 N skutkowało spadkiem wartości sprawności przy wszystkich poślizgach, natomiast dalsze zwiększanie obciążenia powodowało niewielkie przyrosty analizowanego parametru.

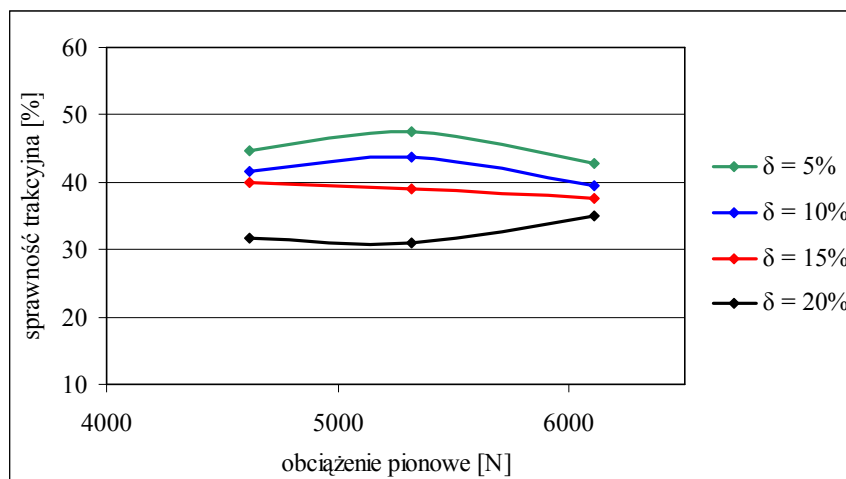


Rys. 6.53. Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w siewie bezpośrednim

W przypadku ostatniego ze ściernisk (zestawienie na rysunku 6.53) najniższe wartości sprawności występowały przy poślizgach 15 i 20%. W przypadku poślizgów 5 i 10% wartość sprawności była zależna od poziomu obciążenia pionowego; przy najniższym obciążeniu wartości sprawności przy poślizgach 5 i 10% były takie same.

Po zwiększeniu obciążenia do 5320 N wyższa wartość sprawności wystąpiła przy poślizgu 5%, natomiast przy najwyższym obciążeniu pionowym sytuacja uległa odwróceniu.

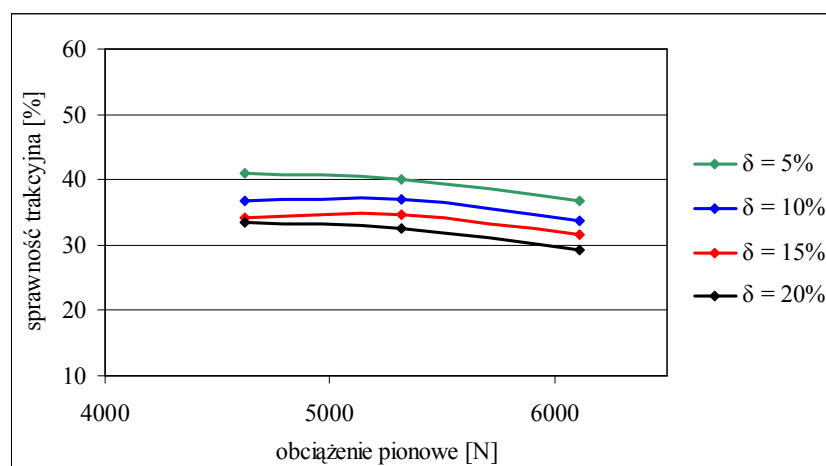
Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.50-16 na glebie zagęszczonej przedstawiono na rysunku 6.54.



Rys. 6.54. Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie zagęszczonej

Na podstawie powyższego zestawienia można stwierdzić, że charakter zmian sprawności na skutek zmiany obciążenia pionowego zależny był od wartości poślizgu. Przy poślizgach 5 i 10% zwiększenie obciążenia z 4620 do 5320 N powodowało wzrost sprawności (w obu przypadkach o 6%), dalsze zwiększanie obciążenia skutkowało spadkiem sprawności do wartości niższej niż przy obciążeniu 4620 N. Przy poślizgu równym 15% obydwie zmiany obciążenia spowodowały spadek sprawności trakcyjnej. Przy najwyższym poślizgu pierwsze zwiększenie obciążenia skutkowało spadkiem sprawności o 1 punkt procentowy (3%), a zastosowanie najwyższego poziomu obciążenia oznaczało wzrost o 4 punkty procentowe (13%).

Na glebie luźnej (zestawienie na rysunku 6.55), podobnie jak w przypadku gleby zagęszczonej, wyższe wartości sprawności występowały przy niskich poślizgach. Odmienny jednak był charakter zmian analizowanego parametru na skutek zmiany obciążenia pionowego; pierwsze zwiększenie obciążenia oznaczało minimalne zmiany wartości sprawności bądź ich brak, natomiast zastosowanie najwyższego poziomu obciążenia skutkowało zawsze spadkiem wartości analizowanego parametru, przy czym wartości spadków nie przekraczały 4 punktów procentowych. Istotny jest przy tym fakt, że przy wszystkich wartościach poślizgu charakter zmian sprawności na skutek zwiększania obciążenia był podobny.



Rys. 6.55. Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie luźnej

W celu określenia wpływu poszczególnych czynników na wartości sprawności trakcyjnej konieczne było dokonanie analizy statystycznej. W tabeli 6.26 przedstawiono wyniki testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Tabela 6.26. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Podłoże	śc. uprawa tradycyjna	0,944561	0,014508
	śc. uprawa uproszczona	0,983026	0,637695
	śc. siew bezpośredni	0,992770	0,985396
	gleba zagęszczona	0,966634	0,136640
	gleba luźna	0,984981	0,730538
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,967464	0,023503
	5320 N	0,955997	0,003999
	6110 N	0,947429	0,001165
Poślizg koła	5%	0,858596	0,000061
	10%	0,906535	0,001523
	15%	0,931849	0,010908
	20%	0,877225	0,000199
	25%	0,906046	0,001469
	30%	0,890794	0,000496

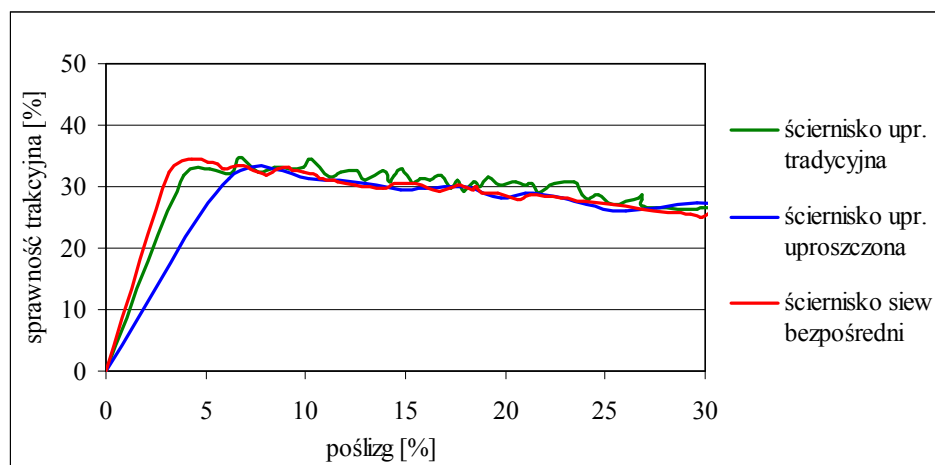
Zgodnie z uzyskanym wynikiem testu nie został spełniony pierwszy warunek stosowalności testów parametrycznych, toteż ocenę wpływu czynników na wartość sprawności przeprowadzono z wykorzystaniem nieparametrycznego testu Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; wyniki zestawiono w tabeli 6.27.

Tabela 6.27. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rodzaj podłoża	62,50050	0,0007
Obciążenie pionowe koła	1,610907	0,4469
Poślizg koła	137,5878	0,0002

Analizując wyniki przedstawione w powyższej tabeli stwierdzić można, że rodzaj podłoża oraz poślizg koła miały istotny wpływ na wartości sprawności trakcyjnej, nie stwierdzono natomiast istotnego wpływu obciążenia pionowego. Na podstawie testu porównań wielokrotnych wykazano, że istotne różnice w wartościach sprawności wystąpiły między glebą zagęszczoną a wszystkimi pozostałymi podłożami. Test porównań wielokrotnych dla poślizgu wykazał natomiast, że jedynie przy sąsiadujących wartościach poślizgu nie występowały różnice w wartościach sprawności trakcyjnej.

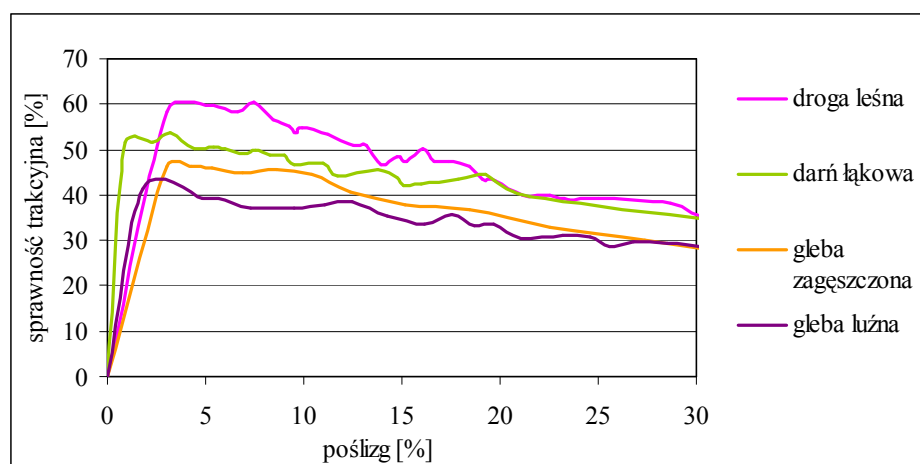
W przypadku opony 8.3-20 analogicznie jak dla opony 7.5-16 sporządzono przebiegi sprawności w funkcji poślizgu. Na rysunku 6.56 przedstawiono przebieg dotyczący ściernisk, przy najniższym poziomie obciążenia pionowego.



Rys. 6.56. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N na ścierniskach

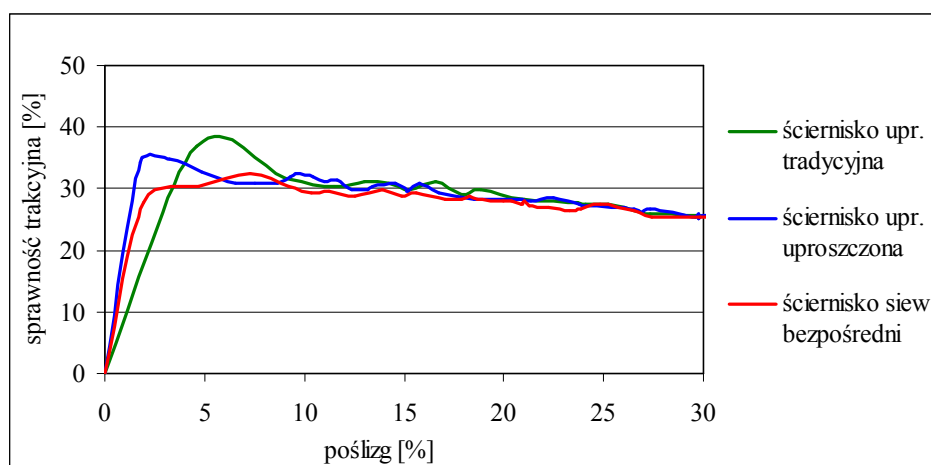
Analizując przebieg przedstawiony na powyższym rysunku zaobserwować można, że różnice w wartościach sprawności na analizowanych podłożach wystąpiły jedynie przy poślizgach z zakresu 0 – 8%. Największy przyrost sprawności wystąpił na ściernisku w siewie bezpośrednim, zaś najwolniejszy – w uprawie uproszczonej. Wartości maksymalne sprawności we wszystkich trzech przypadkach były zbliżone. Różnica dotyczyła jednak poślizgu, przy którym one występowały. Po przekroczeniu poślizgu 8%

wartości sprawności w poszczególnych systemach uprawowych utrzymywały się na zbliżonym poziomie.



Rys. 6.57. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N na drodze, darni oraz glebach

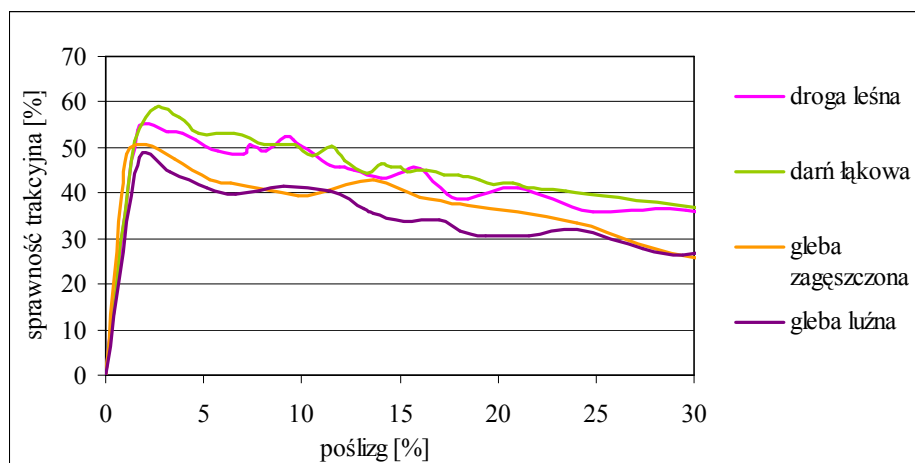
Z powyższego przebiegu wynika, że na wszystkich tych podłożach wartości sprawności były odmienne. W zakresie najmniejszych poślizgów (0 – 3%) największy przyrost wartości sprawności wystąpił na darni łukowej zaś najmniejszy na glebie zagęszczonej. Wartości maksymalne sprawności występowały przy poślizgach z zakresu 3 – 4%, najwyższa maksymalna wartość sprawności dotyczyła drogi gruntowej. Najniższe wartości sprawności stwierdzono na glebie luźnej.



Rys. 6.58. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N na ścierniskach

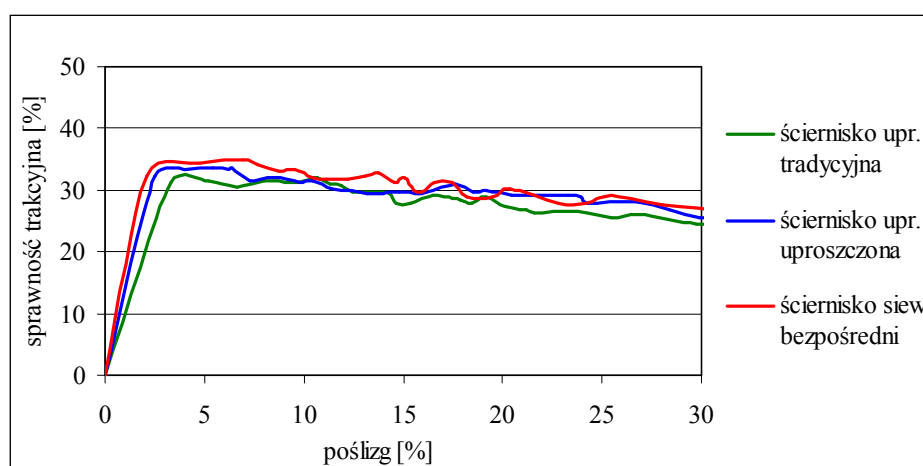
Przy wyższym poziomie obciążenia pionowego (rys. 6.58) różnice w wartościach sprawności na ścierniskach wystąpiły przy poślizgach z zakresu 0 – 9%. Najwolniejszym

przyrostem, lecz największą wartością maksymalną charakteryzowało się ściernisko w uprawie tradycyjnej. Najmniejsze wartości sprawności wystąpiły w przypadku ścierniska w siewie bezpośrednim. Ściernisko w uprawie uproszczonej charakteryzowało się natomiast największym przyrostem początkowym.



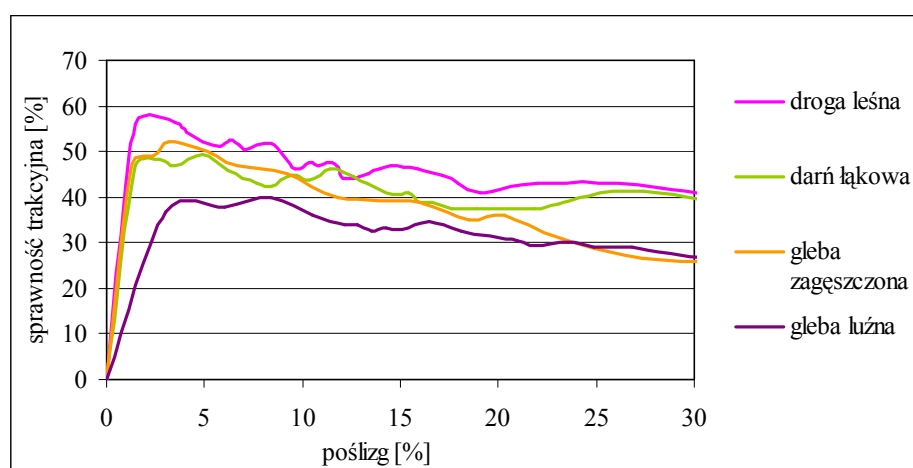
Rys. 6.59. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N na drodze, darni oraz glebach

Na pozostałych podłożach przy wyższym poziomie obciążenia (rys. 6.59) można zaobserwować mniejsze różnice w wartościach sprawności niż miało to miejsce przy niższym poziomie obciążenia. Tempo przyrostu początkowego na wszystkich czterech podłożach było zbliżone. Maksymalne wartości sprawności wystąpiły w wąskim zakresie poślizgów 2 - 3%. Po ustabilizowaniu się przebiegów wyższe wartości sprawności dotyczyły drogi leśnej oraz darni.



Rys. 6.60. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N na ścierniskach

Przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego na ścierniskach (rys. 6.60), charakter zmian sprawności we wszystkich systemach uprawowych był zbliżony, nieco mniejszym przyrostem początkowym charakteryzowało się ściernisko w uprawie tradycyjnej. W przypadku ścierniska w uprawie uproszczonej i siewie bezpośrednim maksymalne wartości sprawności występowały przy poślizgach z zakresu 3 – 7%.

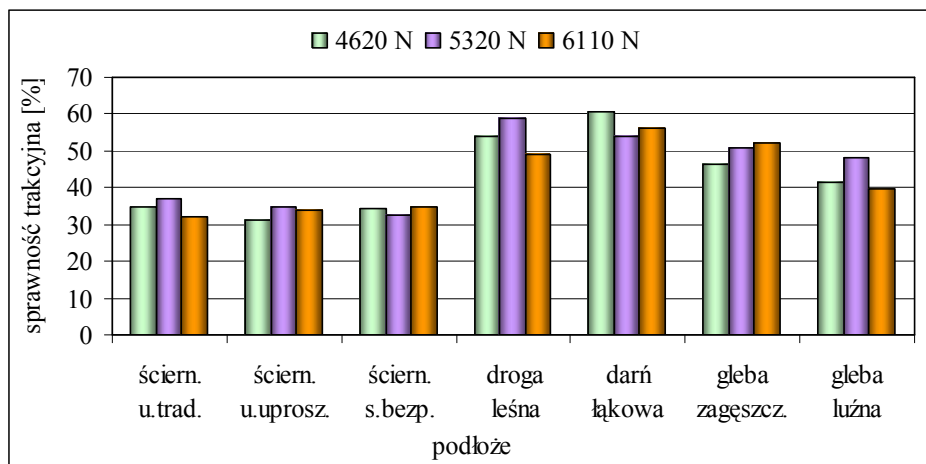


Rys. 6.61. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N na drodze, darni oraz glebach

Zależności pomiędzy wartościami sprawności przy najwyższym poziomie obciążenia na pozostałych podłożach (przebieg na rysunku 6.61) są odmienne niż w poprzednich przypadkach. Wyraźnie niższe wartości oraz najwolniejszy przyrost początkowy dotyczyły gleby luźnej. W przypadku pozostałych trzech położy tempo przyrostów przy niskich wartościach poślizgu było zbliżone. Największe wartości sprawności wystąpiły w przypadku drogi gruntowej, na tym też podłożu maksymalną wartość sprawności uzyskano przy najniższym poślizgu (2%).

Przedstawiony charakter zmian sprawności trakcyjnej jest w pewnym tylko stopniu zgodny z wynikami przedstawianymi w literaturze, podobnie jak miało to miejsce w przypadku opony 7.5-16. O ile ogólny charakter zmian sprawności (przyrost przy niskich poślizgach a następnie spadek, po osiągnięciu wartości maksymalnej) jest zgodny z przedstawianymi wynikami [Zoz i in. 2003, Wulfsohn, Way 2009, Rosca i in. 2004b], to różne są wartości poślizgu, przy którym występuje sprawność maksymalna. W niektórych pracach wykazano bowiem, że maksymalna sprawność trakcyjna występowała przy poślizgach przekraczających 10%, a nawet 20% [Jenane, Bashford 1995, Simikić i in. 2012, Musonda i in. 1989, Jenane, Bashford 1995, Senatore, Sandu 2011b].

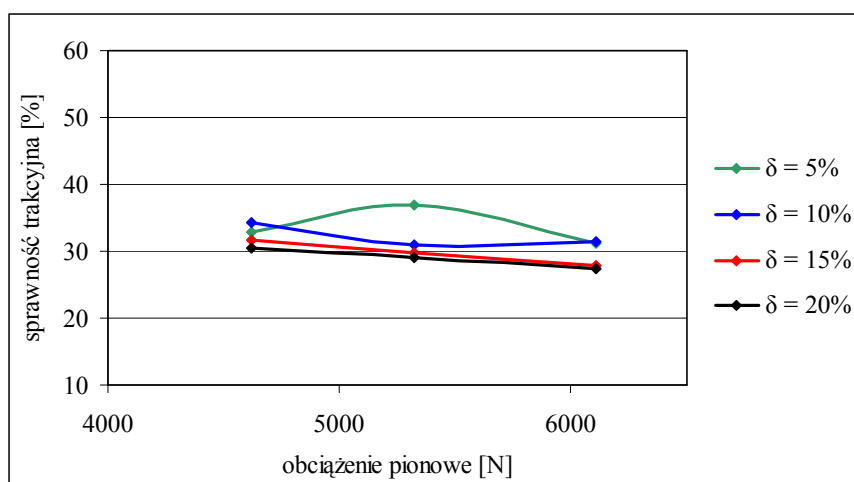
Podobnie jak to miało miejsce w przypadku opony 7.5-16 dokonano zestawienia maksymalnych wartości sprawności na wszystkich podłożach, przy trzech poziomach obciążenia pionowego. Zestawienie to zilustrowano na rysunku 6.62.



Rys. 6.62. Maksymalne wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20

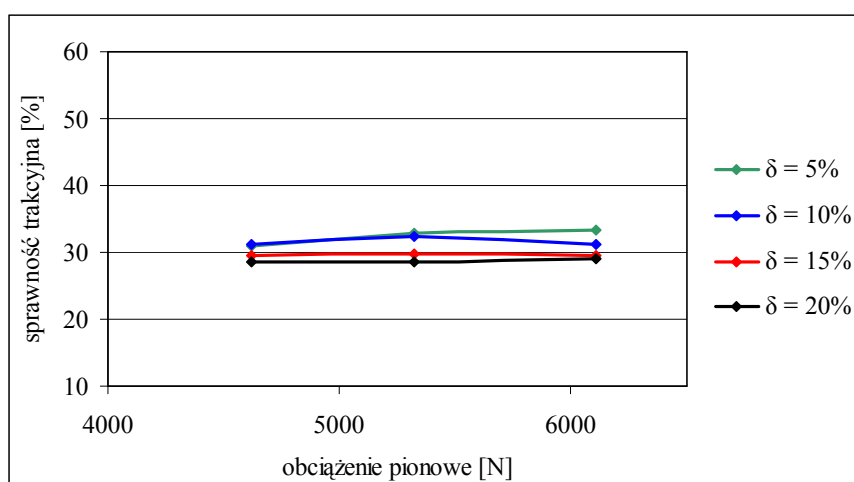
Analizując powyższe zestawienie zaobserwować można, że wyższe wartości sprawności trakcyjnej występowały na drodze, darni oraz glebie zagęszczonej. Podłoża te odznaczały się wyższą wytrzymałością (wykresy na rysunkach 6.12, 6.13) oraz mniejszymi oporami przetaczania (rysunek 6.44), z związku z czym zasadne wydaje się stwierdzenie, że wartość sprawności była w dużej mierze zależna od energii traconej na deformację pionową podłoża. Taka zależność jest analogiczna jak w przypadku opony 7.5-16 i zgodna z wynikami przedstawianymi w literaturze [Jenane, Bashford 1995, 2000, Zoz i in. 1999, Jenane i in. 1996, Lee, Kim 1997, Zoz i in. 2003, Wolf i in. 1996, Grisso i in. 1992, Senatore, Sandu 2011a]. Analizując wpływ obciążenia pionowego na wartości sprawności zaobserwować można, że jedynie na ściernisku w siewie bezpośrednim i glebie zagęszczonej zwiększanie obciążenia powodowało wzrost sprawności. Odwrotna tendencja wystąpiła na darni łąkowej. Podobnie jak w przypadku opony 7.5-16 nie stwierdzono wyraźnych różnic w wartościach sprawności na ścierniskach w poszczególnych systemach uprawowych. Nie stwierdzono również jednolitego wpływu zmiany obciążenia pionowego na wartości sprawności; jedynie w przypadku gleby zagęszczonej obydwa zwiększenia obciążenia skutkowały wzrostami wartości sprawności.

W przypadku opony 8.3-20 dokonano zestawień wartości sprawności trakcyjnej przy różnych poślizgach i obciążeniach pionowych, analogicznie jak w przypadku opony 7.5-16. Na rysunku 6.63 przedstawiono wartości sprawności na ściernisku w uprawie tradycyjnej.



Rys. 6.63. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej

W przypadku opony 8.3-20 na ściernisku w uprawie tradycyjnej pierwsze zwiększenie obciążenia przy najmniejszym poślizgu skutkowało wzrostem wartości sprawności, dalsze zwiększanie obciążenia powodowało spadek analizowanego parametru. Przy poślizgu równym 10% zwiększenie obciążenia z 4620 do 5320 N spowodowało spadek sprawności o 4 punkty procentowe (12%), natomiast zastosowanie obciążenia 6110 N nie spowodowało zmiany sprawności. Przy wyższych poślizgach (15 i 20%) obydwa przyrosty obciążenia pionowego skutkowały spadkami sprawności trakcyjnej, przy czym wartość tych spadków nie przekraczała 2 punktów procentowych.

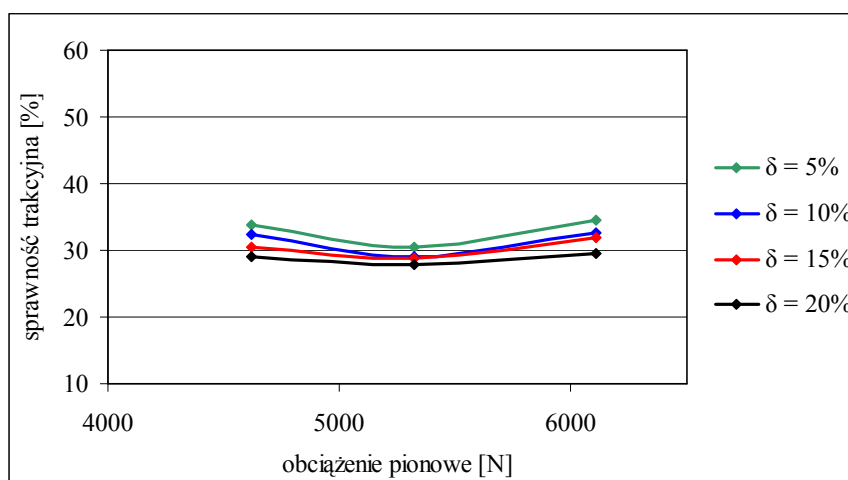


Rys. 6.64. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie uproszczonej

Na ściernisku w uprawie uproszczonej (rys. 6.64) różnice pomiędzy wartościami sprawności trakcyjnych przy poszczególnych poślizgach są niewielkie, zwłaszcza przy

najmniejszym poziomie obciążenia pionowego. Przy poślizgach 15 i 20% zwiększanie obciążenia pionowego praktycznie nie powodowało zmian sprawności trakcyjnej. W przypadku poślizgu 5% pierwsze zwiększenie obciążenia skutkowało niewielkim wzrostem sprawności kolejne zwiększenie obciążenia nie spowodowało zmiany wartości sprawności. Podobna sytuacja wystąpiła przy poślizgu 10%.

Wartości sprawności przy różnych obciążeniach pionowych i poślizgach na ostatnim ze ściernisk przedstawiono na rysunku 6.65.

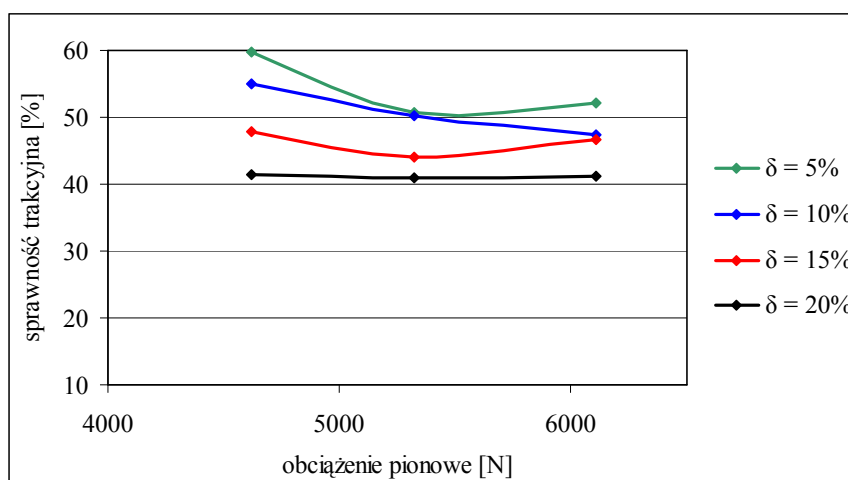


Rys. 6.65. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w siewie bezpośrednim

Analiza powyższego rysunku pozwala stwierdzić, że przy wszystkich wartościach poślizgów charakter zmian sprawności na skutek zmiany obciążenia był zbliżony. Zwiększenie obciążenia z 4620 do 5320 N powodowało spadek sprawności (największy przy poślizgu 5%), natomiast dalsze dociążanie oznaczało wzrost sprawności do wartości odpowiadających pierwszemu poziomowi obciążenia pionowego.

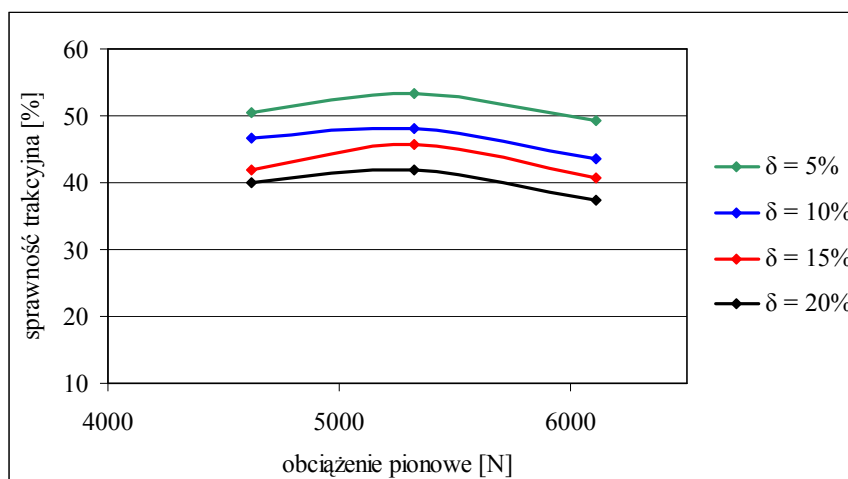
Sprawności opony 8.3-20 na drodze leśnej przy różnych poślizgach i obciążeniach pionowych przedstawiono na rysunku 6.66. W tym przypadku wartości oraz charakter zmian sprawności trakcyjnej były odmienne niż miało to miejsce w przypadku ściernisk. Widoczne są większe różnice w wartościach sprawności w obrębie tego samego obciążenia i różnych poślizgów. Przy poślizgu 5% zwiększanie obciążenia z 4620 do 5320 N skutkowało spadkiem sprawności o 9 punktów procentowych (15%) dalsze zwiększanie obciążenia spowodowało wzrost sprawności o 1 punkt procentowy (2%). W przypadku poślizgu 10% obydwie zwiększenia obciążenia pionowego powodowały spadek wartości

sprawności (kolejno o 8 i 6%). Najmniejsze zmiany sprawności na skutek zmian obciążenia pionowego zaobserwowano przy poślizgach 15 i 20%.



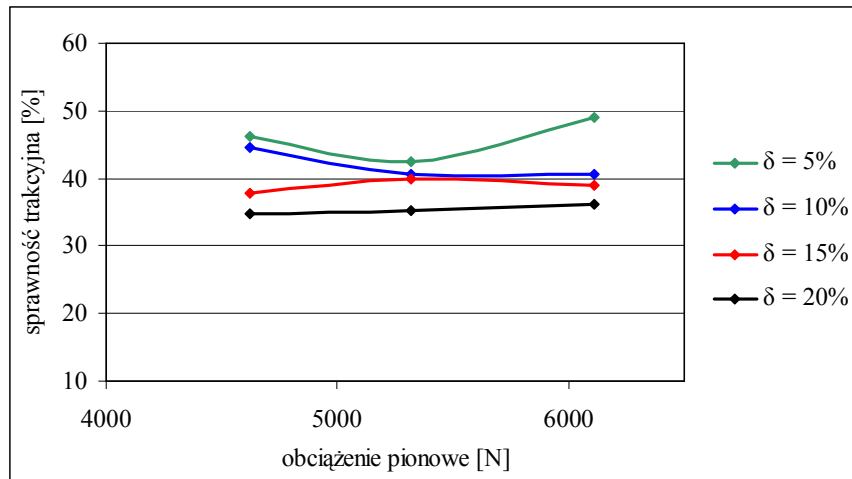
Rys. 6.66. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na drodze leśnej

Zestawienie sprawności trakcyjnych opony 8.3-20 na podłożu zadarnionym przedstawiono na rysunku 6.67.



Rys. 6.67. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na darni

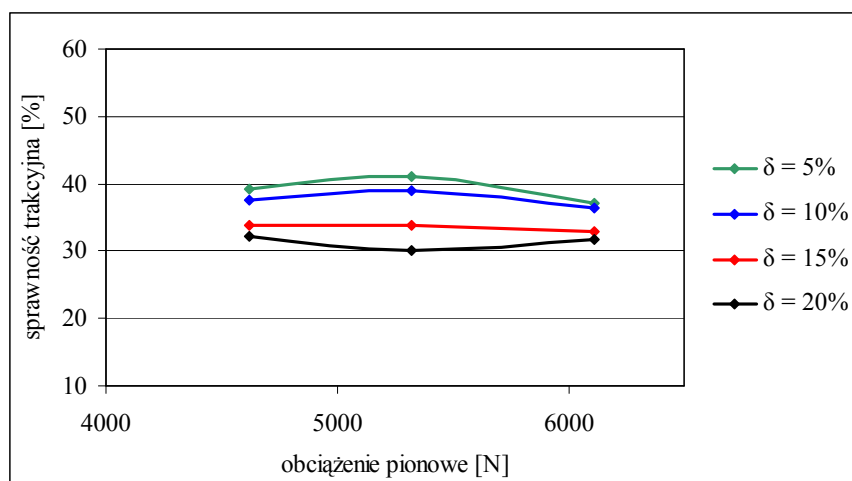
Zgodnie z powyższym rysunkiem charakter zmian sprawności przy wszystkich wartościach poślizgów jest zbliżony. Zwiększenie obciążenia pionowego z 4620 do 5320 N powodowało niewielkie przyrosty sprawności (o 2 – 3 punkty procentowe), dalsze zwiększanie obciążenia powodowało spadek sprawności do wartości niższych niż przy pierwszym poziomie obciążenia.



Rys. 6.68. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie zagęszczonej

Na podstawie powyższego zestawienia zaobserwować można, że większe zmiany sprawności na skutek zwiększania obciążenia pionowego występowały przy niskich poślizgach. Przy poślizgu równym 5% najniższa wartość sprawności odpowiadała środkowemu poziomowi obciążenia pionowego, zaś najwyższa sprawność wystąpiła przy obciążeniu maksymalnym. Przy poślizgu 10% pierwsze zwiększenie obciążenia spowodowało spadek sprawności o 4 punkty procentowe (10%), natomiast kolejne zwiększenie obciążenia praktycznie nie spowodowało zmiany wartości analizowanego parametru. Przy najwyższym poślizgu zwiększanie obciążenia pionowego skutkowało wzrostami sprawności, jednak wartości tych przyrostów nie przekraczały 1 punktu procentowego.

Na rysunku 6.69 zestawiono wartości sprawności trakcyjnej na glebie luźnej.



Rys. 6.69. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie luźnej

Na glebie luźnej największe różnice między wartościami sprawności przy różnych poślizgach wystąpiły przy obciążeniu pionowym równym 5320 N. Przy poślizgach 10 i 15% pierwsze zwiększenie obciążenia skutkowało wzrostami sprawności trakcyjnej (o około 2 punkty procentowe) dalsze zaś zwiększenie obciążenia skutkowało spadkiem sprawności do wartości niższej niż przy pierwszym poziomie obciążenia. Przy poślizgu równym 15% wystąpiły minimalne spadki sprawności na skutek zwiększania obciążenia (nie przekraczały one 3%). Przy najwyższym poślizgu najmniejsza wartość sprawności dotyczyła środkowego poziomu obciążenia, przy obciążeniach skrajnych wartości sprawności były porównywalne.

Analiza statystyczna dla sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 obejmowała, podobnie jak w poprzednich przypadkach, określenie normalności rozkładu badanej cechy, a następnie dokonanie oceny wpływu czynników na wartości sprawności. Wyniki testu określającego normalność (Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$) przedstawiono w tabeli 6.28.

Tabela 6.28. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla sprawności trakcyjnej opony 8.3-20

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Rodzaj podłoża	śc. uprawa tradycyjna	0,983699	0,669657
	śc. uprawa uproszczona	0,975072	0,318854
	śc. siew bezpośredni	0,980164	0,507388
	droga leśna	0,969429	0,181906
	darń łukowa	0,938528	0,008096
	gleba zagęszczona	0,951833	0,029914
	gleba luźna	0,968804	0,170687
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,896204	0,000000
	5320 N	0,940459	0,000030
	6110 N	0,904696	0,000000
Poślizg koła	5%	0,927406	0,001137
	10%	0,919865	0,000546
	15%	0,910077	0,000220
	20%	0,914739	0,000338
	25%	0,888538	0,000035
	30%	0,847183	0,000002

Analizując wyniki przeprowadzonej analizy stwierdzić można, że przy każdym z czynników występowały populacje, których rozkład nie był zgodny z rozkładem

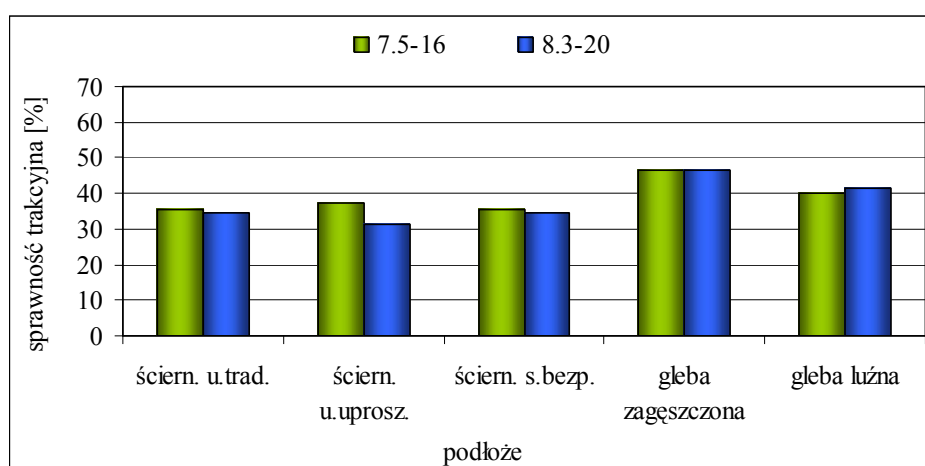
normalnym. Z tego powodu do oceny wpływu tych czynników na wartość sprawności wykorzystano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki tego testu przedstawiono w tabeli 6.29.

Tabela 6.29. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla sprawności trakcyjnej opony 8.3-20

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rodzaj podłoża	204,6995	0,0001
Obciążenie pionowe koła	1,367649	0,5047
Poślizg koła	113,8794	0,0003

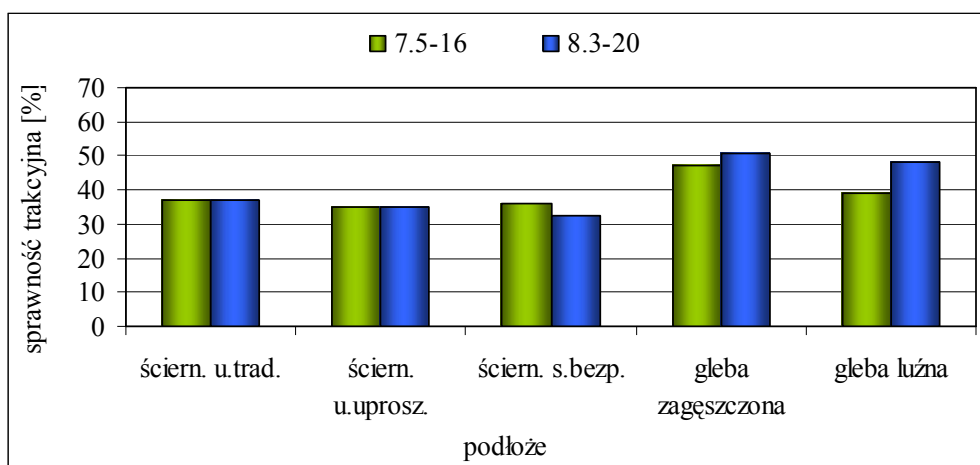
Na podstawie uzyskanych wyników analizy statystycznej stwierdzić można, że rodzaj podłoża oraz poślizg miały istotny wpływ na wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20. Podobnie jak w przypadku opony 7.5-16 nie stwierdzono istotnego wpływu obciążenia pionowego. Test porównań wielokrotnych wykazał, że nie wystąpiły istotne różnice w wartościach sprawności na ścierniskach, nie stwierdzono również różnic w przypadku par podłoży: droga leśna – darń, gleba zagęszczona – darń oraz ściernisko w siewie bezpośrednim – gleba luźna. Test wielokrotnych porównań dla poślizgu wykazał brak różnic między wszystkimi sąsiadującymi wartościami poślizgów oraz między poślizgami 5 i 15%.

Analogicznie jak w przypadku siły trakcyjnej dokonano porównania obu badanych opon w aspekcie uzyskiwanych sprawności trakcyjnych. Zestawienie maksymalnych wartości sprawności obu opon przy najniższym poziomie obciążenia przedstawiono na rysunku 6.70.



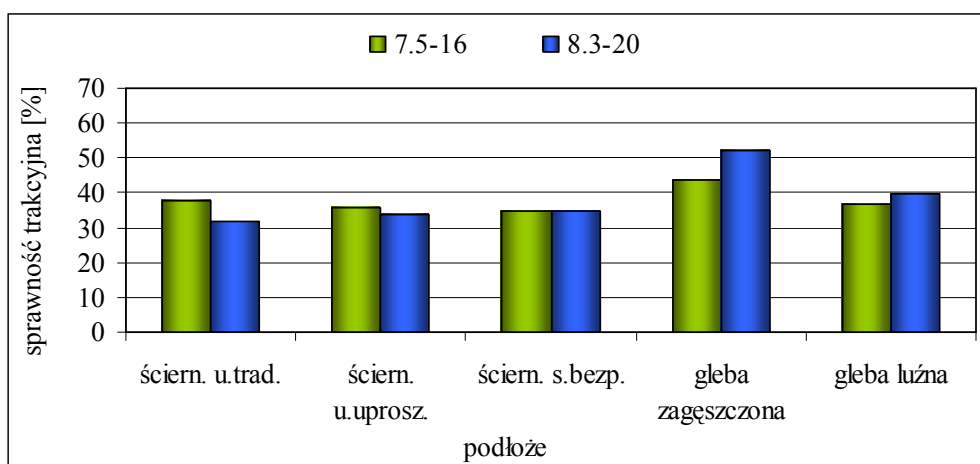
Rys. 6.70. Porównanie wartości sprawności trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 4620 N

Z zestawienia zilustrowanego na rysunku 6.70 wynika, że wartości sprawności obu opon były porównywalne. Największa różnica wystąpiła na ściernisku w uprawie uproszczonej – sprawność opony 8.3-20 była o 6 punktów procentowych (16%) niższa niż sprawność opony 7.5-16. Opona 7.5-16 cechowała się mniejszymi zmianami sprawności przy zmianie rodzaju podłoża.



Rys. 6.71. Porównanie wartości sprawności trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 5320 N

Przy wyższym poziomie obciążenia pionowego (rys. 6.71) zaobserwować można, że na glebie zagęszczonej i luźnej wyższymi wartościami sprawności trakcyjnej cechowała się opona 8.3-20; różnice wyniosły kolejno 7 i 22%. W przypadku ściernisk największa różnica w wartościach sprawności dotyczyła siewu bezpośredniego. Opona 7.5-16 cechowała się mniejszymi różnicami w wartościach sprawności na różnych podłożach.



Rys. 6.72. Porównanie wartości sprawności trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 6110 N

Różnice w wartościach sprawności przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego (rys. 6.72) są wyższe niż w dwóch poprzednio omawianych przypadkach. Zarówno na glebie zagęszczonej, jak i luźnej wyższe wartości sprawności dotyczyły opony 8.3-20 (różnice wyniosły 20 i 9%). W pozostałych przypadkach największe różnice dotyczyły ścierniska w uprawie tradycyjnej (sprawność opony 7.5-16 była wyższa o 16%).

Opisana zależność sprawności trakcyjnej od rozmiaru opony znajduje potwierdzenie w literaturze. Grisso i in. [1992] oraz Bashford i in. [1999] wykazali, że opona o większej średnicy zewnętrznej osiąga wyższe wartości sprawności trakcyjnej. Bashford i in. [1993] stwierdzili, że na podłożach mniej zwięzłych różnice w wartościach sprawności pomiędzy oponami o różnych średnicach są większe niż ma to miejsce na podłożach o większej zwięzłości, co również potwierdza uzyskane wyniki badań.

Porównanie wpływu rozmiaru opony na wartości sprawności trakcyjnej zostało poparte analizą statystyczną. W pierwszej kolejności sprawdzono zgodność rozkładów sprawności obu opon z rozkładem normalnym za pomocą testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 6.30.

Tabela 6.30. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla sprawności trakcyjnej obu badanych opon

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Rozmiar opony	7.5-16	0,963590	0,000002
	8.3-20	0,873113	0,000000

Zgodnie z uzyskanym wynikiem (tab. 6.30) badana cecha nie posiadała rozkładu zgodnego z rozkładem normalnym, zatem do oceny wpływu czynnika zastosowano test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (wyniki w tabeli 6.31).

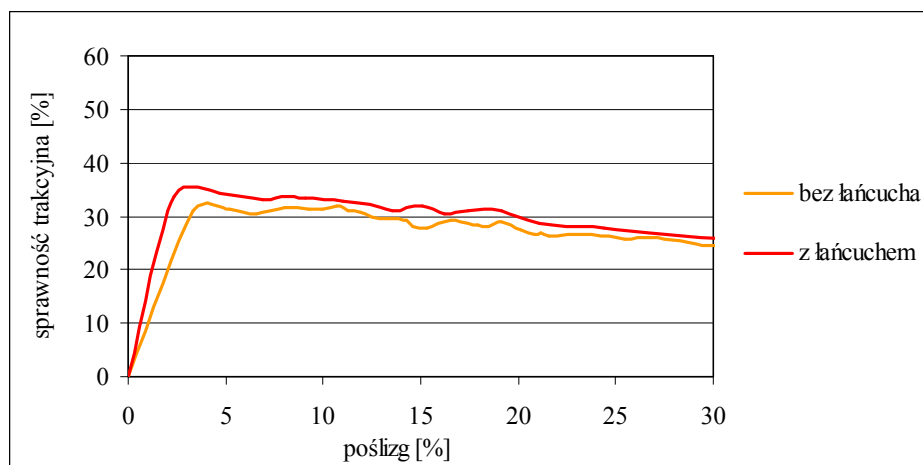
Tabela 6.31. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla sprawności trakcyjnej obu badanych opon

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Rozmiar opony	7,288108	0,0069

Przeprowadzona analiza wykazała, że rozmiar opony miał istotny wpływ na wartości sprawności trakcyjnej.

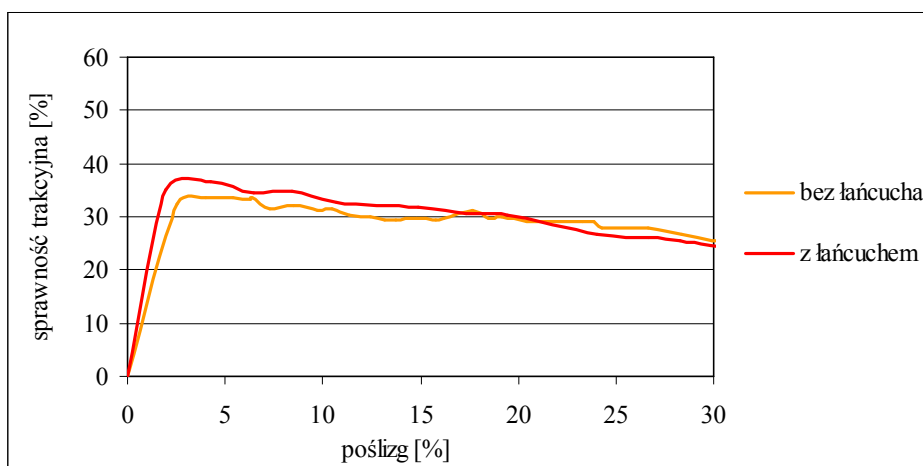
Podobnie jak w przypadku siły trakcyjnej, dokonano oceny wpływu stosowania łańcucha antypoślizgowego na wartości i charakter zmian sprawności trakcyjnej. Ocenę taką przeprowadzono dla opony 8.3-20 przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego

(6110 N). Na rysunku 6.73 zilustrowano przebiegi sprawności trakcyjnej opony z łańcuchem i bez łańcucha na ściernisku w uprawie tradycyjnej. Zgodnie z przedstawionym przebiegiem największe różnice w wartościach sprawności opony z łańcuchem i bez łańcucha wystąpiły przy najmniejszych poślizgach (zakres 0 – 5%). Opona wyposażona w łańcuch antypoślizgowy cechowała się większym tempem przyrostu oraz wyższą sprawnością maksymalną, osiągniętą przy niższym poślizgu.



Rys. 6.73. Przebiegi sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na ściernisku w uprawie tradycyjnej

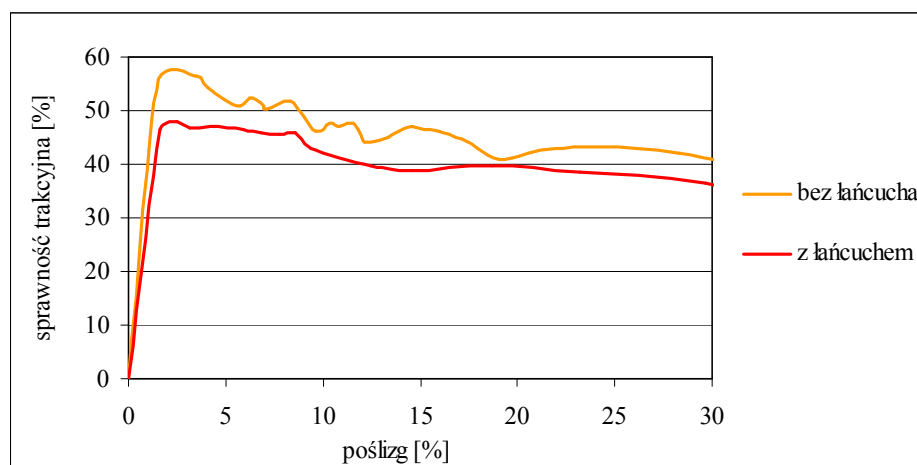
Na rysunku 6.74 przedstawiono porównanie przebiegów opony z łańcuchem i bez łańcucha na ściernisku w uprawie uproszczonej.



Rys. 6.74. Przebiegi sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na ściernisku w uprawie uproszczonej

W przypadku ścierniska w uprawie uproszczonej zaobserwować można, że zależności między sprawnościami opony z łańcuchem i bez łańcucha były zbliżone

do poprzednio omawianego przypadku. Opona wyposażona w łańcuch osiągnęła wyższe wartości sprawności oraz większy przyrost początkowy. Pewna różnica dotyczyła jedynie zakresu poślizgu powyżej 20%, w którym wyższą sprawność osiągnęła opona bez łańcucha antypoślizgowego.



Rys. 6.75. Przebiegi sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na drodze leśnej

Na drodze leśnej (rys. 6.75) charakter zmian sprawności na skutek stosowania łańcucha antypoślizgowego jest odmienny niż w przypadku ściernisk. W zakresie najniższych poślizgów (0 – 2%) nieco większym przyrostem odznaczała się opona bez łańcucha antypoślizgowego. Przy większych poślizgach wyższe wartości sprawności odpowiadają oponie bez łańcucha antypoślizgowego. Maksymalne wartości sprawności obu wariantów opon wystąpiły przy poślizgu równym 2% i wyniosły 57% dla opony bez łańcucha i 48% dla opony z łańcuchem. Niższe wartości sprawności opony wyposażonej w łańcuch tłumaczyć można tym, że droga leśna charakteryzowała się znaczną wytrzymałością, w związku z czym przenoszenie siły trakcyjnej na tym podłożu odbywało się w odmienny sposób niż miało to miejsce na ścierniskach. Z tego powodu na drodze leśnej ograniczone było wgłębne działanie łańcucha antypoślizgowego. Ponadto elementy łańcucha stawiały dodatkowy opór, który zwiększał opór przetaczania koła.

W celu określenia wpływu stosowania łańcucha na wartości sprawności trakcyjnej przeprowadzono analizę statystyczną. Przeprowadzony test Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wykazał, że jedna z populacji nie posiadała rozkładu zgodnego z rozkładem normalnym (tab. 6.32), dlatego do oceny wpływu czynnika na wartości sprawności zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, którego wyniki zestawiono w tabeli 6.33.

Tabela 6.32. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego

Czynnik	Poziom czynnika	Wartość testu W	Prawdopodobieństwo p
Stosowanie łańcucha antypoślizgowego	z łańcuchem	0,969162	0,177036
	bez łańcucha	0,843731	0,000005

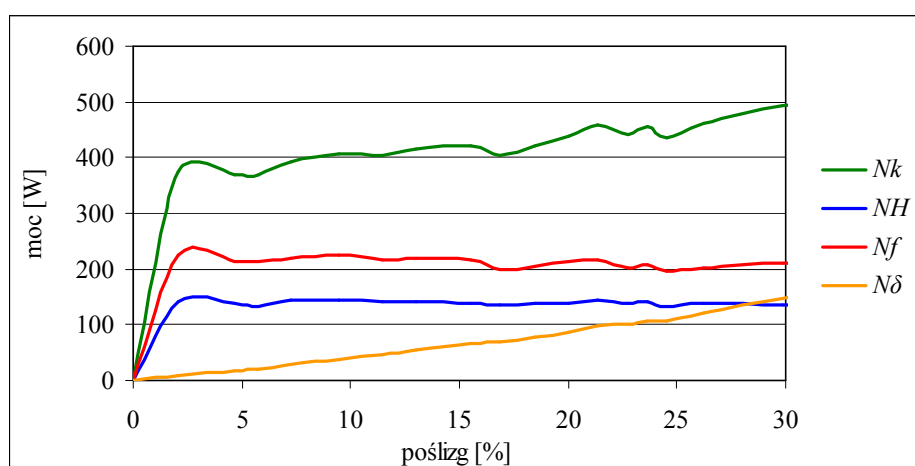
Tabela 6.33. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego

Czynnik	Wartość testu H	Prawdopodobieństwo p
Stosowanie łańcucha antypoślizgowego	0,0714516	0,7892

Zgodnie z wynikami analizy statystycznej stosowanie łańcucha antypoślizgowego nie miało istotnego wpływu na wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20.

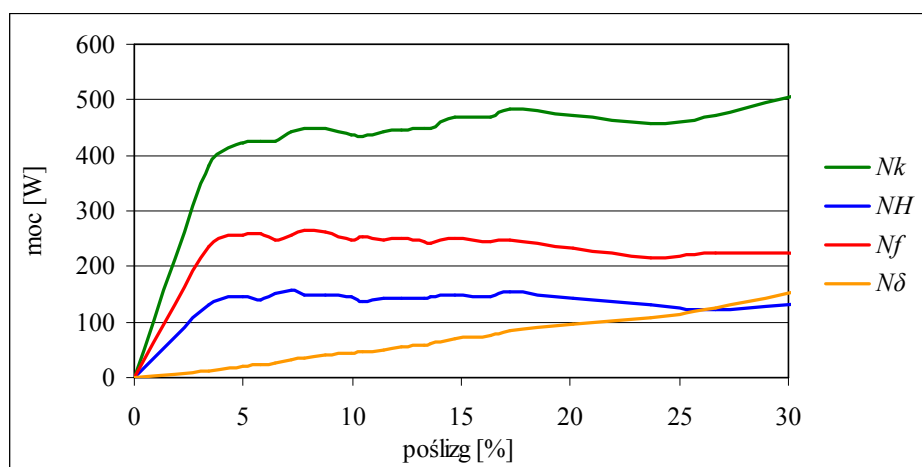
Bilans mocy

Sprawność trakcyjna jest parametrem, który opisuje jedynie stosunek mocy na wyjściu z i wejściu do układu koło – podłoże. Z tego powodu nie jest możliwe opisanie w wyniku czego powstały straty energetyczne w układzie koło - podłoże. Taka analiza może być dokonana po przeprowadzeniu bilansu mocy. Na rysunku 6.76 przedstawiono przebiegi mocy koła z oponą 7.5-16 w funkcji poślizgu na ściernisku w uprawie tradycyjnej przy najwyższym poziomie obciążenia.



Rys. 6.76. Przebiegi mocy koła z oponą 7.50-16 na ściernisku w uprawie tradycyjnej przy obciążeniu 6110 N: N_k – moc dostarczona do koła (moc całkowita), N_H – moc uciągu, N_f – moc tracona na opory przetaczania, N_δ – moc tracona na poślizg

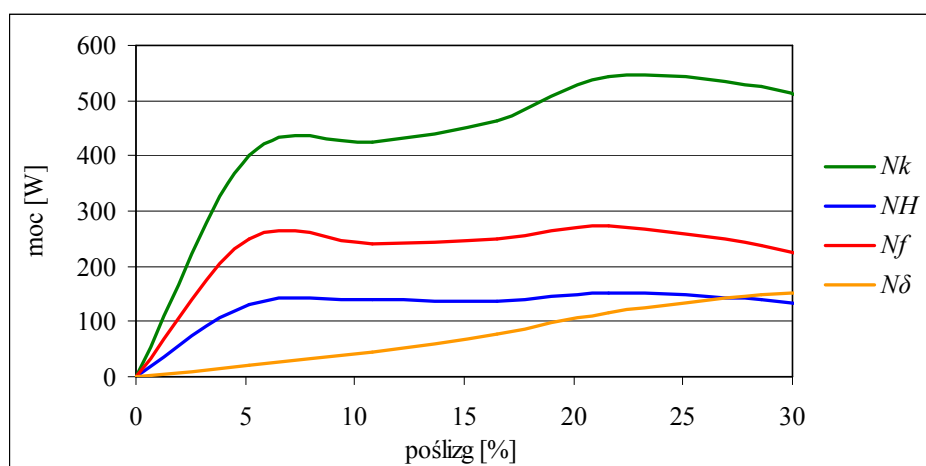
Analiza przedstawionego przebiegu pozwala stwierdzić, że najwyższy przyrost mocy dostarczanej do koła wystąpił przy wartościach poślizgu w zakresie 0 – 3%. Po przekroczeniu poślizgu równego 3% obserwuje się lekki spadek, a następnie ustabilizowanie przebiegu mocy uciągu oraz mocy traconej na opór przetaczania. W przypadku mocy dostarczanej do koła również obserwuje się niewielki spadek przy poślizgach 3 – 5%, przy wyższych poślizgach wartość tej mocy odznaczała się powolnym przyrostem. Moc tracona na poślizg cechowała się przyrostem proporcjonalnym do wzrostu wartości poślizgu.



Rys. 6.77. Przebiegi mocy koła z oponą 7.50-16 na ściernisku w uprząży uproszczonej przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

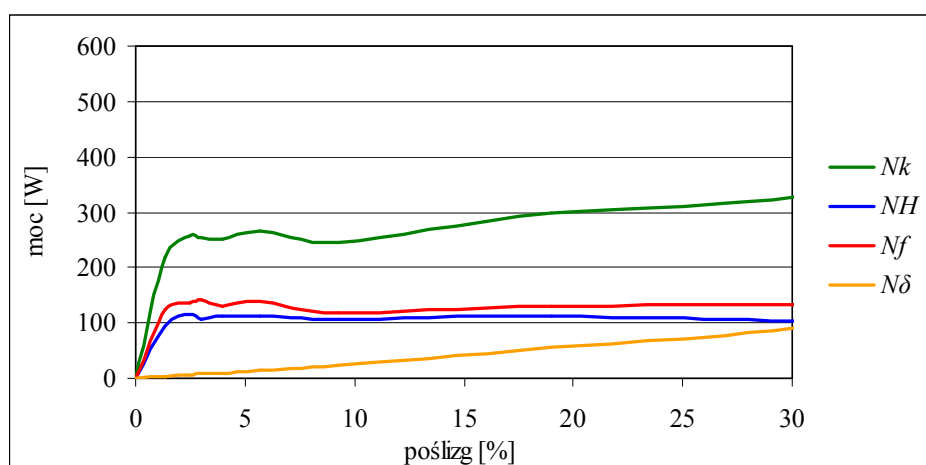
W przypadku ścierniska w uprząży uproszczonej (rys. 6.77) największy przyrost mocy dostarczanej do koła, mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania obserwuje się przy poślizgach z zakresu 0 – 3%. Po przekroczeniu tego poślizgu w przypadku mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania dochodzi do ustabilizowania przebiegów. Natomiast moc dostarczana do koła przy poślizgach wyższych niż 3% odznacza się powolnym przyrostem. Moc tracona na poślizg cechowała się przyrostem analogicznym jak na poprzednio omawianym podłożu.

Na ściernisku w siewie bezpośrednim (rys. 6.78) wartości oraz charakter zmian sprawności były podobne jak w poprzednio omawianym przypadku. Zaobserwować można, że przy poślizgach wyższych niż 6% moc uciągu ulegała minimalnym zmianom. Moc tracona na opór przetaczania osiągnęła maksimum przy poślizgu równym 6%, następnie wystąpiło ustabilizowanie i kolejny niewielki przyrost przy poślizgu 21%. W przypadku mocy traconej na poślizg obserwuje się pewną zmianę tempa przyrostu przy poślizgu wyższym niż 18%.



Rys. 6.78. Przebiegi mocy koła z oponą 7.50-16 na ściernisku w siewie bezpośrednim przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

Na rysunku 6.79 zilustrowano przebiegi mocy koła z oponą 7.5-16 na glebie zagęszczonej.

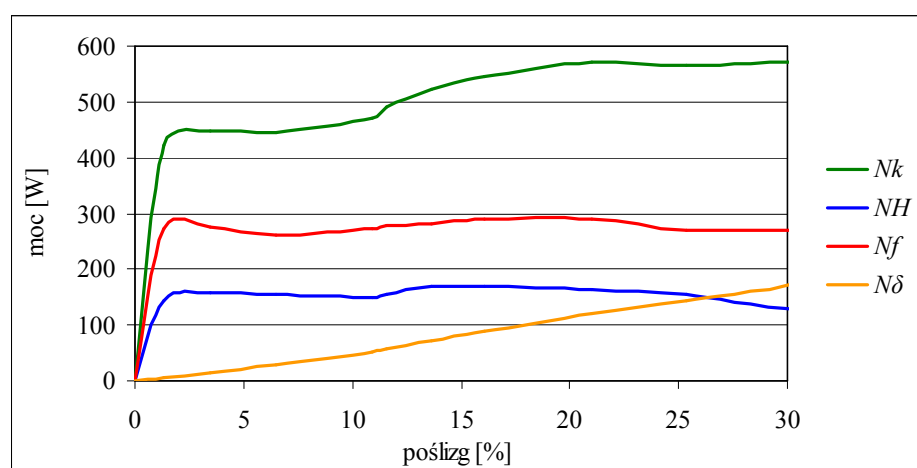


Rys. 6.79. Przebiegi mocy koła z oponą 7.50-16 na glebie zagęszczonej przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

Charakter zmian wartości mocy na zagęszczonej glebie (rys. 6.79) jest odmienny niż na ścierniskach; inne są wartości mocy oraz proporcje pomiędzy poszczególnymi mocami; mniejsza jest różnica między mocą uciągu i mocą traconą na opór przetaczania, mniejsze były również wartości mocy traconej na poślizg. Największy przyrost mocy dostarczanej do koła, mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania wystąpił przy poślizgach z zakresu 0 – 2%.

Na rysunku 6.80 dokonano zestawienia przebiegów mocy koła z oponą 7.5-16 na glebie luźnej, przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego. Analizując ten przebieg zaobserwować można, że wartości poszczególnych mocy na glebie luźnej były wyższe niż w przypadku gleby zagęszczonej. Znaczny przyrost mocy dostarczanej do koła

wystąpił przy niskich wartościach poślizgu (0 – 2%), następnie stwierdzono stabilizację przebiegu i ponowny przyrost przy poślizgu wyższym od 11%. W przypadku mocy uciągu oraz mocy traconej na opór przetaczania przy poślizgach powyżej 2% występowały niewielkie zmiany wartości. Moc tracona na poślizg odznaczała się stałym wzrostem wartości proporcjonalnym do przyrostu poślizgu, bez zmiany tempa przyrostu.

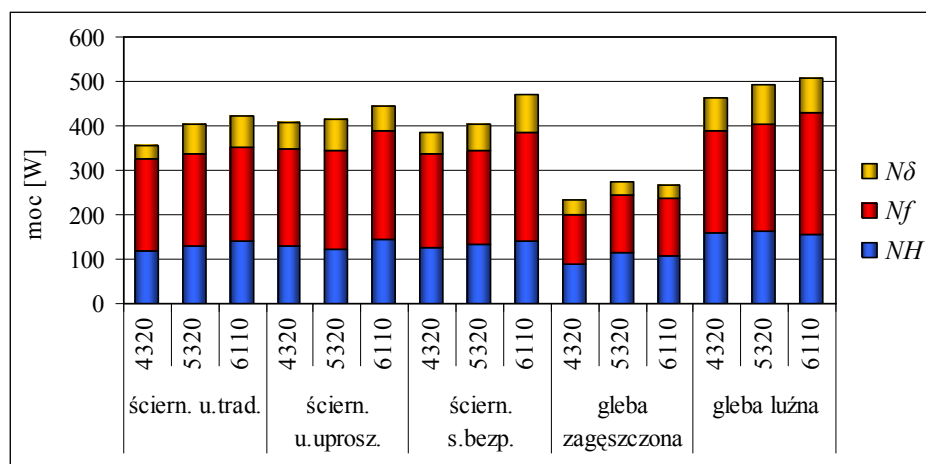


Rys. 6.80. Przebiegi mocy koła z oponą 7.50-16 na glebie luźnej przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

Cechą wspólną dla wszystkich opisanych powyżej położy było to, że moc tracona na opór przetaczania była wyższa niż moc uciągu. Sytuację taką należy tłumaczyć tym, że opór przetaczania był sumą oporu badanego koła oraz oporu kół ciągnika, z którym współpracowało stanowisko pomiarowe. Ciężar ciągnika wynosił 21340 N, a zatem był kilkakrotnie wyższy niż obciążenie pionowe badanego koła, co tłumaczy dużą wartość oporu przetaczania i w konsekwencji dużą moc traconą na ten opór.

Charakter zmian przedstawionych przebiegów mocy nawiązuje do wyników przedstawianych w literaturze, pewne różnice dotyczą jednak tempa przyrostu mocy uciągu przy niskich wartościach poślizgu. Wykazywano, że stabilizacja przebiegu mocy uciągu następuje przy poślizgach 15 – 20%, a zatem wyższych niż w przedstawianych wynikach badań [Jenane i in. 1996, Materek 2008]. Charakter zmian przebiegu mocy traconej na poślizg i opór przetaczania wydaje się nawiązywać do pracy Materka [2004] oraz Turnera [1995].

W celu opisania zależności pomiędzy mocami na poszczególnych podłożach przy odmiennych poziomach obciążenia pionowego dokonano zestawienia średnich wartości mocy obliczonych przy poślizgach z zakresu 0 – 30%. Zestawienie takie dla koła z oponą 7.5-16 zilustrowano na rysunku 6.81.



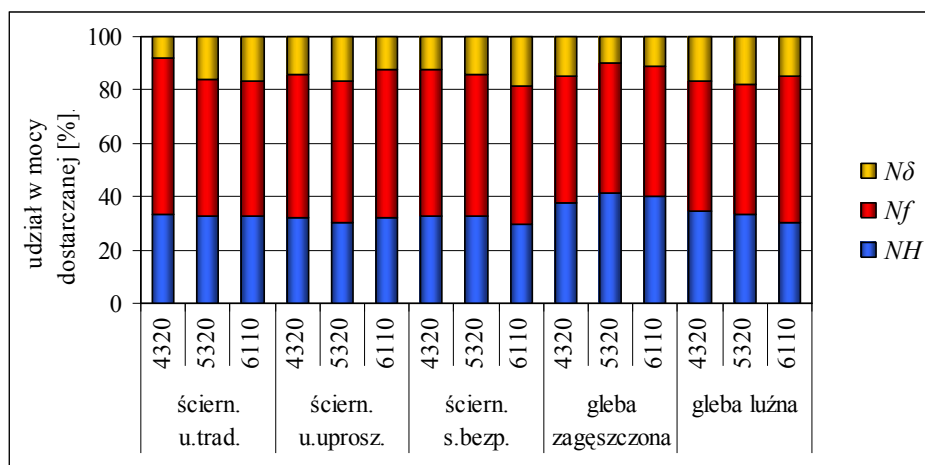
Rys. 6.81. Zestawienie wartości mocy koła z oponą 7.5-16 na wszystkich badanych podłożach przy trzech poziomach obciążenia pionowego (oznaczenia jak na rysunku 6.76, suma mocy N_H , N_f i N_δ stanowi moc dostarczaną do koła N_k)

Analiza powyższego zestawienia pozwala stwierdzić, że na glebie luźnej konieczne było dostarczenie do koła największej mocy. Natomiast najmniejszym zapotrzebowaniem na moc badane koło wykazało się na glebie zagęszczonej. Rozpatrując wartości mocy na ścierniskach zaobserwować można, że różnice całkowitych mocy w poszczególnych systemach uprawowych były niewielkie (nie przekraczały 8%). W większości przypadków zwiększanie obciążenia pionowego skutkowało wzrostem wartości mocy całkowitej (wyjątkiem była gleba luźna, na której wzrost wystąpił jedynie przy pierwszej zmianie obciążenia pionowego).

Zaobserwowane różnice w wartościach poszczególnych mocy korespondują z właściwościami wytrzymałościowymi badanych podłoży. Spośród podłoży, na których badana była opona 7.5-16 najwyższą zwężnością i naprężeniami ścinającymi charakteryzowała się gleba zagęszczona (rys. 6.12 i 6.13). Na tym też podłożu zaobserwowano najmniejsze zapotrzebowanie na moc dostarczaną do koła. Zapewne taka sytuacja ma związek z mniejszymi wartościami oporu przetaczania na tym podłożu.

Wartości mocy dostarczanej do koła w przypadku różnych podłoży były odmienne, toteż w celu opisanie proporcji pomiędzy mocami składowymi obliczono udziały mocy uciągu oraz mocy traconej na opór przetaczania i poślizg w mocy dostarczanej do koła. Zestawienie takich udziałów przedstawiono na rysunku 6.82. Zgodnie z tym zestawieniem najwyższy udział mocy uciągu występował na glebie zagęszczonej – w przypadku tego podłoża przy wszystkich trzech poziomach obciążenia dochodził on do 40%. Na ścierniskach nie stwierdzono wyraźnych różnic w udziałach mocy w poszczególnych systemach uprawowych, jedynie w uprawie tradycyjnej przy najniższym poziomie

obciążenia zaobserwowano niższy udział mocy traconej na poślizg. Nie można w sposób jednoznaczny określić wpływu obciążenia pionowego na proporcje pomiędzy mocami. W przypadku wszystkich ściernisk udział mocy wykorzystywanej na pokonanie oporu przetaczania przekraczał 50% i tym samym był wyższy niż w przypadku gleby zagęszczonej. Proporcje mocy na glebie luźnej były zbliżone do proporcji mocy na ścierniskach.



Rys. 6.82. Zestawienie udziałów poszczególnych mocy w mocy całkowitej koła z oponą 7.5-16 na przy trzech poziomach obciążenia pionowego (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

Przedstawione proporcje pomiędzy składowymi bilansu mocy wydają się potwierdzać zależność pomiędzy właściwościami podłoża a charakterem strat w układzie koło – podłoże. Na podłożu o wysokiej zwężności (gleba zagęszczona) zaobserwowano najmniejszy udział strat związanych z oporem przetaczania. Na tym też podłożu wystąpiły wysokie wartości naprężeń ścinających, co znajduje swoje odzwierciedlenie w niskim udziale mocy traconej na poślizg koła. Przypuszczać należy, że na podłożu tym przenoszenie siły trakcyjnej odbywa się w odmienny sposób niż ma to miejsce w przypadku pozostałych podłoży – z racji ograniczonego wgłębnego działania koła siła trakcyjna jest przenoszona w większej mierze na skutek tarcia niż ścinania.

Określenie wpływu czynników na wartości poszczególnych mocy koła z oponą 7.5-16 wymagało przeprowadzenia analizy statystycznej. Dla każdej z badanych cech przeprowadzono ocenę zgodności rozkładu z rozkładem normalnym za pomocą testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; wyniki tej analizy w odniesieniu do mocy uciągu i mocy całkowitej przedstawiono w tabeli 6.34, natomiast w tabeli 6.35 zestawiono wyniki dla mocy traconych na opór przetaczania i poślizg.

Tabela 6.34. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy całkowitej i mocy uciągu koła z oponą 7.5-16 (*W* – wartość testu, *p* – poziom prawdopodobieństwa)

Czynnik	Poziom czynnika	Moc całkowita		Moc uciągu	
		W	p	W	p
Rodzaj podłoża	śc. uprawa tradycyjna	0,979335	0,472422	0,963055	0,094451
	śc. uprawa uproszczona	0,990986	0,956196	0,967405	0,147917
	śc. siew bezpośredni	0,969830	0,189473	0,960967	0,076127
	gleba zagęszczona	0,943532	0,013119	0,973914	0,284933
	gleba luźna	0,964215	0,106478	0,942366	0,011713
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,977398	0,118458	0,985673	0,429626
	5320 N	0,908234	0,000010	0,916618	0,000024
	6110 N	0,979885	0,177321	0,975734	0,090224
Poślizg koła	5%	0,982937	0,739343	0,957395	0,097144
	10%	0,977034	0,504644	0,985031	0,820889
	15%	0,969303	0,273169	0,981079	0,663578
	20%	0,963911	0,172010	0,943742	0,029572
	25%	0,939902	0,021327	0,940047	0,021591
	30%	0,937408	0,017290	0,944534	0,031650

Tabela 6.35. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy traconych koła z oponą 7.5-16 (*W* – wartość testu, *p* – poziom prawdopodobieństwa)

Czynnik	Poziom czynnika	Moc tracona na opór przetaczania		Moc tracona na poślizg	
		W	p	W	p
Rodzaj podłoża	śc. uprawa tradycyjna	0,984141	0,690715	0,947184	0,018789
	śc. uprawa uproszczona	0,976883	0,378522	0,944344	0,014203
	śc. siew bezpośredni	0,949778	0,024330	0,958106	0,056700
	gleba zagęszczona	0,983957	0,681967	0,890680	0,000137
	gleba luźna	0,960556	0,072969	0,939569	0,008943
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,973137	0,058953	0,948932	0,001439
	5320 N	0,928357	0,000097	0,940299	0,000442
	6110 N	0,990735	0,783494	0,950204	0,001723
Poślizg koła	5%	0,979842	0,613330	0,962939	0,158037
	10%	0,975460	0,448760	0,945728	0,035073
	15%	0,956358	0,088671	0,951724	0,059042
	20%	0,970306	0,297060	0,980656	0,646310
	25%	0,948318	0,043881	0,950037	0,050958
	30%	0,959265	0,114509	0,888634	0,000427

Zgodnie z przedstawionymi w powyższych tabelach danymi w każdej z populacji występowały rozkłady, w których nie stępowała zgodność z rozkładem normalnym. Ocena

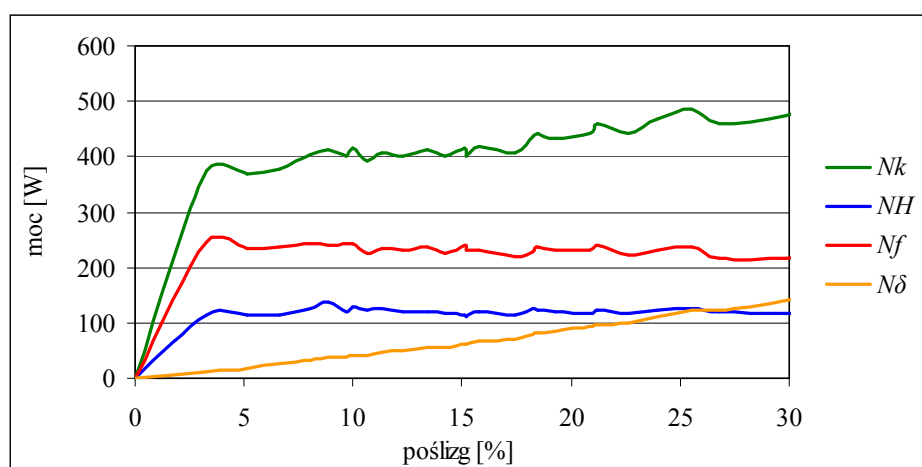
wpływu czynników na wartości wszystkich mocy przeprowadzono z wykorzystaniem nieparametrycznego testu Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 6.36.

Tabela 6.36. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla wszystkich mocy koła z oponą 7.5-16 (H - wartość testu, p – prawdopodobieństwo)

Czynnik	Moc uciągu		Moc tracona na opór przetaczania		Moc tracona na poślizg		Moc całkowita	
	H	p	H	p	H	p	H	p
Rodzaj podłoża	122,2372	0,0001	150,8438	0,0002	20,24959	0,0004	150,7534	0,0001
Obciążenie pionowe koła	4,534170	0,1036	0,284169	0,8675	0,148057	0,9286	0,088088	0,9569
Poślizg koła	15,04686	0,0102	14,69257	0,0118	226,9716	0,0002	15,51525	0,0084

Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że jedynie rodzaj podłoża i poślizg koła miały istotny wpływ na wartości wszystkich analizowanych mocy. Testy porównań wielokrotnych dla podłoża wykazały, że wartości mocy uciągu, mocy traconej na opór przetaczania i mocy całkowitej na ścierniskach nie różniły się istotnie. Istotne różnice w wartościach mocy traconej na poślizg wystąpiły między glebą zagęszczoną a ścierniskami oraz między glebą luźną a glebą zagęszczoną. W przypadku poślizgu istotne różnice w wartościach mocy uciągu, mocy całkowitej i mocy traconej na opór przetaczania dotyczyły skrajnych wartości poślizgu (5-30 i 10-30). Moc tracona na poślizg charakteryzowała się brakiem istotnych różnic przy sąsiadujących wartościach poślizgu.

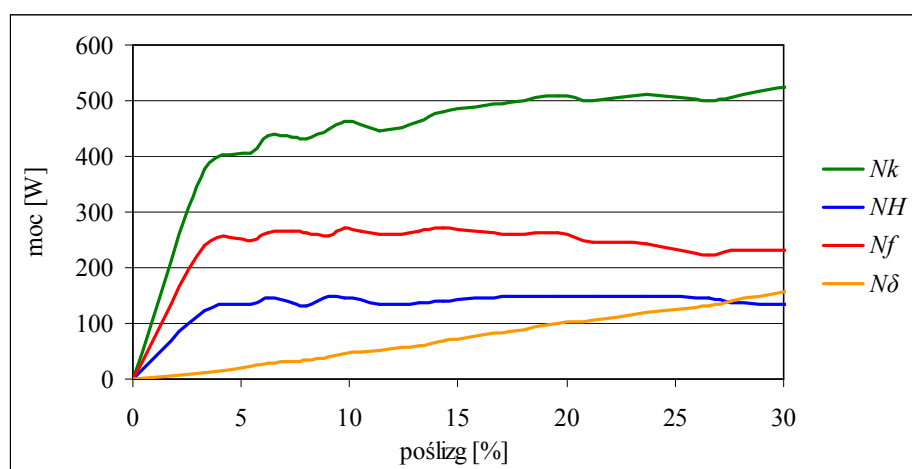
Przebiegi mocy dla koła z drugą badaną oponą przedstawiono, podobnie jak w poprzednim przypadku jedynie dla najwyższego obciążenia pionowego (6110 N).



Rys. 6.83. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na ściernisku w uprawie tradycyjnej przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

Na ściernisku w uprawie tradycyjnej (rys. 6.83) największy przyrost mocy uciągu, mocy traconej na opór przetaczania i mocy dostarczonej do koła występował przy poślizgach z zakresu 0 – 4%. W przypadku mocy uciągu przy poślizgach wyższych od 4% obserwowano niewielkie zmiany wartości, podobny charakter stwierdzono w przypadku mocy traconej na opór przetaczania. Przyrost mocy traconej na poślizg był proporcjonalny do wzrostu poślizgu, nie zaobserwowano przy tym zmiany tempa przyrostu tej mocy.

Na rysunku 6.84 zestawiono wartości mocy koła z oponą 8.3-20 na ściernisku w uprawie uproszczonej.

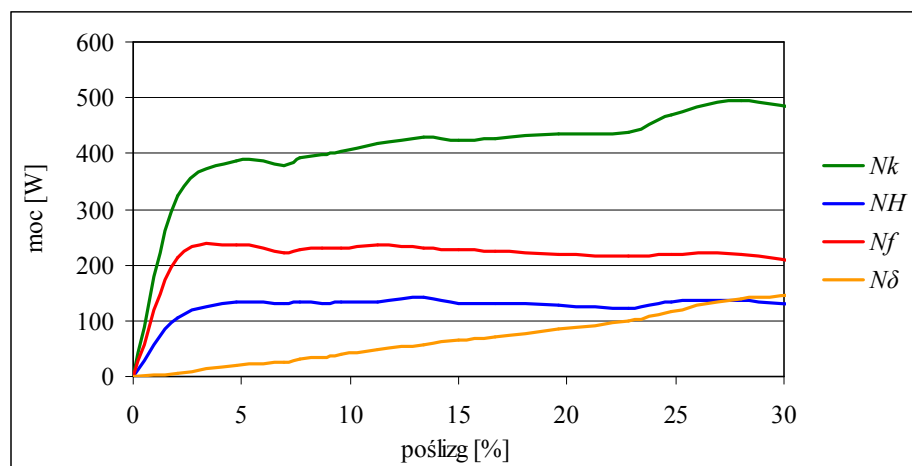


Rys. 6.84. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na ściernisku w uprawie uproszczonej przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

Analizując przebiegi przedstawione na powyższym rysunku zaobserwować można nieco wyższe wartości mocy niż w poprzednio omawianym przypadku. Największy przyrost mocy całkowitej, mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania wystąpił przy poślizgach z zakresu 0 – 3%. W przypadku mocy traconej na poślizg nie zaobserwowano zmiany tempa jej przyrostu w rozpatrywanym zakresie poślizgów. Z racji tego, że moc uciągu i moc tracona na opór przetaczania przy poślizgach powyżej 3% charakteryzowały się niewielkimi zmianami przypuszczać można, że stopniowy przyrost mocy całkowitej jest powodowany wzrostem mocy traconej na poślizg.

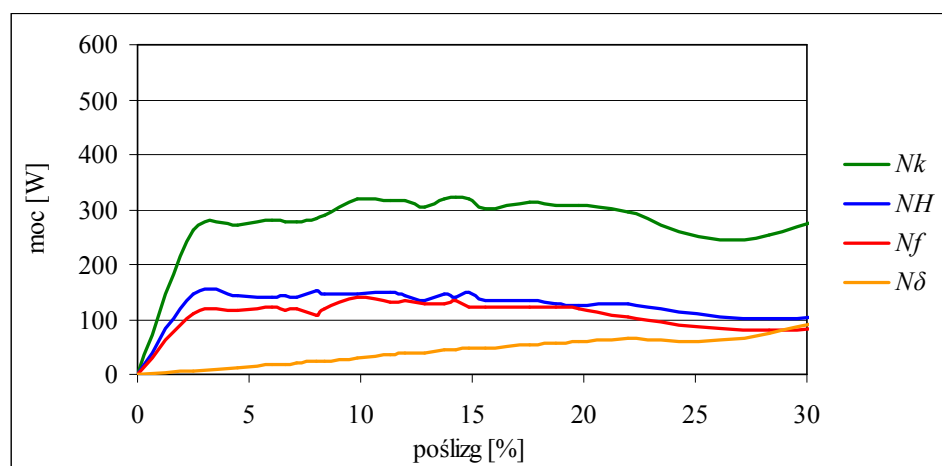
Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na trzecim z badanych ściernisk przedstawiono na rysunku 6.85. W tym wypadku stwierdzić można, że charakter zmian, a także wartości mocy na tym ściernisku były zbliżone do przebiegów dotyczących ścierniska w uprawie uproszczonej. Zarówno moc uciągu, jak i moc tracona na opór przetaczania charakteryzowały się niewielkimi zmianami wartości po ustabilizowaniu przebiegu (przy poślizgach wyższych od 3%). W przypadku mocy traconej na poślizg zaobserwowano

zwiększenie tempa przyrostu po przekroczeniu poślizgu równego 23%, przy tej też wartości poślizgu wystąpił niewielki wzrost wartości mocy uciągu. Oba te przyrosty mogły wpłynąć na wzrost wartości mocy dostarczanej do koła.



Rys. 6.85. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na ściernisku w siewie bezpośrednim przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

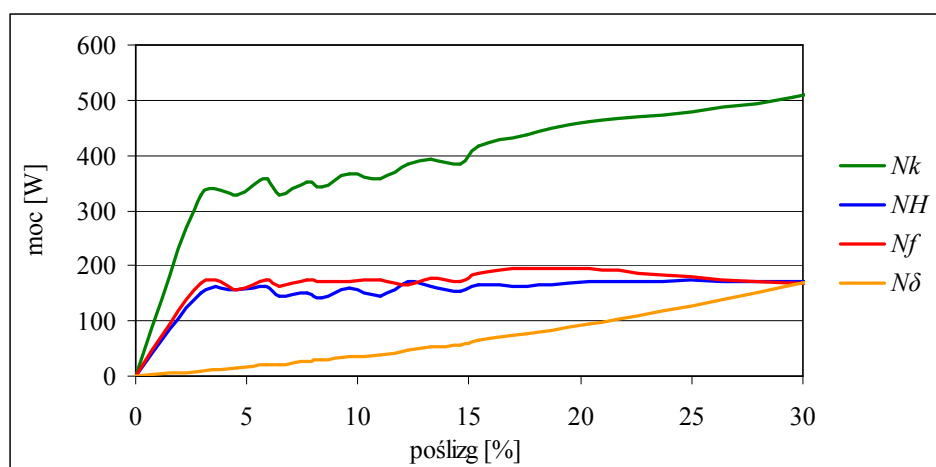
Na rysunku 6.86 dokonano zestawienia przebiegów mocy koła z oponą 8.3-20 na drodze leśnej przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego.



Rys. 6.86. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na drodze leśnej przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

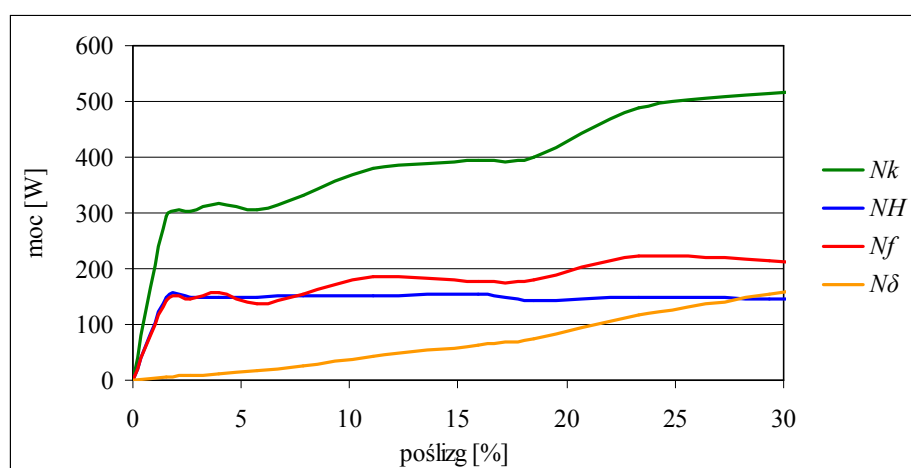
Analiza przebiegów przedstawionych na rysunku 6.86 pozwala stwierdzić, że moc dostarczana do koła charakteryzowała się dużym przyrostem przy poślizgach 0 – 3%, po którym następowało ustabilizowanie przebiegu. W odróżnieniu od przebiegów dotyczących ściernisk, na drodze leśnej wartość mocy uciągu była wyższa niż wartość mocy traconej na opór przetaczania. Przypuszczalnie taka sytuacja mogła mieć związek

z dużą wytrzymałością drogi (zgodnie z rysunkiem 6.12 podłoże to charakteryzowało się najwyższymi wartościami zwięzłości).



Rys. 6.87. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na darni łkowej przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

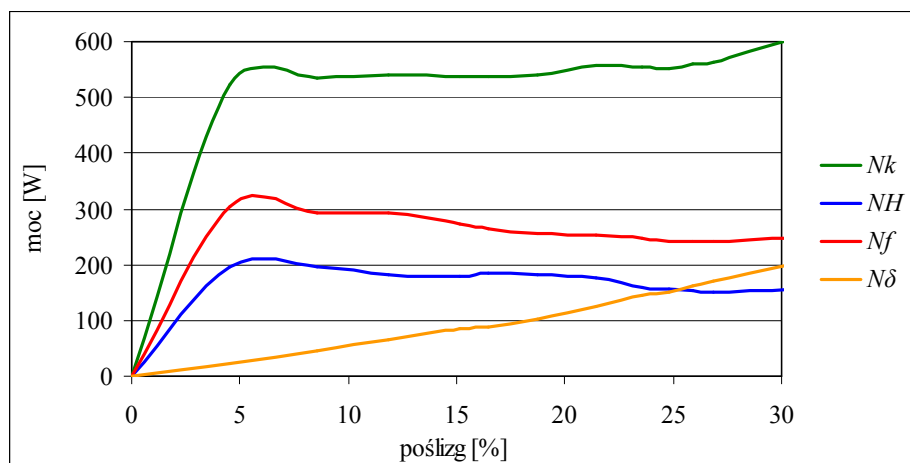
Na darni (rys. 6.87) poślizgi, przy których występował największy przyrost mocy całkowitej, mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania zawierały się w zakresie 0 – 3%. Zaobserwować można ponadto niewielką różnicę pomiędzy wartościami mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania. Przebieg mocy traconej na poślizg był proporcjonalny do wzrostu poślizgu, nie stwierdzono przy tym zmiany tempa przyrostu.



Rys. 6.88. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na glebie zagęszczonej przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

Na glebie zagęszczonej (rys. 6.88) ustabilizowanie przebiegów mocy całkowitej, mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania następowało przy poślizgu równym 2%. Zaobserwowano, że w zakresie poślizgów 0 – 5% wartości mocy uciągu i mocy traconej

na opór przetaczania były na jednakowym poziomie. Stwierdzono ponadto, przy poślizgach powyżej 20% następował wzrost wartości mocy traconej na opór przetaczania, a także zwiększenie tempa przyrostu mocy traconej na poślizg. Taka sytuacja spowodowała wzrost wartości mocy dostarczanej do koła przy poślizgach powyżej 20%.

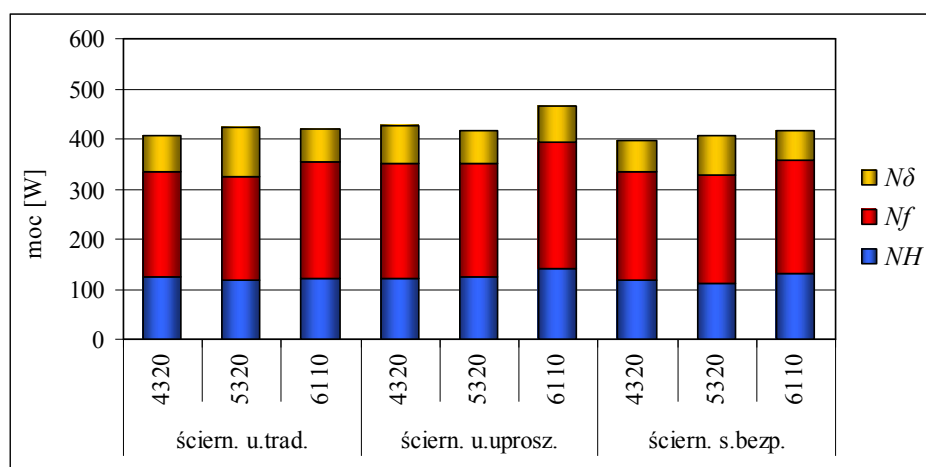


Rys. 6.89. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na glebie luźnej przy obciążeniu 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

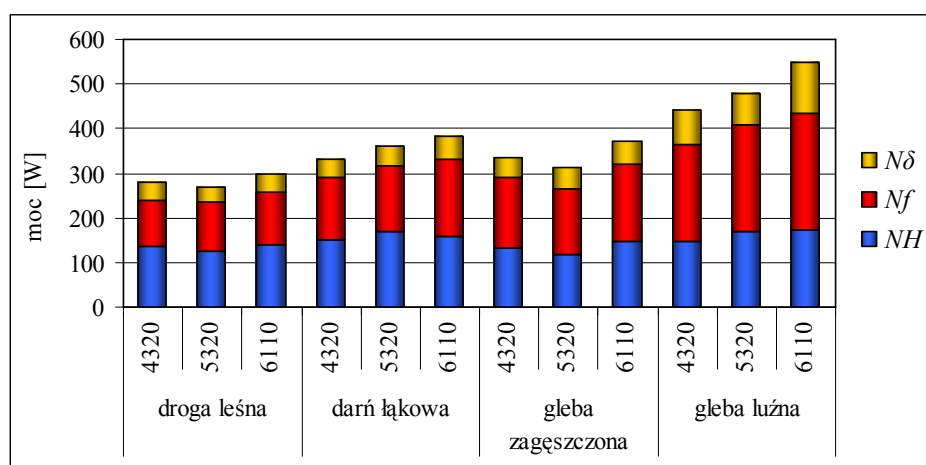
W przypadku gleby luźnej (rys. 6.89) znaczny przyrost wartości mocy dostarczanej do koła, mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania wystąpił przy poślizgach 0 – 5%, po przekroczeniu poślizgu 5% obserwowano spadek wartości mocy traconej na opór przetaczania oraz mocy uciągu. Skutkiem tych spadków było ustabilizowanie wartości mocy całkowitej w zakresie poślizgów 7 – 20%. Przy wyższych poślizgach zaobserwowano pewien wzrost wartości mocy całkowitej – prawdopodobnie był on powodowany zwiększeniem tempa przyrostu mocy traconej na poślizg.

W celu porównania wartości mocy przy różnych obciążeniach pionowych na różnych podłożach dokonano zestawienia średnich wartości mocy obliczonych dla poślizgów 0 – 30%, podobnie jak to miało miejsce w przypadku koła z oponą 7.5-16. Z uwagi na to, że opona 8.3-20 była badana na większej ilości podłoży niż opona 7.5-16, zestawienia wartości mocy dla ściernisk i pozostałych podłoży zaprezentowano oddzielnie. Zgodnie z zestawieniami przedstawionymi na rysunkach 6.90 i 6.91 najwyższe zapotrzebowanie na moc, podobnie jak w przypadku koła z oponą 7.5-16, wystąpiło na glebie luźnej. W przypadku ściernisk nie wystąpiły widoczne różnice w wartościach mocy w poszczególnych systemach uprawowych. Najniższe wartości mocy dostarczanej do koła wystąpiły na drodze leśnej, na tym też podłożu zaobserwowano najniższe wartości mocy traconej na poślizg. Na ściernisku w uprawie uproszczonej, glebie luźnej oraz

na darni, obydwie zmiany obciążenia pionowego skutkowały wzrostem wartości mocy całkowitej.



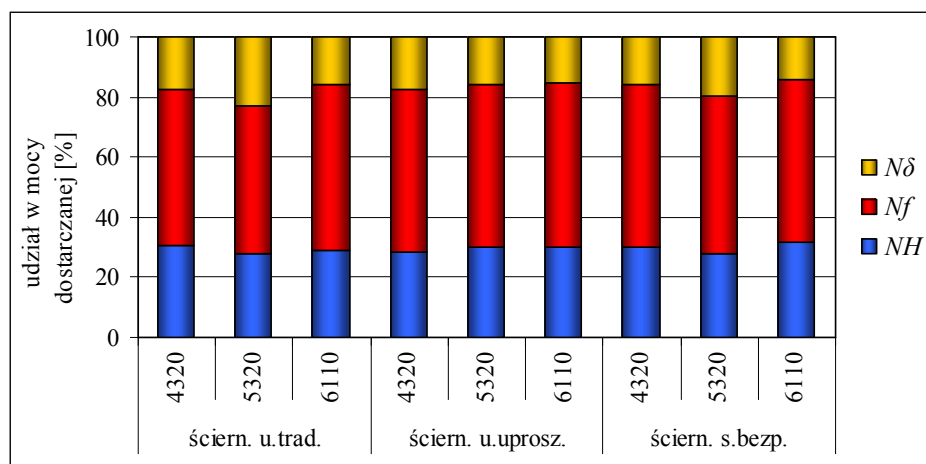
Rys. 6.90. Zestawienie wartości mocy koła z oponą 8.3-20 na ścierniskach przy trzech poziomach obciążenia pionowego (oznaczenia jak na rysunku 6.81)



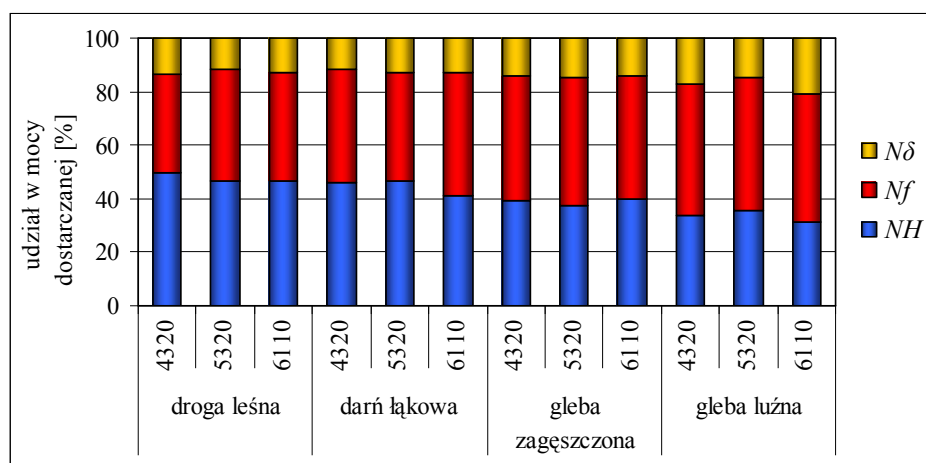
Rys. 6.91. Zestawienie wartości mocy koła z oponą 8.3-20 na drodze, darni oraz glebach przy trzech poziomach obciążenia pionowego (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

Podobnie jak w przypadku poprzednio omawianej opony różnice w wartościach mocy koła wyposażonego w oponę 8.3-20 na różnych podłożach mają zapewne związek z odmiennymi parametrami wytrzymałościowymi tych podłoży. Najniższe zapotrzebowanie na moc wystąpiło bowiem na drodze leśnej oraz darni łąkowej czyli na podłożach charakteryzujących się wysokimi wartościami zwięzłości i naprężeń ścinających (rys. 6.12 i 6.13). Przypuszczać należy, że na tych podłożach wartości strat związane z deformacją były najmniejsze.

Na rysunkach 6.92 i 6.93 przedstawiono udziały mocy uciągu i mocy traconych na opór przetaczania i poślizg przy wszystkich trzech poziomach obciążenia pionowego.



Rys. 6.92. Zestawienie udziałów poszczególnych mocy w mocy całkowitej koła z oponą 8.3-20 na ścierniskach przy trzech poziomach obciążenia pionowego (oznaczenia jak na rysunku 6.81)



Rys. 6.93. Zestawienie udziałów poszczególnych mocy w mocy całkowitej koła z oponą 8.3-20 na drodze, darni oraz glebach przy trzech poziomach obciążenia pionowego (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

Zgodnie z powyższymi zestawieniami największe udziały mocy uciągu (powyżej 40%) wystąpiły na drodze leśnej oraz darni łąkowej. Najniższymi zaś udziałami mocy uciągu (ok. 30%) charakteryzowały się ścierniska. Niski udział mocy uciągu na ścierniskach tłumaczyć należy tym, że na podłożach tych wystąpił duży udział mocy traconej na opór przetaczania. Z kolei na glebie luźnej, gdzie udziały mocy uciągu były nieznacznie wyższe niż na ścierniskach, udział mocy traconej na poślizg był wyższy niż na pozostałych podłożach, co mogło być przyczyną mniejszego udziału mocy uciągu. Na żadnym z badanych podłoży nie zaobserwowano jednolitej tendencji zmian udziałów mocy na skutek zwiększania obciążenia pionowego koła.

Analiza udziałów mocy wydaje się być zgodna ze stwierdzeniem, że na bardziej wytrzymałych podłożach występują niższe straty energii przy przenoszeniu siły trakcyjnej.

Na podłożach o najwyższej wytrzymałości (darń, droga leśna) zaobserwowano bowiem najniższe udziały strat związanych z oporem przetaczania koła oraz jego poślizgiem. Mniejsze straty mocy na opór przetaczania koła na tych podłożach mają związek z wysokimi wartościami zwięzłości a w konsekwencji z niższym oporem przetaczania, co potwierdzają wyniki pomiarów tego parametru (rys. 6.44). Taka sytuacja sprawia, że przenoszenie siły trakcyjnej odbywa się w większym stopniu na skutek zjawiska tarcia opony o wierzchnią warstwę podłoża. Mniejsze straty związane z poślizgiem koła na darni i drodze leśnej mogą być z kolei skutkiem wyższych wartości naprężeń ścinających na tych podłożach a w konsekwencji większą wytrzymałością na siły styczne przenoszone przez koło.

W celu określenia różnic pomiędzy wartościami mocy koła z oponą 8.3-20 przy różnych poziomach czynników dokonano analizy statystycznej w sposób analogiczny jak dla opony 7.5-16. W tabeli 6.37 zaprezentowano wyniki testy normalności rozkładów w odniesieniu do populacji mocy całkowitej i mocy uciagu, natomiast w tabeli 6.38 wyniki testu dla mocy traconej na opór przetaczania i mocy traconej na poślizg. Analizy te wykonano przy użyciu testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Tabela 6.37. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy całkowitej i mocy uciagu koła z oponą 8.3-20 (W – wartość testu, p – poziom prawdopodobieństwa)

Czynnik	Poziom czynnika	Moc całkowita		Moc uciagu	
		W	p	W	p
Rodzaj podłoża	śc. uprawa tradycyjna	0,836439	0,000003	0,938723	0,008248
	śc. uprawa uproszczona	0,954474	0,039100	0,973372	0,270176
	śc. siew bezpośredni	0,985517	0,755663	0,970990	0,213057
	droga leśna	0,977540	0,402219	0,935295	0,005962
	darń łąkowa	0,982543	0,614965	0,984751	0,719695
	gleba zagęszczona	0,976064	0,350517	0,964014	0,104290
	gleba luźna	0,959630	0,066324	0,916052	0,001063
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,985514	0,200780	0,973830	0,015104
	5320 N	0,984567	0,163261	0,965326	0,002560
	6110 N	0,978284	0,040206	0,958299	0,000655
Poślizg koła	5%	0,971847	0,157612	0,966917	0,088006
	10%	0,931747	0,001758	0,920283	0,000569
	15%	0,939870	0,004089	0,939725	0,004026
	20%	0,982436	0,506183	0,956775	0,026732
	25%	0,974465	0,213790	0,939814	0,004065
	30%	0,944826	0,006972	0,981660	0,468911

Tabela 6.38. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy traconych koła z oponą 8.3-20 (*W* – wartość testu, *p* – poziom prawdopodobieństwa)

Czynnik	Poziom czynnika	Moc tracona na opór przetaczania		Moc tracona na poślizg	
		W	p	W	p
Rodzaj podłoża	śc. uprawa tradycyjna	0,956044	0,045893	0,949519	0,023708
	śc. uprawa uproszczona	0,981328	0,558883	0,941815	0,011103
	śc. siew bezpośredni	0,974466	0,300686	0,945356	0,015687
	droga leśna	0,964379	0,108302	0,956519	0,048178
	darń łukowa	0,982951	0,634148	0,954412	0,038855
	gleba zagęszczona	0,946982	0,018417	0,918333	0,001293
	gleba luźna	0,982821	0,628048	0,950008	0,024899
Obciążenie pionowe koła	4620 N	0,984541	0,162343	0,946865	0,000086
	5320 N	0,973807	0,015030	0,939011	0,000024
	6110 N	0,988072	0,343686	0,963702	0,001852
Poślizg koła	5%	0,933975	0,002208	0,974448	0,213369
	10%	0,981749	0,473097	0,980489	0,416129
	15%	0,985728	0,678698	0,983472	0,558410
	20%	0,987574	0,777424	0,978909	0,351944
	25%	0,976522	0,270333	0,976969	0,284247
	30%	0,961459	0,046165	0,963424	0,058196

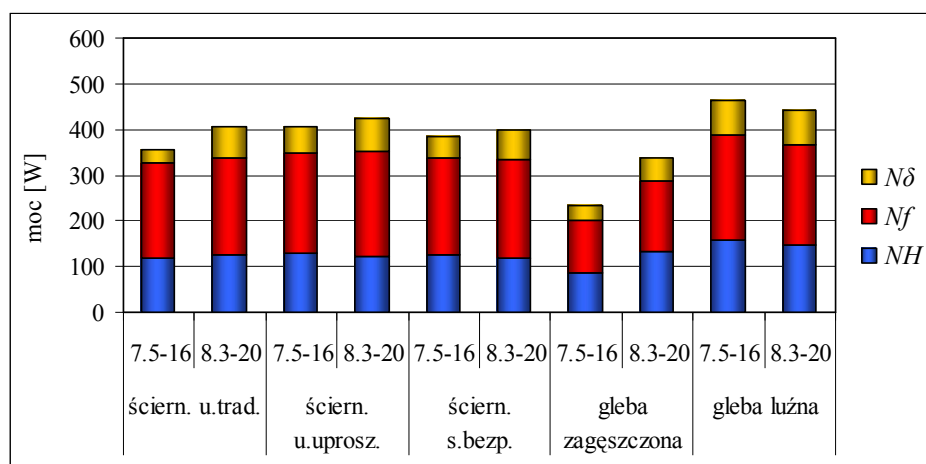
Zgodnie z danymi przedstawionymi w powyższych tabelach w obrębie każdego czynnika występowała populacja, której rozkład nie był zgodny z rozkładem normalnym. Z tego względu nie był spełniony warunek stosowalności wieloczynnikowej analizy wariancji, zatem do oceny wpływu czynników na wartości mocy zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, którego wyniki przedstawiono w tabeli 6.39.

Tabela 6.39. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla wszystkich mocy koła z oponą 8.3-20 (*H* - wartość testu, *p* – prawdopodobieństwo)

Czynnik	Moc uciągu		Moc tracona na opór przetaczania		Moc tracona na poślizg		Moc całkowita	
	H	p	H	p	H	p	H	p
Rodzaj podłoża	162,9898	0,0001	209,5579	0,0002	18,39106	0,0053	147,6322	0,0002
Obciążenie pionowe koła	10,34192	0,0057	11,93800	0,0026	1,936413	0,3798	16,54819	0,0003
Poślizg koła	17,09910	0,0043	6,821885	0,2342	317,9218	0,0003	40,49134	0,0008

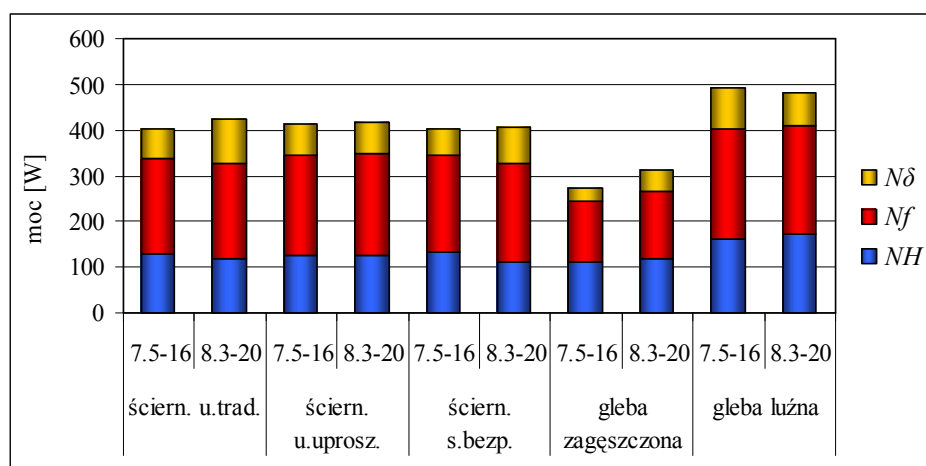
Wyniki analizy statystycznej wykazały, że rodzaj podłoża miał istotny wpływ na wartości wszystkich mocy. W przypadku obciążenia pionowego nie stwierdzono istotnego wpływu na wartość mocy traconej na poślizg, natomiast dla trzeciego z czynników nie stwierdzono jego wpływu na wartość mocy traconej na opór przetaczania. Test porównań wielokrotnych przeprowadzony dla pierwszego czynnika (podłoża) wykazał brak różnic w wartościach mocy całkowitej na wszystkich ścierniskach oraz między ścierniskami a darnią i między glebą zagęszczoną a drogą leśną. W przypadku mocy uciągu brak istotnych różnic dotyczył wszystkich ściernisk oraz par podłoży: ściernisko w uprawie uproszczonej – droga leśna oraz gleba zagęszczona – droga leśna. Dla mocy traconej na opór przetaczania nie zaobserwowano istotnych różnic między wszystkimi ścierniskami i glebą luźną oraz między glebą zagęszczoną a drogą leśną i darnią. Istotne różnice w wartościach mocy traconej na poślizg dotyczyły jedynie kombinacji gleba zagęszczona – gleba luźna oraz droga leśna – gleba luźna. Analiza wpływu obciążenia pionowego wykazała, że istotnie różne wartości mocy całkowitej wystąpiły dla najwyższego poziomu obciążenia, taka sama sytuacja dotyczyła mocy uciągu. Istotne różnice w wartościach mocy traconej na opór przetaczania dotyczyły jedynie skrajnych poziomów obciążeń.

W celu porównania wartości poszczególnych mocy oraz proporcji pomiędzy nimi dokonano zestawień wartości mocy kół z obiema oponami osobno dla poszczególnych poziomów obciążenia pionowego, na tych podłożach, na których były badane obydwie opony. Zestawienie średnich wartości mocy obliczanych dla poślizgu w zakresie 0 – 30% przy najniższym poziomie obciążenia pionowego zilustrowano na rysunku 6.94.



Rys. 6.94. Wartości mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 4620 N (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

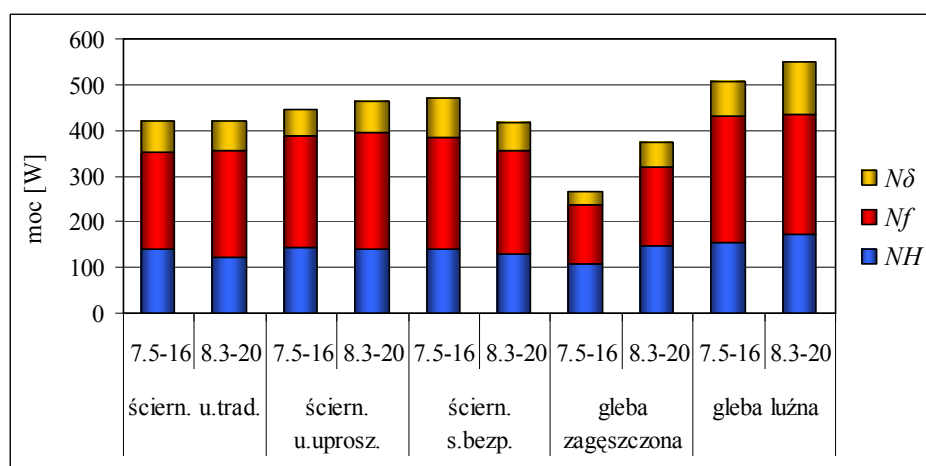
Z przedstawionego powyżej zestawienia wynika, że największa różnica w wartościach mocy występowała na glebie luźnej – całkowita moc w przypadku koła z oponą 8.3-20 była o 43% wyższa. Na wszystkich trzech ścierniskach stwierdzono, że wyższe wartości mocy całkowitej charakteryzowały oponę 8.3-20, przy czym największą różnicę (15%) zaobserwowano na ściernisku w uprawie tradycyjnej, na pozostałych dwóch ścierniskach różnice nie przekraczały 5%. Zmiana rodzaju podłoża skutkowałą mniejszymi zmianami wartości mocy w przypadku opony 8.3-20.



Rys. 6.95. Wartości mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 5320 N (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

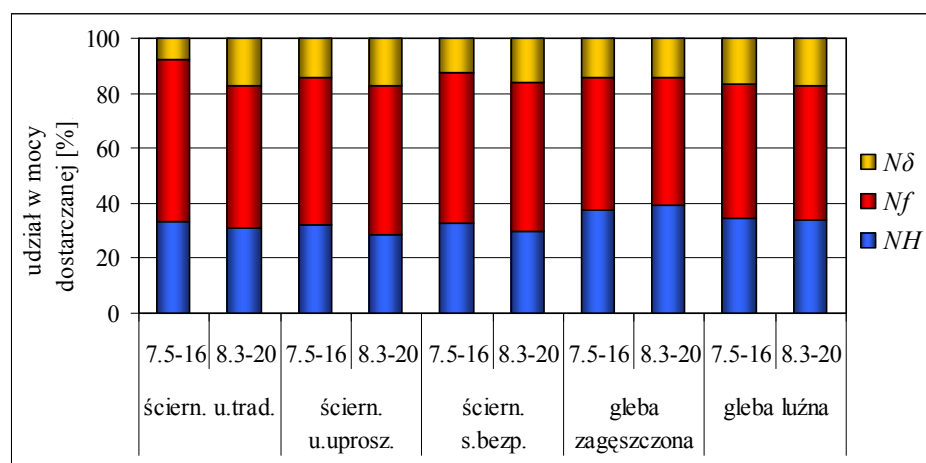
Przy wyższym poziomie obciążenia pionowego (rys. 6.95) zaobserwować można zmniejszenie różnic w wartościach mocy dla poszczególnych opon (w porównaniu z najmniejszym poziomem obciążenia pionowego). Najwyższa różnica wystąpiła na glebie zagęszczonej – koło z oponą 8.3-20 charakteryzowało się mocą całkowitą wyższą o 14%. W przypadku pozostałych podłoży różnice w wartościach mocy dla kół z obiema oponami nie przekraczały 4%. Podobnie jak w poprzednim przypadku wyższe różnice w wartościach mocy na różnych podłożach dotyczyły koła z oponą 7.5-16.

Po zastosowaniu najwyższego poziomu obciążenia (zestawienie na rysunku 6.96) największe różnice pomiędzy mocami kół wyposażonych w badane opony wystąpiły na glebie luźnej i zagęszczonej; w obu tych przypadkach wyższym zapotrzebowaniem na moc charakteryzowało się koło wyposażone w oponę 8.3-20. Analizując wartości mocy na ścierniskach zauważyć można, że największa różnica wystąpiła w siewie bezpośrednim. W tym wypadku koło z oponą 8.3-20 wymagało dostarczenia mocy mniejszej o 12% w porównaniu z kołem wyposażonym w oponę 7.5-16.



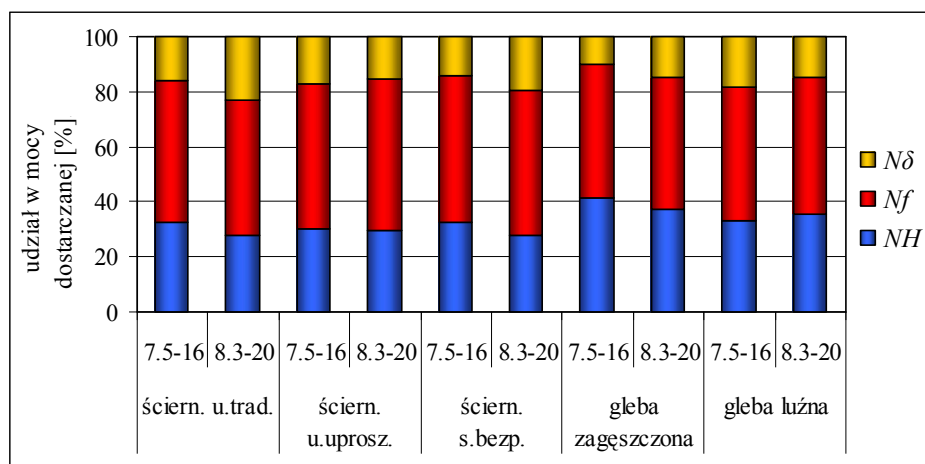
Rys. 6.96. Wartości mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

Porównania kół z obiema badanymi oponami dokonano również w aspekcie udziałów poszczególnych mocy w mocy dostarczanej do koła. Zestawienie tych udziałów przy najmniejszym poziomie obciążenia pionowego zilustrowano na rysunku 6.97.



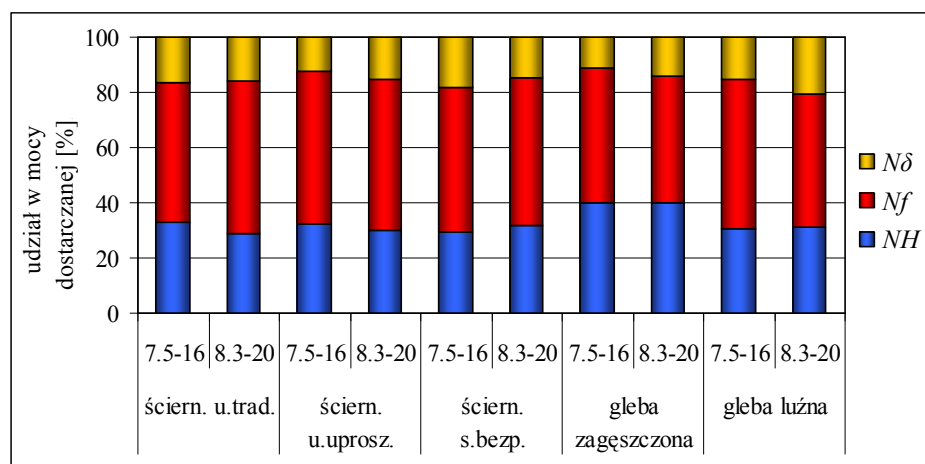
Rys. 6.97. Udziały mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 4620 N (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

Analiza powyższego zestawienia pozwala stwierdzić, że na wszystkich podłożach różnice w udziałach mocy dla kół z obiema oponami były niewielkie. Największa różnica dotyczyła ścierniska w uprawie tradycyjnej, na którym koło z oponą 7.5-16 charakteryzowało się mniejszym udziałem mocy traconej na poślizg. W przypadku wszystkich trzech ściernisk stosowanie większej opony skutkowało uzyskaniem mniejszych wartości mocy uciągu i większymi mocami traconymi na poślizg. Zmiana rodzaju podłoża skutkowała większymi zmianami udziałów mocy w przypadku koła z oponą 7.5-16.



Rys. 6.98. Udziały mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 5320 N (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

Przy obciążeniu pionowym równym 5320 N zaobserwowano, że największe różnice między obiema oponami dotyczyły udziałów mocy traconych na poślizg; na ściernisku w uprawie tradycyjnej i uproszczonej oraz na glebie zagęszczonej wyższe udziały mocy traconej na poślizg dotyczyły koła z oponą 8.3-20. Na pozostałych dwóch podłożach różnice pomiędzy udziałami mocy obu kół były zbliżone. Większymi zmianami proporcji pomiędzy mocami na skutek zmiany rodzaju podłoża charakteryzowało się koło z oponą 7.5-16.



Rys. 6.99. Udziały mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

Przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego (zestawienie na rysunku 6.99) największe różnice pomiędzy oponami wystąpiły na ściernisku w uprawie tradycyjnej oraz na glebie luźnej. W pierwszym przypadku koło wyposażone w oponę 7.5-16 charakteryzowało się większym udziałem mocy uciągu, zaś w drugim przypadku udział mocy traconej na poślizg koła z oponą 8.3-20.

Porównanie obu opon w aspekcie wartości mocy poparto analizą statystyczną. W tabelach 6.40 i 6.41 przedstawiono wyniki testu na zgodność rozkładu populacji badanej cechy z rozkładem normalnym (test Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$).

Tabela 6.40. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy całkowitej oraz mocy uciągu kół z obiema badanymi oponami (W - wartość testu, p – prawdopodobieństwo)

Czynnik	Poziom czynnika	Moc całkowita		Moc uciągu	
		W	p	W	p
Rozmiar opony	7.5-16	0,979136	0,000545	0,976321	0,000184
	8.3-20	0,974708	0,000101	0,938287	0,000000

Tabela 6.41. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy traconych kół z obiema badanymi oponami (W - wartość testu, p – prawdopodobieństwo)

Czynnik	Poziom czynnika	Moc tracona na opór przetaczania		Moc tracona na poślizg	
		W	p	W	p
Rozmiar opony	7.5-16	0,983884	0,003870	0,948739	0,000000
	8.3-20	0,983870	0,003847	0,954905	0,000000

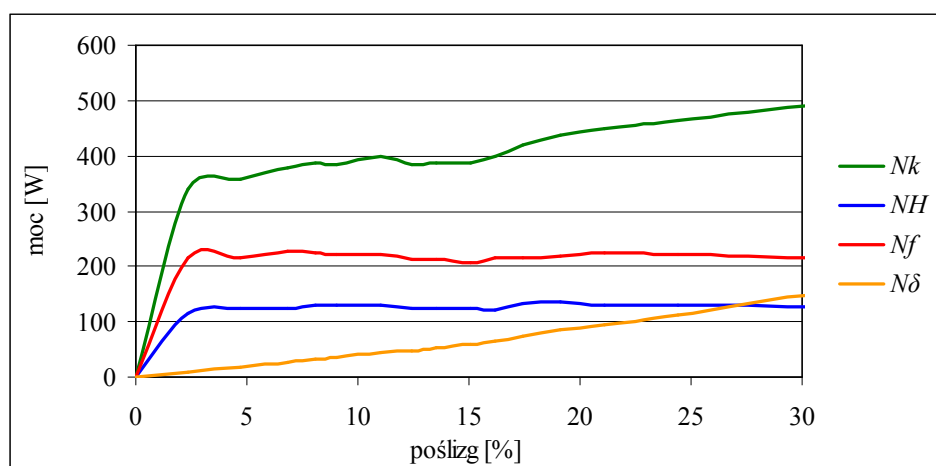
Zgodnie z wynikami przedstawionymi w powyższych tabelach żadna z populacji nie posiadała rozkładu zgodnego z normalnym, toteż do oceny wpływu rozmiaru opony na wartości mocy zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki tego testu przedstawiono w tabeli 6.42.

Tabela 6.42. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla wszystkich mocy kół z obiema badanymi oponami (H - wartość testu, p – prawdopodobieństwo)

Czynnik	Moc uciągu		Moc tracona na opór przetaczania		Moc tracona na poślizg		Moc całkowita	
	H	p	H	p	H	p	H	p
Rozmiar opony	5,75735	0,0164	1,53109	0,2160	0,00584	0,9391	3,29452	0,0695

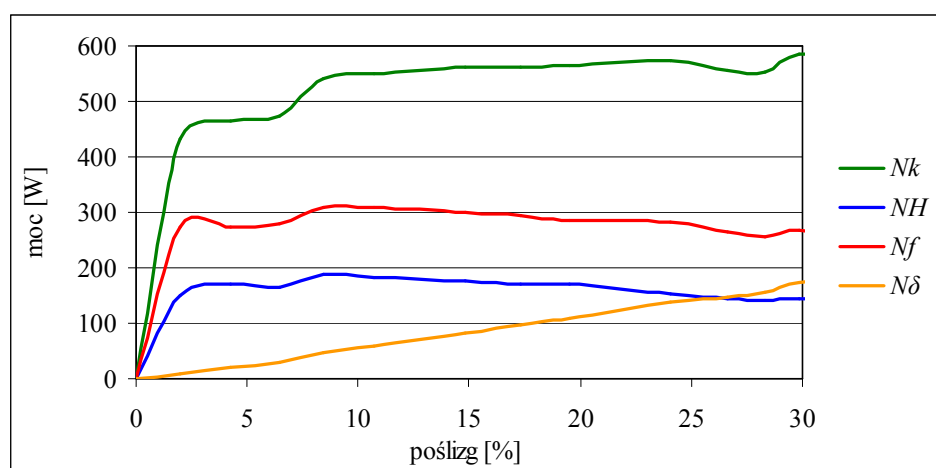
Na podstawie wyników przedstawionych w powyższej tabeli stwierdzić można, że rozmiar opony miał istotny wpływ jedynie na moc uciągu (wartość p była niższa niż założony poziom istotności α).

Analizę bilansu mocy przeprowadzono również w odniesieniu do koła z oponą 8.3-20 wyposażonego w łańcuch antypoślizgowy. Sporządzono przebiegi poszczególnych mocy w funkcji poślizgu, dokonano także zestawień wartości mocy oraz ich udziałów w mocy całkowitej. Na rysunku 6.100 przedstawiono przebiegi poszczególnych mocy koła z łańcuchem antypoślizgowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej.



Rys. 6.100. Przebiegi mocy koła z łańcuchem antypoślizgowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej przy obciążeniu pionowym 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

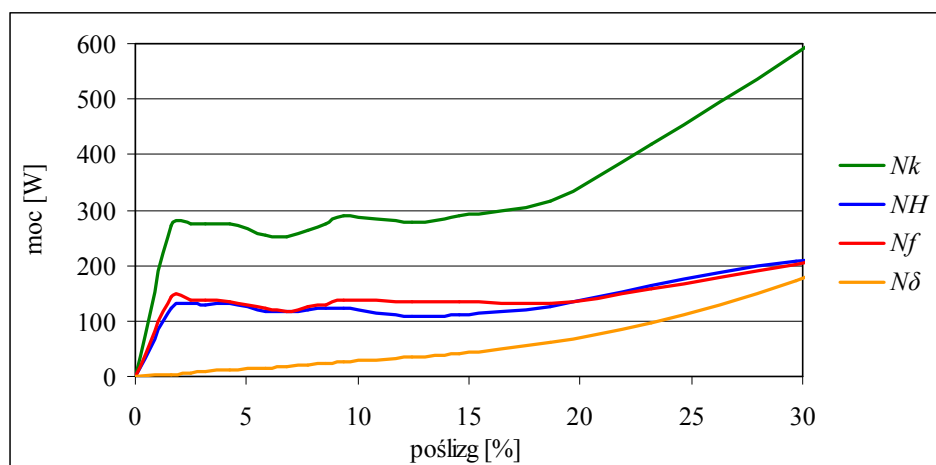
Z przedstawionego powyżej rysunku wynika, że ustabilizowanie przebiegów mocy dostarczanej do koła, mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania następowało przy poślizgu równym 3%. Podobnie jak w przypadku opony bez łańcucha antypoślizgowego wartości mocy traconej na opór przetaczania były wyższe niż mocy uciągu, jednak charakter zmian obu tych mocy był zbliżony (po przekroczeniu poślizgu 3% obserwowano minimalne zmiany wartości). Moc tracona na poślizg cechowała się przyrostem proporcjonalnym do poślizgu; w rozpatrywanym zakresie nie zaobserwowano zmiany tempa przyrostu tej mocy (tak jak miało to miejsce w przypadku opony bez łańcucha).



Rys. 6.101. Przebiegi mocy koła z łańcuchem antypoślizgowym na ściernisku w uprawie uproszczonej przy obciążeniu pionowym 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

Na ściernisku w uprawie uproszczonej charakter zmian mocy był odmienny niż na poprzednio omawianym podłożu. W przypadku mocy dostarczanej do koła zaobserwować można ustabilizowanie przebiegu przy poślizgach z zakresu 2 – 7%.

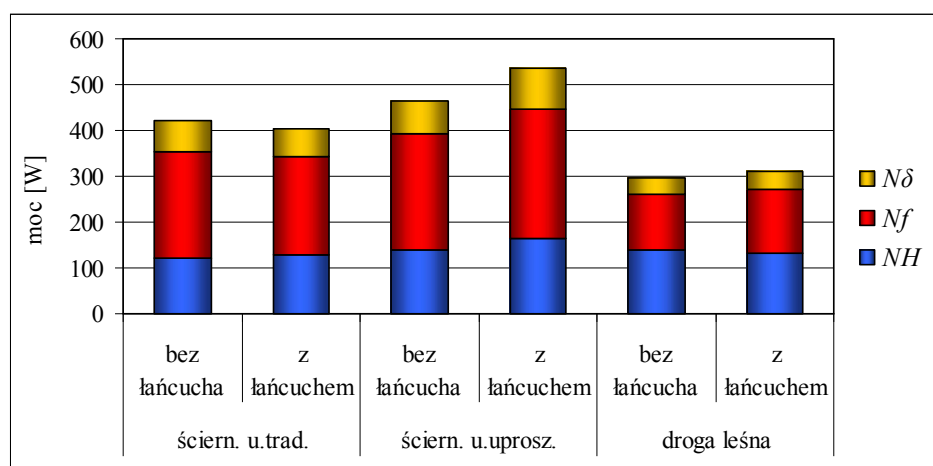
Po przekroczeniu poślizgu równego 7% następuje ponowny przyrost wartości mocy, kolejne ustabilizowanie wystąpiło przy poślizgu 10%. Taka sytuacja może mieć związek z pewnym spadkiem mocy traconej na opór przetaczania przy poślizgach 2 – 6%. Wartości mocy uciągu, podobnie jak na ściernisku w uprawie tradycyjnej, są mniejsze niż mocy traconej na opór przetaczania. Moc tracona na poślizg odznaczała się stałym wzrostem proporcjonalnym do wzrostu poślizgu.



Rys. 6.102. Przebiegi mocy koła z łańcuchem antypoślizgowym na drodze leśnej przy obciążeniu pionowym 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.76)

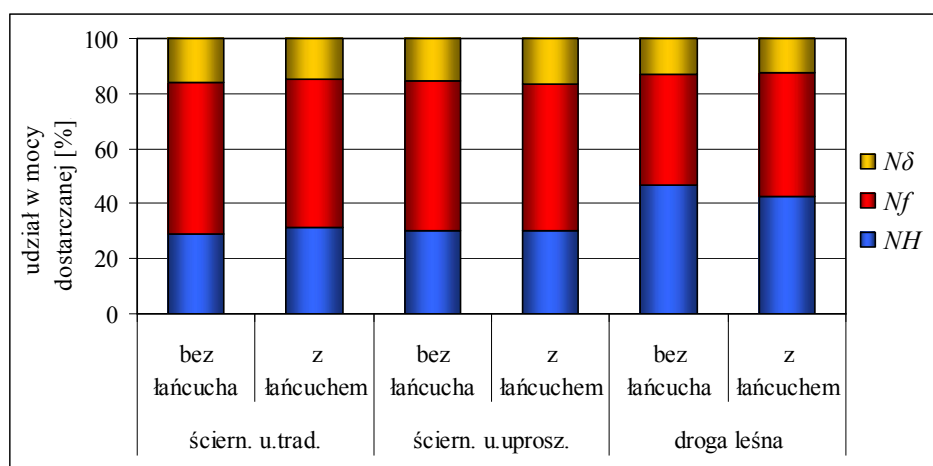
Analizując wykres dotyczący na drogi leśnej (rys. 6.102) zaobserwować można, że największy przyrost mocy dostarczanej do koła, mocy uciągu oraz mocy traconej na opór przetaczania występował przy poślizgach z zakresu 0 – 2%. Po przekroczeniu poślizgu równego 2% następowało ustabilizowanie przebiegów. Kolejny przyrost obserwowano po przekroczeniu poślizgu równego 20%. W przypadku mocy traconej na poślizg zaobserwowano zwiększenie tempa przyrostu po przekroczeniu poślizgu równego 20%. Przedstawiony charakter przebiegów przypuszczalnie ma związek ze sposobem oddziaływania łańcucha oraz znaczną wytrzymałością drogi leśnej. Przypuszczać można, że głębokie działanie łańcucha antypoślizgowego zachodziło przy większym poślizgu (większej deformacji podłoża), co tłumaczyć może wzrosty mocy po przekroczeniu poślizgu równego 20%.

Na rysunku 6.103 zilustrowano zestawienie wartości poszczególnych mocy dla koła z oponą 8.3-20 wyposażonego w łańcuch oraz dla koła bez łańcucha przy tym samym poziomie obciążenia pionowego (6110 N) na trzech rodzajach podłożu. Wartości te, podobnie jak w poprzednich przypadkach, obliczono jako średnie przy poślizgach z zakresu 0 – 30%.



Rys. 6.103. Wartości mocy dla koła z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego przy obciążeniu pionowym 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

Zgodnie z powyższym zestawieniem jedynie na ściernisku w uprawie uproszczonej stosowanie łańcucha antypoślizgowego powodowało zmiany wartości poszczególnych mocy. Zaobserwowano, że po zastosowaniu łańcucha konieczne jest dostarczenie do koła większej mocy, ponadto stwierdzono, że moc uciągu przy zastosowaniu łańcucha była wyższa. Na ściernisku w uprawie tradycyjnej po zastosowaniu łańcucha antypoślizgowego wystąpiła nieco niższa wartość mocy całkowitej, odwrotną sytuację zaobserwowano na drodze leśnej. W obu tych przypadkach różnice nie były jednak większe niż 5%.



Rys. 6.104. Udziały mocy dla koła z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego przy obciążeniu pionowym 6110 N (oznaczenia jak na rysunku 6.81)

Analiza powyższego wykresu pozwala stwierdzić, że na ściernisku w uprawie tradycyjnej wystąpił niewielki wzrost udziału mocy uciągu po zastosowaniu łańcucha antypoślizgowego. Natomiast na drodze leśnej stosowanie łańcucha antypoślizgowego skutkowało spadkiem udziału mocy uciągu i wzrostem udziału mocy traconej na opór

przetaczania. Nie zaobserwowano przy tym zmiany udziałów mocy traconej na poślizg koła.

Do oceny wpływu stosowania łańcucha antypoślizgowego na wartości wszystkich mocy zastosowano analizę statystyczną. W pierwszej kolejności oceniono zgodność rozkładów badanych populacji z rozkładem normalnym za pomocą testu Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki tej analizy zestawiono w tabelach 6.43 i 6.44.

Tabela 6.43. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy całkowitej oraz mocy uciągu koła z oponą 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego

Czynnik	Poziom czynnik	Moc całkowita		Moc uciągu	
		W	p	W	p
Stosowanie łańcucha antypoślizgowego	z łańcuchem	0,935667	0,006174	0,968036	0,157787
	bez łańcucha	0,974456	0,300407	0,981867	0,583491

Tabela 6.44. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy traconych koła z oponą 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego

Czynnik	Poziom czynnik	Moc tracona na opór przetaczania		Moc tracona na poślizg	
		W	p	W	p
Stosowanie łańcucha antypoślizgowego	z łańcuchem	0,936028	0,006388	0,943643	0,013262
	bez łańcucha	0,955929	0,045354	0,956283	0,047028

Zgodnie z uzyskanymi wynikami analizy (tabele 6.43 i 6.44) stwierdzono, że zgodność populacji z rozkładem normalnym dla obu stopni czynnika wystąpiła jedynie w przypadku mocy uciągu. Dla tej zmiennej sprawdzono jednorodność wariancji za pomocą testu Levene'a na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (wyniki w tabeli 6.45).

Tabela 6.45. Wyniki testu jednorodności wariancji (Levene'a) dla mocy uciągu koła z oponą 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego

Zmienna	Wartość testu F	Prawdopodobieństwo p
Sprawność trakcyjna	19,00671	0,000030

Wariancje dla omawianej zmiennej nie były jednorodne, zatem do oceny wpływu stosowania łańcucha na wartość mocy uciągu nie można było zastosować testu parametrycznego. Dla wszystkich zmiennych (mocy) zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; wyniki tego testu zestawiono w tabeli 6.46.

Tabela 6.46. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla wszystkich mocy koła z oponą 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego (H -wartość testu, p – prawdopodobieństwo)

Czynnik	Moc uciągu		Moc tracona na opór przetaczania		Moc tracona na poślizg		Moc całkowita	
	H	p	H	p	H	p	H	p
Stosowanie łańcucha	7,73579	0,0054	3,17575	0,0747	0,09822	0,7540	3,46654	0,0626

Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli 6.46 istotny wpływ rozmiaru opony wystąpił jedynie w przypadku mocy uciągu.

6.3. Teoretyczna ocena transmisji mocy

Zgodnie z założoną koncepcją opracowania wyników, sporządzono ocenę transmisji momentu obrotowego z silnika pojazdu na koła napędowe. Celem takiej oceny było wykazanie jakie muszą być parametry pracy silnika aby siła trakcyjna na kołach przenoszona była przy maksymalnej sprawności trakcyjnej w pełnym zakresie zmienności warunków eksploatacji (na wszystkich badanych podłożach). Uwzględniono przy tym różne wartości przełożeń w układzie napędowym. Analizę przeprowadzono dla skrajnych poziomów obciążenia pionowego kół.

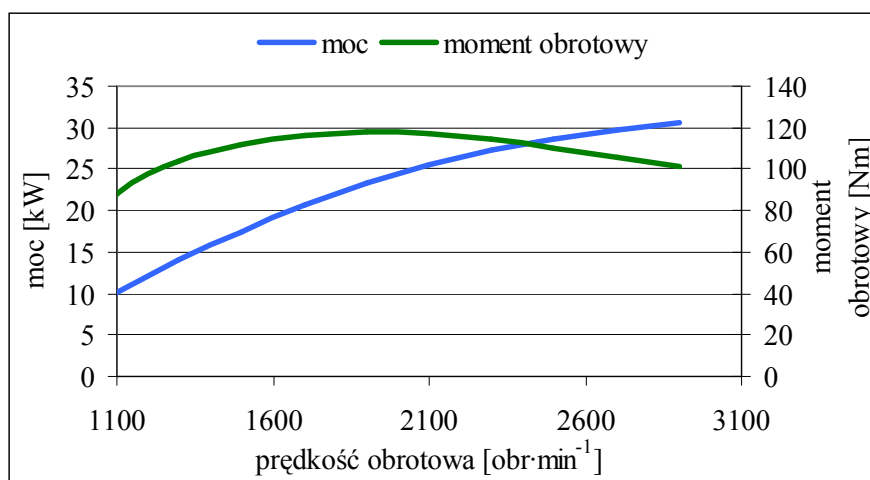
Ocena transmisji momentu obrotowego była przeprowadzona dla hipotetycznego ciągnika 4K2, spełniającego wymogi klas uciągu 4.0 i 6.0 kN. Przewidziano dwa warianty ogumienia na kołach osi napędowej:

- wariant I – opona 7.5-16,
- wariant II – opona 8.3-20.

Założono, że ciągnik napędzany był silnikiem spalinowym o mocy maksymalnej 30,6 kW. Podstawowe parametry tego silnika przedstawiono w tabeli 6.47, natomiast jego zewnętrzną charakterystykę prędkościową na rysunku 6.105.

Tabela 6.47. Zestawienie parametrów silnika ciągnika przyjętego do analizy

Parametr	Wartość
Moc maksymalna [kW]	30,6
Prędkość obrotowa mocy maksymalnej [obr·min ⁻¹]	2900
Moment obrotowy przy mocy maksymalnej [Nm]	101,5
Maksymalny moment obrotowy [Nm]	118,4
Prędkość obrotowa maksymalnego momentu [obr·min ⁻¹]	1900
Minimalne jednostkowe zużycie paliwa [kg·kWh ⁻¹]	222



Rys. 6.105. Zewnętrzna charakterystyka prędkościowa silnika przyjętego do analizy

Przyjęto, że ciągnik współpracował z 5-stopniową skrzynką przekładniową wyposażoną w reduktor podwajający liczbę biegów. Rozpiętość przełożeń była równa 1,5, przełożenie reduktora wynosiło 3,5. Wartości przełożeń na poszczególnych biegach przedstawiono w tabeli 6.48, natomiast zakresy prędkości na poszczególnych biegach – w tabeli 6.49. Wartości prędkości dla wariantu I i II różniły się ze względu na odmienne średnice opon stosowanych na osi napędowej, toteż przedstawione zostały oddzielnie.

Tabela 6.48. Wartości przełożeń skrzynki przekładniowej ciągnika przyjętego do analizy

Bieg	Przełożenie [-]	
	Bez reduktora	Z reduktorem
I	65,6	229,6
II	43,7	153,0
III	29,1	101,9
IV	19,4	67,9
V	12,9	45,2

Tabela 6.49. Zakresy prędkości jazdy hipotetycznego ciągnika na poszczególnych biegach

Bieg	Wariant I (7.5-16)				Wariant II (8.3-20)			
	bez reduktora		z reduktorem		bez reduktora		z reduktorem	
	V_{min} [km·h ⁻¹]	V_{max} [km·h ⁻¹]	V_{min} [km·h ⁻¹]	V_{max} [km·h ⁻¹]	V_{min} [km·h ⁻¹]	V_{max} [km·h ⁻¹]	V_{min} [km·h ⁻¹]	V_{max} [km·h ⁻¹]
I	2,01	5,83	0,57	1,67	2,36	6,83	0,67	1,95
II	3,02	8,76	0,86	2,50	3,54	10,26	1,01	2,93
III	4,53	13,15	1,3	3,76	5,31	15,40	1,52	4,40
IV	6,80	19,72	1,94	5,64	7,97	23,11	2,28	6,61
V	10,23	29,66	2,92	8,48	12,04	34,75	3,42	9,93

Celem omawianej analizy było wyznaczenie wartości mocy silnika i jego momentu obrotowego oraz prędkości obrotowych przy jakich wartości te występowały. Parametry te obliczano z wykorzystaniem wyników uzyskanych po badaniach trakcyjnych II etapu. Podstawą do sporządzenia analizy były wartości siły trakcyjnej odpowiadające maksymalnym sprawnościom trakcyjnym badanych opon. W przypadku opony 7.5-16 analiza została dokonana dla 5 podłoży (ścierniska przy trzech systemach uprawowych, gleba zagęszczona, gleba luźna). Druga z badanych opon analizowana była na 7 podłożach (ścierniska przy trzech systemach uprawowych, gleba zagęszczona, gleba luźna, droga leśna, darń). Wartości siły trakcyjnej wykorzystane do obliczeń przedstawiono w tabelach 6.50 i 6.51, kolejno dla opony 7.5-16 i 8.3-20.

Tabela 6.50. Wartości siły trakcyjnej opony 7.5-16 wykorzystane do oceny transmisji mocy hipotetycznego ciągnika

Obciążenie pionowe koła [N]	Siła trakcyjna przy maksymalnej sprawności trakcyjnej [N]				
	Śc. uprawa tradycyjna	Śc. uprawa uproszczona	Śc. siew bezpośredni	Gleba zagęszczona	Gleba luźna
4620	3558	3467	3220	2138	3857
6110	3455	3633	3621	2783	4319

Tabela 6.51. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 wykorzystane do oceny transmisji mocy hipotetycznego ciągnika

Obciążenie pionowe koła [N]	Siła trakcyjna przy maksymalnej sprawności trakcyjnej [N]						
	Śc. uprawa tradycyjna	Śc. uprawa uproszczona	Śc. siew bezpośredni	Droga leśna	Darń	Gleba zagęszczona	Gleba luźna
4620	3113	3263	3137	2457	2337	2355	2770
6110	3517	4261	3510	2516	2770	2490	4088

Wartości poślizgów, przy których występowały przyjęte siły trakcyjne przedstawiono w tabelach 6.52 i 6.53, kolejno dla opony 7.5-16 i 8.3-20.

Tabela 6.52. Wartości poślizgów odpowiadających maksymalnej sprawności trakcyjnej opony 7.5-16

Obciążenie pionowe koła [N]	Poślizg przy maksymalnej sprawności trakcyjnej [%]				
	Śc. uprawa tradycyjna	Śc. uprawa uproszczona	Śc. siew bezpośredni	Gleba zagęszczona	Gleba luźna
4620	2,6	4,1	4,2	2,8	4,1
6110	3,4	4,2	9,3	3,9	5,0

Tabela 6.53. Wartości poślizgów odpowiadających maksymalnej sprawności trakcyjnej opony 8.3-20

Obciążenie pionowe koła [N]	Poślizg przy maksymalnej sprawności trakcyjnej [N]						
	Śc. uprawa tradycyjna	Śc. uprawa uproszczona	Śc. siew bezpośredni	Droga leśna	Darń	Gleba zagęszczona	Gleba luźna
4620	6,7	6,2	4,3	7,5	3,2	4,2	3,3
6110	5,2	6,4	6,9	3,5	4,9	3,2	8,4

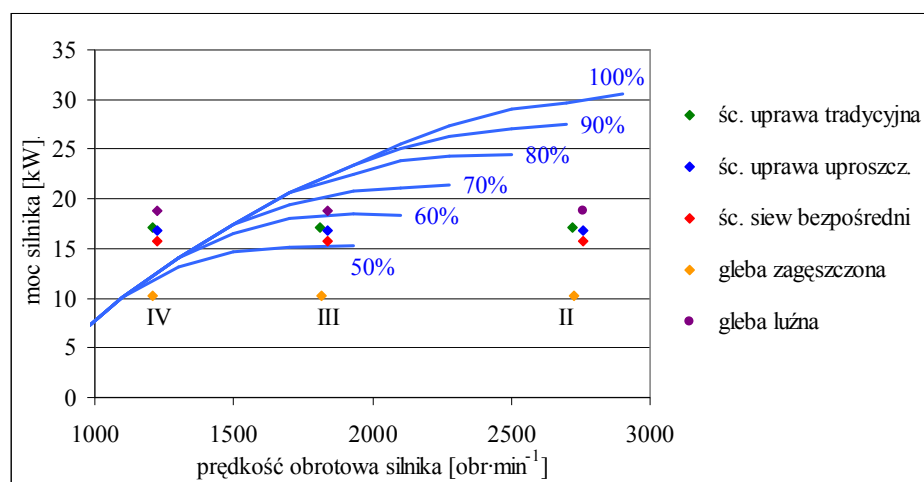
Obliczenia rozpoczęto od wyznaczenia wartości momentu obrotowego na kołach napędowych z wykorzystaniem wartości siły trakcyjnej i promienia dynamicznego. Następnie obliczano prędkość obrotową kół napędowych przy zadanej prędkości jazdy ciągnika. Dla uproszczenia przyjęto, że obydwa koła na osi napędowej ciągnika toczyły się z takimi samymi prędkościami i występowały na nich takie same momenty obrotowe. Założono, że wartość sprawności mechanicznej w układzie przeniesienia napędu dla wszystkich przypadków była jednakowa i wynosiła 95%. Znając wartość prędkości obrotowej na kołach, wartość przełożenia w układzie napędowym i uwzględniając wartości poślizgów (tab. 6.55 i 6.56) obliczono prędkości obrotowe na wale korbowym silnika. W dalszej kolejności możliwe było wyznaczenie momentu obrotowego silnika. Końcowym etapem analizy było ustalenie jaka moc silnika jest niezbędna do zapewnienia ruchu ciągnika z założonymi prędkościami jazdy i przy przyjętych siłach trakcyjnych na poszczególnych podłożach. Do analizy wybrano prędkości 8 i 12 km·h⁻¹; prędkości te odpowiadały zmienności warunków eksploatacji przyjętego ciągnika (prędkości robocze na ścierniskach, glebach i darni oraz transportowe na drodze leśnej).

6.3.1. Wariant I – ciągnik wyposażony w opony napędowe 7.5-16

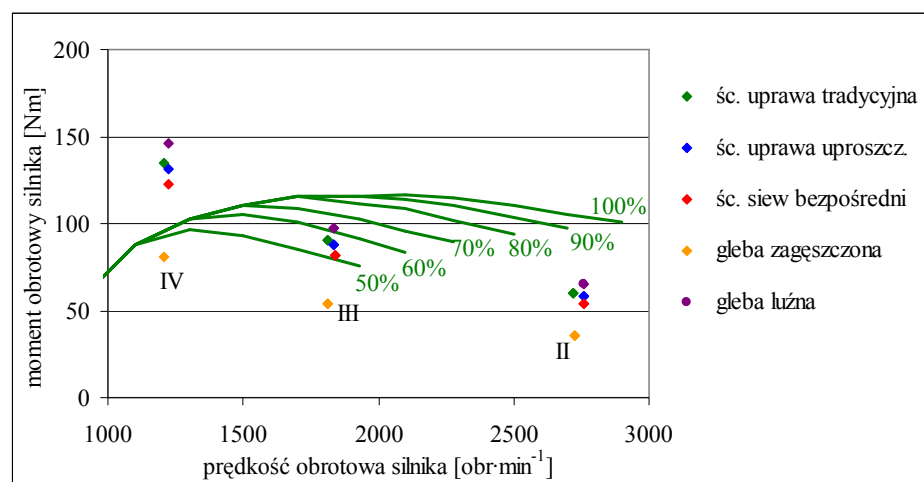
Prędkość jazdy 8 km·h⁻¹

Zgodnie z tabelą 6.52 ciągnik wyposażony w opony 7.5-16 prędkość jazdy równą 8 km·h⁻¹ teoretycznie może osiągnąć na biegach II, III, IV oraz VR. Ze względu na występowanie poślizgu kół prędkości obrotowe silnika były wyższe niż wynikające z przełożeń, w przypadku biegu VR przekraczały wartości maksymalne, toteż ten bieg nie był uwzględniany przy analizie. Na rysunku 6.106 przedstawiono przebiegi mocy (całkowitej oraz częściowych) w funkcji prędkości obrotowej silnika z naniesionymi wartościami mocy niezbędnymi do zapewnienia jazdy ciągnika na poszczególnych podłożach. Zestawienie to sporządzono dla najniższego poziomu obciążenia pionowego

(9240 N na oś napędową). Na rysunku 6.107 dokonano natomiast zestawienia wartości momentów obrotowych dla opisanego powyżej przypadku eksploatacji.



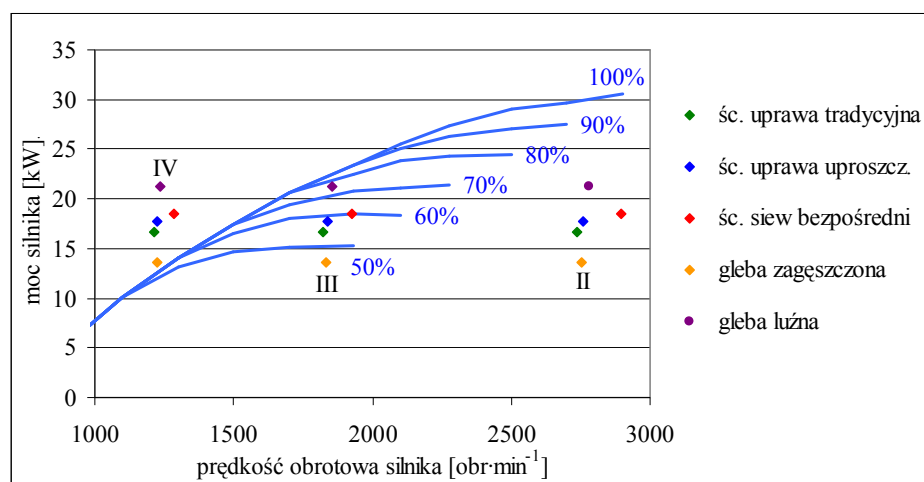
Rys. 6.106. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N



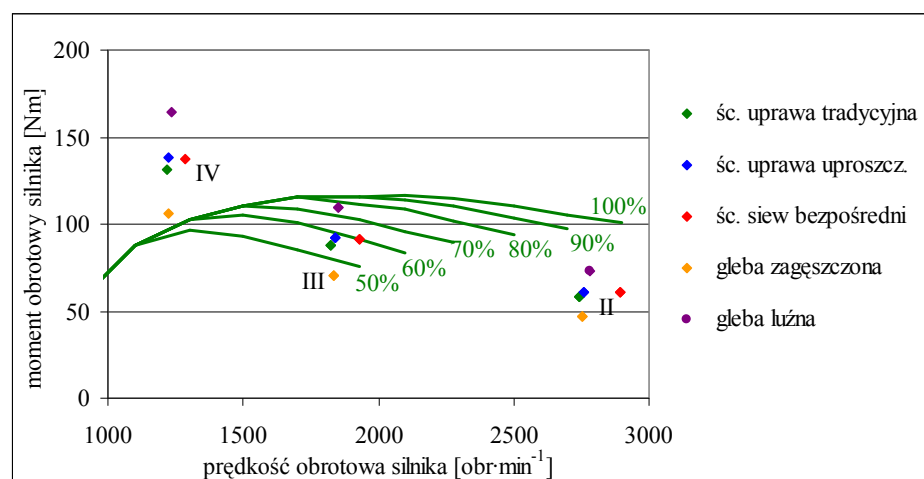
Rys. 6.107. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N

Analizując przedstawione powyżej zestawienia stwierdzić można, że na ścierniskach oraz na glebie luźnej najkorzystniejsze warunki eksploatacji wystąpią na biegu III – silnik będzie wówczas obciążony w granicach 50 – 60%. Na glebie zagęszczonej korzystne będzie zastosowanie biegu IV, przy którym silnik ciągnika będzie jeszcze dysponował pewną nadwyżką mocy. W przypadku biegu II silnik ciągnika będzie pracował z wysokimi prędkościami obrotowymi, jednak dostępna przy tych prędkościach moc nie będzie w pełni wykorzystywana. Eksploatacja na biegu IV ciągnika na ścierniskach i glebie zagęszczonej nie jest możliwa ponieważ wartości mocy i momentu obrotowego znacznie przekraczają poziom maksymalny.

Na rysunkach 6.108 i 6.109 przedstawiono wyniki analizy dla opony 7.5-16 przy prędkości jazdy $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ i maksymalnym poziomie obciążenia pionowego osi (12220 N).



Rys. 6.108. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N



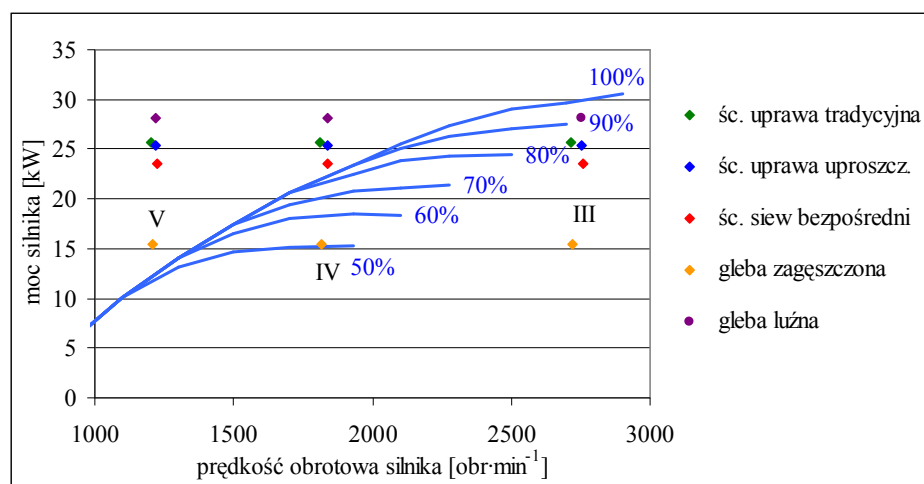
Rys. 6.109. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N

Zgodnie z powyższymi zestawieniami najkorzystniejsze warunki eksploatacji przy prędkości jazdy $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ i obciążeniu pionowym osi napędowej 12220 N wystąpiły na biegu III. Na ścierniskach i glebie luźnej wymagane wartości mocy silnika zawierają się wówczas w granicach 17 – 22 kW, co stanowi 55 – 72% mocy maksymalnej. Na ścierniskach, na III biegu wartości momentu obrotowego silnika zawierają się w granicach 88 – 92 Nm, na glebie luźnej wartość momentu wynosi 109 Nm, co stanowi ok. 90% momentu maksymalnego. Niższe wartości mocy silnika i jego momentu obrotowego na III biegu wystąpiły na glebie zagęszczonej – silnik był obciążony w mniej

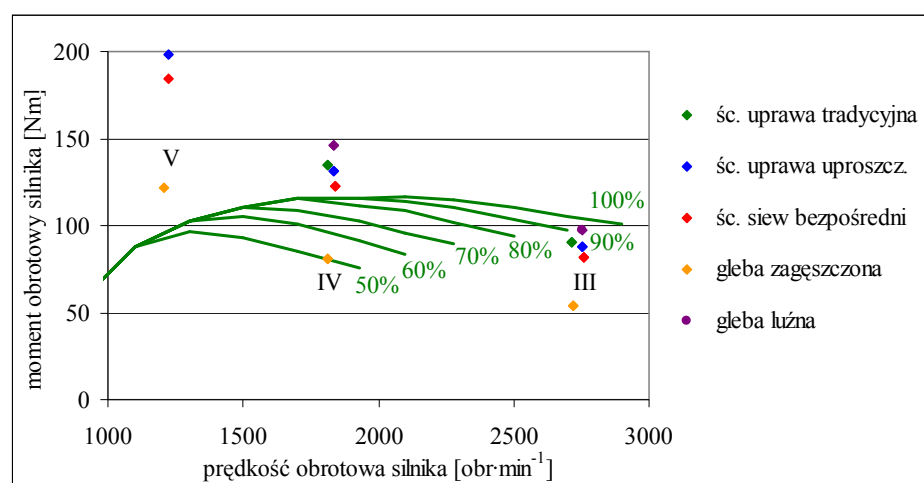
niż 50%. Podobnie jak w przypadku najmniejszego obciążenia pionowego, eksploatacja ciągnika na biegu II oznaczałaby niewykorzystanie dostępnej mocy i momentu silnika. Na najwyższym biegu (IV) wartości mocy oraz momentu obrotowego przekraczały poziom maksymalny, toteż eksploatacja nie byłaby możliwa.

Prędkość jazdy $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

Prędkość jazdy $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ciągnik wyposażony w opony 7.5-16 teoretycznie może rozwinąć na biegach III, IV i V. Analogicznie jak w poprzednim przypadku dokonano zestawień wartości mocy i momentu obrotowego na tle krzywych mocy i momentu silnika, przy dwóch skrajnych poziomach obciążenia pionowego osi napędowej. Na rysunku 6.110 przedstawiono wartości mocy, zaś na rysunku 6.111 – wartości momentu obrotowego.



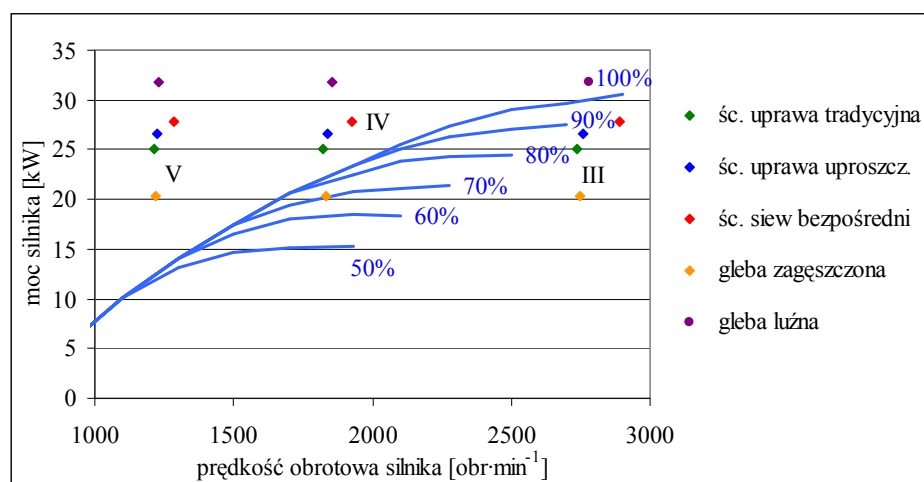
Rys. 6.110. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N



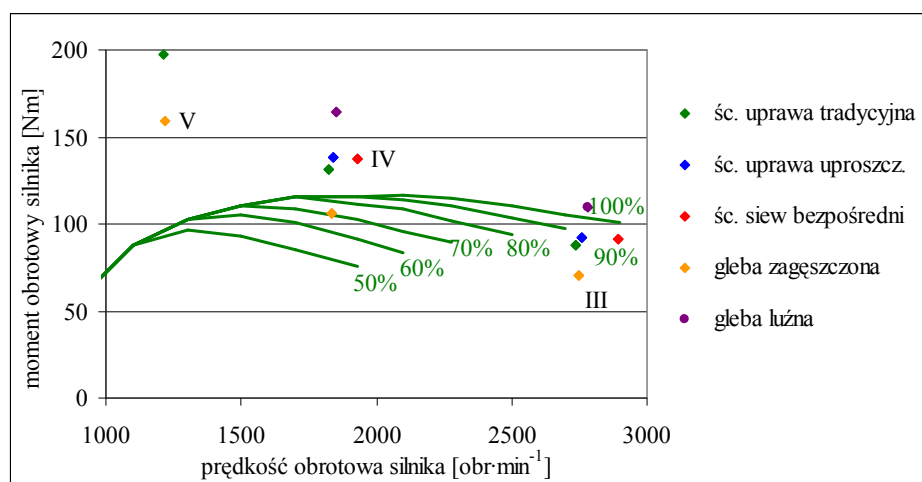
Rys. 6.111. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N

Zgodnie z ogólnym równaniem mocy, jazda z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ przy niezmienionych wartościach siły trakcyjnej będzie wymagała wyższej mocy silnika niż miało to miejsce w przypadku prędkości jazdy $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 6.111 i 6.112 zaobserwować można, że na najwyższym biegu (V) eksploatacja ciągnika nie jest w tym przypadku możliwa ze względu na duże wartości mocy i momentu obrotowego. Na glebie luźnej i ściernisku w uprawie tradycyjnej zapotrzebowanie na moment obrotowy było wyższe niż 200 Nm a zatem ponad dwukrotnie przekraczało wartości maksymalne dostępne przy prędkości obrotowej silnika odpowiadającej przełożeniu V biegu). Na biegu III eksploatacja będzie najbardziej korzystna na ścierniskach oraz glebie luźnej – wówczas wartości mocy wynosić będą $24 - 28 \text{ kW}$, a momentu obrotowego $82 - 97 \text{ Nm}$, zbliżając się tym samym do maksymalnych wartości dostępnych przy danej prędkości obrotowej. Na glebie zagęszczonej korzystniejsze będzie wykorzystanie biegu IV – wówczas moc i moment silnika będą odpowiadać obciążeniu silnika w 50% przy prędkości obrotowej $1800 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$. Na biegu IV nie jest jednak możliwa eksploatacja ciągnika na ścierniskach i glebie luźnej, gdyż zapotrzebowanie na moc i moment przekracza wartości maksymalne dostępne przy prędkości obrotowej wynikającej z przełożenia na omawianym biegu.

Na rysunkach 6.112 i 6.113 przedstawiono wartości mocy i momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony napędowe 7.5-16, przy zadanej prędkości jazdy $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Obciążenie pionowe osi napędowej wynosi w tym wypadku 12220 N , co odpowiada obciążeniu jednego koła 6110 N .



Rys. 6.112. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N



Rys. 6.113. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N

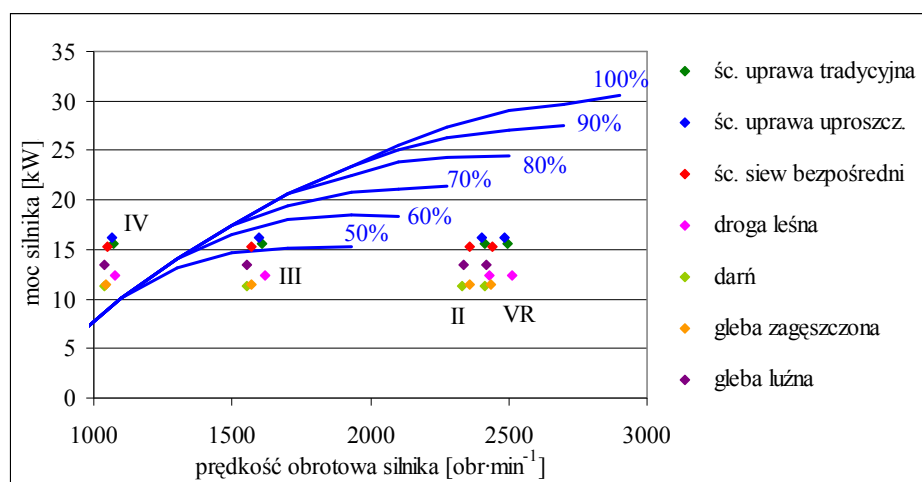
Przy największym pionowym obciążeniu osi napędowej wartości mocy i momentu obrotowego są wyższe niż miało to miejsce przy najniższym obciążeniu pionowym. Na ścierniskach eksploatacja ciągnika możliwa jest tylko przy załączonym biegu III – wartości mocy i momentu występują wówczas przy prędkości obrotowej $2700 - 2900 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ i wynoszą $25 - 28 \text{ kW}$. Odpowiadające im wartości momentu obrotowego zawierają się natomiast w granicach $88 - 92 \text{ Nm}$. Najkorzystniejsze warunki eksploatacji ciągnika na glebie zagęszczonej wystąpią przy załączonym biegu IV – wartość mocy wyniesie wówczas 20 kW , a momentu obrotowego – 106 Nm , co odpowiada obciążeniu silnika w 70% (przy prędkości obrotowej $1830 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$). Przy założonych parametrach nie jest możliwe osiągnięcie wymaganej siły trakcyjnej na glebie luźnej – przy wszystkich przełożeniach zapotrzebowanie na moc i moment przekracza wartości maksymalne.

6.3.2. Wariant II – ciągnik wyposażony w opony napędowe 8.3-20

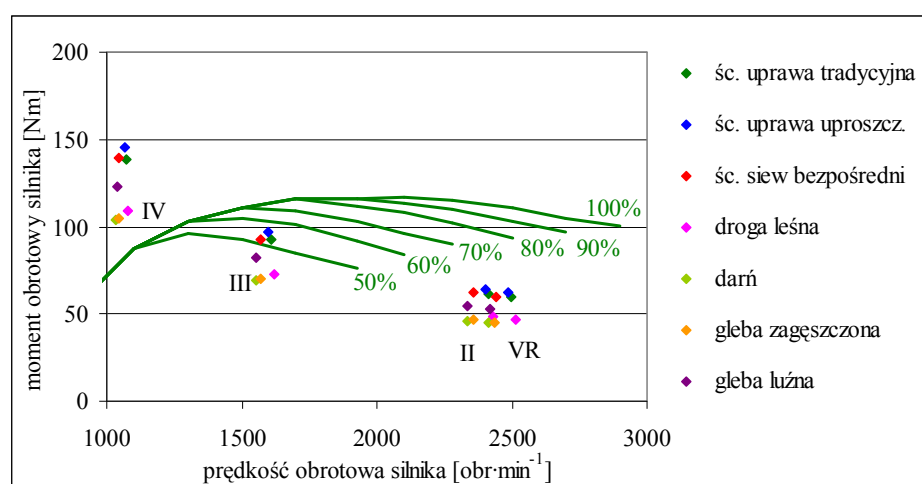
Analiza zapotrzebowania na moc i moment dla ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 została przeprowadzona analogicznie jak poprzednio. Różnica dotyczyła jedynie ilości podłoża, na których eksploatowany był hipotetyczny ciągnik – oprócz omawianych poprzednio podłoży, w analizie uwzględniono darń oraz drogę leśną.

Prędkość jazdy $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

Zgodnie z tabelą 6.52 prędkość jazdy $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ w przypadku ciągnika z oponami 8.3-20 jest możliwa na biegach II, III, IV i VR. Na rysunkach 6.114 i 6.115 przedstawiono wartości mocy i momentu obrotowego przy obciążeniu pionowym osi napędowej 9240 N .



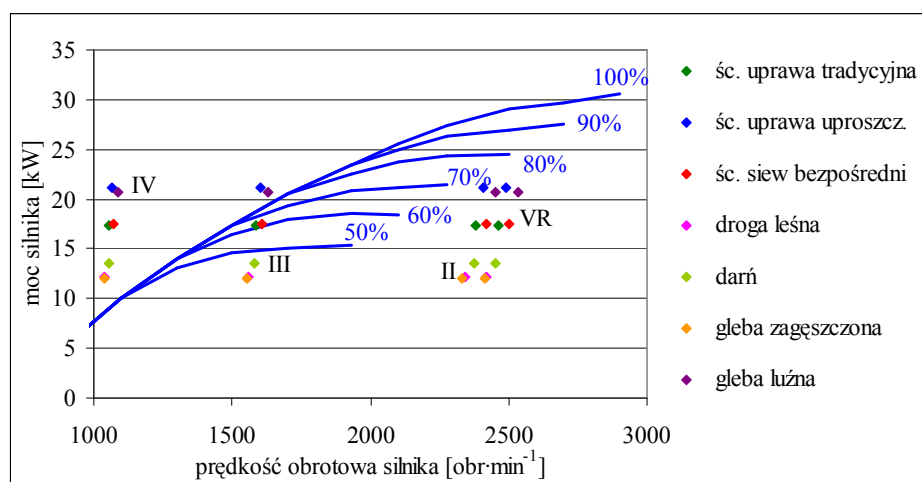
Rys. 6.114. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N



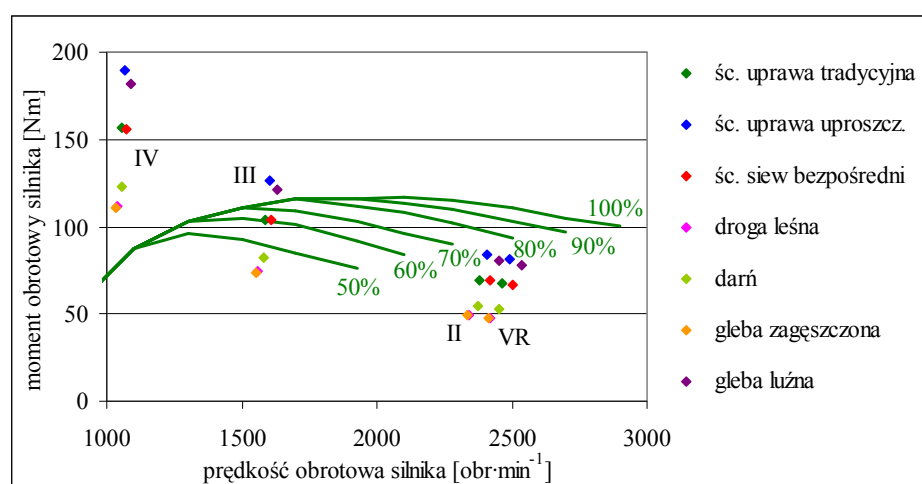
Rys. 6.115. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N

Zgodnie z powyższymi zestawieniami, na biegu IV nie była możliwa eksploatacja na wszystkich rozpatrywanych podłożach (zapotrzebowanie na moc i moment obrotowy było wyższe niż wartości maksymalne dostępne przy danej prędkości obrotowej). Na biegach II oraz VR występował duży w stosunku do zapotrzebowania zapas mocy i momentu obrotowego. Jazda ciągnika na biegu III na ścierniskach wymagała dostarczenia mocy w granicach $15 - 17 \text{ kW}$ i momentu obrotowego $93 - 97 \text{ Nm}$ przy prędkości obrotowej silnika ok. $1600 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$. Oznaczało to, że silnik był obciążony w zakresie $50 - 60\%$. Niższe zapotrzebowanie na moc i moment na biegu III wystąpiło w przypadku bardziej zwięzłych podłoży – obciążenie silnika nie przekraczało 50% .

Zapotrzebowanie na moc i moment obrotowy przy prędkości $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ i wyższym obciążeniu pionowym osi napędowej przedstawiono na rysunkach 6.116 i 6.117.



Rys. 6.116. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N

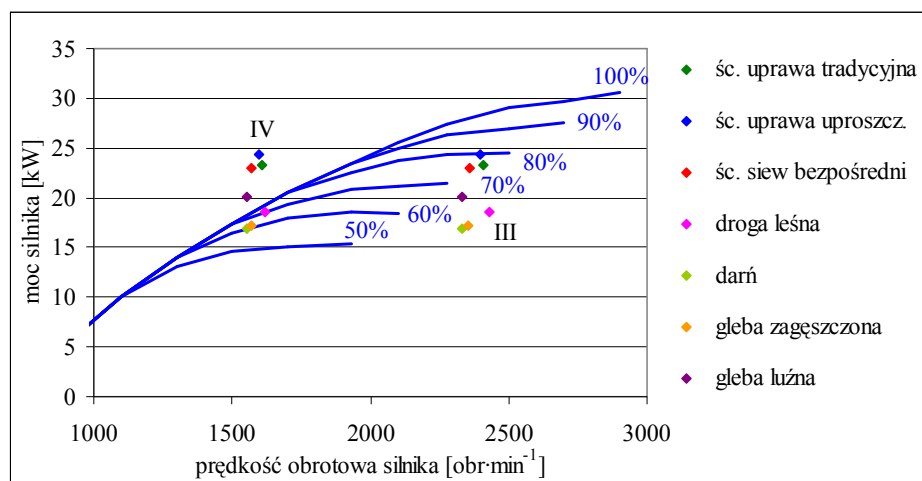


Rys. 6.117. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N

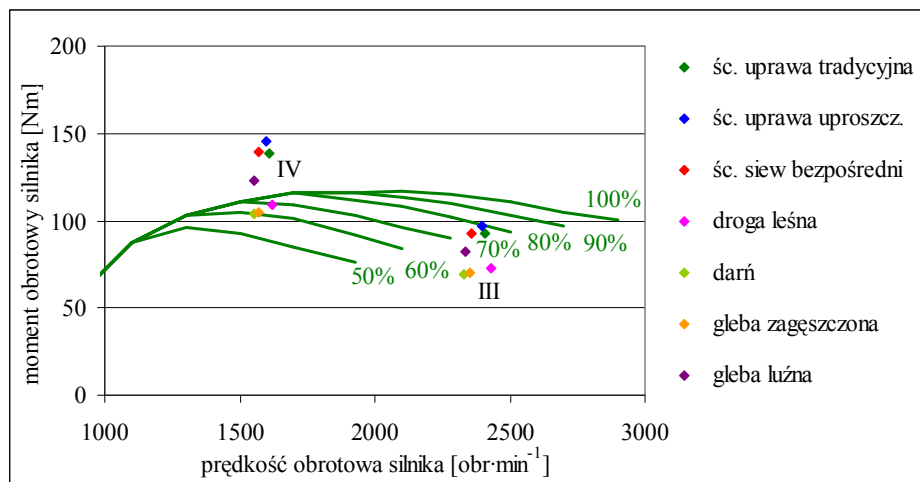
Analiza wykresów przedstawionych na rysunkach 6.116 i 6.117 pozwala stwierdzić, że nie była możliwa eksploatacja ciągnika na biegu IV, podobnie jak w przypadku niższego poziomu obciążenia osi. Na glebie luźnej oraz na ściernisku w uprawie uproszczonej najkorzystniejsze warunki pracy silnika wystąpiły na biegach II i VR; wartości mocy wówczas w granicach $20 - 22 \text{ kW}$ odpowiadały prędkościom obrotowym $2400 - 2500 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$, moment obrotowy wynosił $78 - 84 \text{ Nm}$. Na ściernisku w siewie bezpośrednim i uprawie tradycyjnej korzystniejsze było wykorzystanie biegu III – wartości mocy i momentu wystąpiły wówczas przy prędkości obrotowej ok. $1600 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ i odpowiadały obciążeniu silnika w 60%. Na podłożach o największej zwięzłości (darń, droga leśna i gleba zagęszczona) na biegach II, III i VR występowała nadwyżka mocy i momentu obrotowego.

Prędkość jazdy 12 km·h⁻¹

Prędkość jazdy równą 12 km·h⁻¹ ciągnik wyposażony w opony napędowe 8.3-20 może rozwinąć jedynie na dwóch biegach: III i IV. Na rysunkach 6.118 i 6.119 przedstawiono zapotrzebowania na moc i moment ciągnika jadącego z prędkością 12 km·h⁻¹ przy najmniejszym poziomie obciążenia pionowego osi napędowej.



Rys. 6.118. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością 12 km·h⁻¹, przy obciążeniu pionowym osi 9420 N

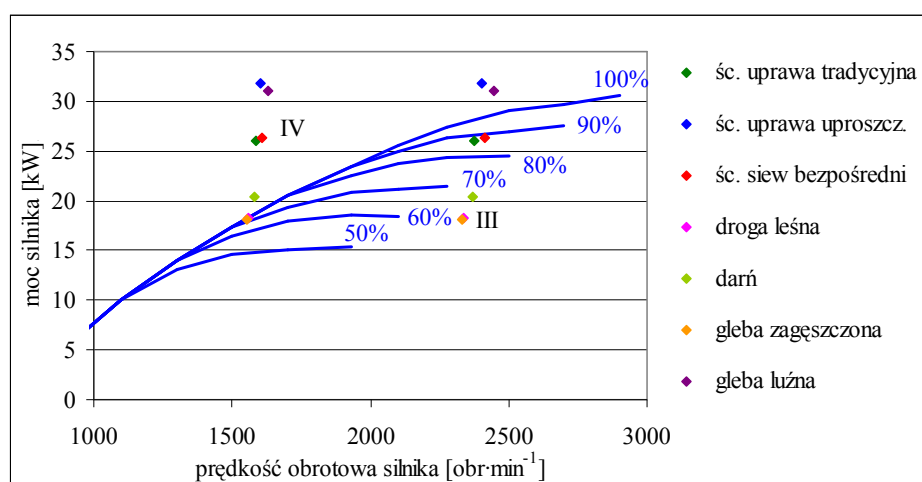


Rys. 6.119. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością 12 km·h⁻¹, przy obciążeniu pionowym osi 9420 N

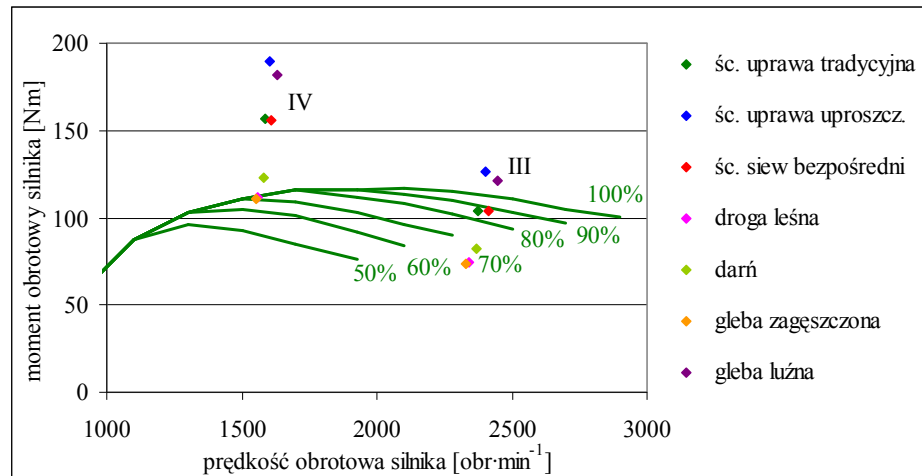
Zgodnie z powyższym zestawieniem, jazda ciągnika na ścierniskach oraz glebie luźnej możliwa jest jedynie na biegu III. Zapotrzebowanie na moc silnika wyniesie wówczas 20 – 24 kW, natomiast na moment obrotowy 82 – 97 Nm. Wartości te wystąpiły przy prędkości obrotowej 2300 – 2400 obr·min⁻¹ i odpowiadają obciążeniu silnika w granicach 75 – 80%. Na bardziej zwięzłych podłożach jazda możliwa jest na obu biegach, jednak w przypadku biegu III moc będzie wykorzystywana w niewielkim stopniu.

Wykorzystanie w tym przypadku biegu IV spowoduje, że silnik będzie obciążony w zakresie 60 – 70%, przy prędkości obrotowej 15000 – 1600 obr·min⁻¹.

Ostatni z przypadków, czyli jazda z prędkością 12 km·h⁻¹ przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego osi napędowej została zilustrowana na rysunkach 6.120 i 6.121.



Rys. 6.120. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością 12 km·h⁻¹, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N



Rys. 6.121. Zestawienie momentu silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością 12 km·h⁻¹, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N

Przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego osi napędowej, jazda ciągnika na ścierniskach w siewie bezpośrednim i uprawie tradycyjnej oraz darni jest możliwa jedynie na biegu III. W tym przypadku na ścierniskach zapotrzebowanie na moc wyniesie ok. 26 kW a na moment obrotowy – 104 Nm. W przypadku darni wartości te będą mniejsze (odpowiednio 20 kW i 82 Nm). Eksploatacja ciągnika na glebie zagęszczonej oraz drodze leśnej jest możliwa na obu przyjętych biegach, jednak na niższym biegu moc

i moment silnika nie będą w pełni wykorzystane, zatem korzystniejsza będzie praca na biegu IV. Moc i moment obrotowy będą wówczas wykorzystywane w 98 – 100% przy prędkości obrotowej ok. $1550 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$. W przypadku ścierniska w uprawie uproszczonej oraz gleby luźnej eksploatacja ciągnika przy założonych parametrach nie jest możliwa na żadnym z przyjętych biegów, ponieważ zapotrzebowanie na moc przekracza wartości maksymalne dostępne przy prędkościach obrotowych wynikających z przełożeń.

7. Podsumowanie i wnioski

7.1. Podsumowanie

Zgodnie z założoną koncepcją oraz przyjętymi celami pracy przeprowadzono analizę właściwości trakcyjnych w odniesieniu do opon przeznaczonych do uniwersalnego ciągnika rolniczego. Koncepcja uniwersalnego ciągnika rolniczego przejawia się tym, że może on być użytkowany do różnych prac, na odmiennych podłożach, przy czym zazwyczaj w ciągniku takim nie dokonuje się zmiany ogumienia w zależności od rodzaju podłoża, na którym pracuje. Eksploatacja takiego ciągnika na odmiennych podłożach może skutkować różnymi warunkami przenoszenia siły trakcyjnej – w konsekwencji przy zmianie podłoża może dojść do powstawania strat energii układzie koło – podłoże. Powyższe względy sprawiły, że wyznaczono właściwości trakcyjne opon uniwersalnego ciągnika rolniczego na podłożach rolniczych o odmiennych właściwościach. Z uwagi na to, że uniwersalne ciągniki rolnicze są zazwyczaj zaliczane do niższych klas uciągu, analizę właściwości trakcyjnych przeprowadzono dla opon o stosunkowo niewielkich wymiarach zewnętrznych (o średnicach zewnętrznych nieprzekraczających 900 mm). Badania prowadzone były w dwóch etapach: w pierwszym etapie przeprowadzono badania rozpoznawcze (weryfikacja poprawności doboru podłoża, opony i obciążeń pionowych), natomiast w drugim – badania właściwe.

W trakcie badań I etapu określano właściwości trakcyjne opony 7.5-16 na trzech ścierniskach o odmiennych systemach uprawowych; tradycyjnym, uproszczonym i siewu bezpośredniego. Przeprowadzone badania właściwości tych podłoży wykazały niewielkie różnice pomiędzy wartościami zwięzłości i naprężeń ścinających na poszczególnych podłożach. Najmniejsza średnia wartość zwięzłości wystąpiła w przypadku uprawy tradycyjnej, podobną tendencję zaobserwowano w przypadku naprężeń ścinających.

Wartości oraz charakter zmian siły trakcyjnej w funkcji poślizgu na wszystkich trzech podłożach były zbliżone – przy najniższych wartościach poślizgu obserwowano znaczny wzrost siły, po przekroczeniu poślizgu 5% następowało ustabilizowanie przebiegów. Średnia wartość siły trakcyjnej po ustabilizowaniu wynosiła 3700 N przy niższym poziomie obciążenia pionowego i 3900 N przy wyższym obciążeniu pionowym. Zwiększanie obciążenia pionowego skutkowało wzrostem wartości siły trakcyjnej, przy czym różnice nie przekraczały 18%.

Analiza wartości oporów przetaczania badanej opony pozwoliła stwierdzić, że najwyższe wartości tego parametru wystąpiły na ściernisku po uprawie uproszczonej,

ponadto zaobserwowano, że wartość oporu przetaczania wzrastała wraz ze zwiększeniem obciążenia – największy przyrost (o 9%) zaobserwowano przy uprawie tradycyjnej.

Ocena sprawności trakcyjnej wykazała, że na rozpatrywanych podłożach wartości sprawności były zbliżone. Podobnie jak w przypadku siły trakcyjnej zbliżone były również charaktery zmian sprawności w funkcji poślizgu na poszczególnych podłożach. Maksymalne wartości sprawności trakcyjnej występowały przy poślizgach z zakresu 3 – 7%. Najniższe maksymalne wartości sprawności trakcyjnej wystąpiły na ściernisku w uprawie uproszczonej. Analizując wpływ zwiększenia obciążenia pionowego na zmianę sprawności trakcyjnej stwierdzono, że jedynie na ściernisku w siewie bezpośrednim nastąpił niewielki wzrost sprawności po zastosowaniu wyższego obciążenia.

Na podstawie wyników badań I etapu stwierdzono, że zmienność parametrów podłoży wynikająca jedynie ze zmiany sposobu uprawy gleby skutkuje pewną odmiennością właściwości trakcyjnych koła pojazdu eksploatowanego na tych podłożach. Z tego względu w badaniach drugiego etapu zastosowano jeszcze większą zmienność właściwości podłoży. Zbadane zostały dodatkowe podłoża o właściwościach odmiennych niż to miało miejsce w przypadku ściernisk (droga leśna, darń łąkowa, gleby o różnym stopniu zagęszczenia). Z uwagi na to, że w I etapie nie stwierdzono istotnego wpływu obciążenia pionowego na właściwości trakcyjne, w II etapie badań zastosowano dodatkowy (większy) poziom obciążenia pionowego. Pozwoliło to na określenie przebiegów zmian właściwości trakcyjnych na skutek stosowania różnych obciążeń pionowych. Ponadto do badań II etapu wprowadzono drugą oponę o większych wymiarach zewnętrznych – umożliwiło to porównanie obu opon w aspekcie zmian właściwości trakcyjnych w różnych warunkach eksploatacji. Oprócz analizowanych w pierwszym etapie właściwości trakcyjnych (opór przetaczania, siła trakcyjna, sprawność trakcyjna) dokonano bilansu mocy kół wyposażonych w badane opony. Elementem opracowania wyników badań II etapu była ponadto teoretyczna ocena transmisji momentu obrotowego z silnika hipotetycznego ciągnika rolniczego na jego koła napędowe.

Na podstawie oceny właściwości podłoża w badaniach II etapu wykazano, że najbardziej wytrzymałym podłożem była gruntowa droga leśna, najmniejszą zaś wytrzymałością charakteryzowały się ścierniska oraz gleba luźna. Stwierdzono, że w przypadku wszystkich podłoży wzrost zwięzłości wiązał się ze wzrostem maksymalnych naprężeń ścinających. Ponadto zaobserwowano też pewną zależność pomiędzy parametrami wytrzymałościowymi podłoża a jego wilgotnością.

Analiza siły trakcyjnej wykazała, że opona 7.5-16 największe wartości tego parametru osiągała na glebie luźnej, a najmniejsze na glebie zagęszczonej. W przypadku ściernisk wartości analizowanego parametru były na zbliżonym poziomie, jedynie przy środkowym poziomie obciążenia pionowego stwierdzono, że wyższe wartości siły dotyczyły ścierniska w uprawie uproszczonej. Charakter zmian siły trakcyjnej w funkcji poślizgu na ścierniskach i glebie luźnej był zbliżony, natomiast w przypadku gleby zagęszczonej stwierdzono pewną odmienność polegającą na mniejszych wartościach siły przy poślizgach z zakresu 0 – 15%. Na wszystkich podłożach stwierdzono, że zwiększanie obciążenia pionowego skutkowało przyrostem wartości siły trakcyjnej, jednak analiza statystyczna nie wykazała istotnego wpływu tego czynnika. Pewne różnice w wartościach i przebiegach siły trakcyjnej na ścierniskach w I i II etapie badań mogą być konsekwencją różnych właściwości wytrzymałościowych (potwierdzonych badaniami podłoży). Prawdopodobnie te różnice były wywołane obecnością odmiennej roślinności, co wynikało z zastosowanego płodozmianu. Przypuszcza się, że systemy korzeniowe różnych roślin w odmiennym stopniu wpływają na właściwości podłoża, a w konsekwencji na właściwości trakcyjne.

Druga z badanych opon (8.3-20) najwyższe wartości siły trakcyjnej osiągała na podłożach o mniejszej wytrzymałości (ścierniska i gleba luźna). Przypuszczalnie mogło mieć to związek z większymi wartościami oporu przetaczania, który składał się na wartość siły trakcyjnej. Podobnie jak w przypadku opony 7.5-16 stwierdzono, że wartości oraz charakter zmian siły trakcyjnej na ścierniskach były zbliżone, jedynie przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego zaobserwowano, że wyższe wartości siły trakcyjnej wystąpiły na ściernisku w uprawie uproszczonej. Analiza przebiegów siły trakcyjnej w funkcji poślizgu wykazała, że najwolniejszy przyrost siły występował na glebie zagęszczonej oraz drodze gruntowej, czyli na podłożach o największej wytrzymałości. Ustabilizowanie przebiegu siły następowało przy poślizgach niższych niż miało to miejsce w przypadku opony 7.5-16. Wykazano, że zwiększanie obciążenia pionowego skutkowało wzrostem wartości siły trakcyjnej na większości badanych podłoży.

W wyniku porównania obu opon w aspekcie osiąganych sił trakcyjnych wykazano, że przy obciążeniach pionowych 4620 i 5320 N wartości sił trakcyjnych obu opon były porównywalne za wyjątkiem gleby luźnej, gdzie większą siłą cechowała się opona 7.5-16. Przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego największe różnice w wartościach siły trakcyjnej obu opon wystąpiły na glebie zagęszczonej (siła trakcyjna opony 8.3-20 była

wyższa o 11%). Większymi zmianami siły trakcyjnej przy zmianie rodzaju podłoża charakteryzowała się opona 7.5-16 – różnice dochodziły do 80%.

Ocenę wpływu stosowania łańcucha antypoślizgowego na wartości i charakter zmian siły trakcyjnej przeprowadzono jedynie przy najwyższym poziomie obciążenia pionowego na ściernisku w uprawie tradycyjnej, ściernisku w uprawie uproszczonej i na drodze leśnej. Stwierdzono, że na ścierniskach stosowanie łańcucha antypoślizgowego skutkowało wzrostem wartości siły trakcyjnej, natomiast w przypadku drogi leśnej zaobserwowano spadek wartości siły po zastosowaniu łańcucha. Analizując charakter przebiegów siły trakcyjnej w funkcji poślizgu zaobserwowano, że na ścierniskach większymi przyrostami siły trakcyjnej charakteryzowała się opona wyposażona w łańcuch antypoślizgowy, natomiast na drodze leśnej wystąpiła odwrotna sytuacja.

Analiza oporu przetaczania wykazała, że najmniejsze wartości tego parametru dla opony 7.5-16 stwierdzono na glebie zagęszczonej, największe na glebie luźnej, zwiększanie obciążenia pionowego koła skutkowało wzrostem wartości oporu przetaczania. Przypuszczać należy, że wartości oporów zależne były od właściwości podłoża – w przypadku podłoży o znacznej wytrzymałości (o dużej zwięzłości) opór przetaczania był mniejszy.

W przypadku opony 8.3-20 największe wartości oporu wystąpiły na ściernisku w uprawie tradycyjnej, zaś najmniejsze na drodze leśnej. Wzrost wartości oporu przetaczania na skutek zwiększania obciążenia pionowego wystąpił na czterech podłożach: ściernisku w uprawie uproszczonej, drodze leśnej, darni oraz na glebie luźnej. Podobnie jak w przypadku opony 7.5-16 wyższe wartości oporów dotyczyły podłoży o mniejszej wytrzymałości, stąd też przypuszczenie, że opór przetaczania był w większym stopniu efektem odkształcenia podłoża niż deformacji opony.

Porównanie obu opon w aspekcie oporu przetaczania wykazało, że największe różnice w wartościach tego parametru dla obu opon wystąpiły na glebie luźnej – na tym podłożu przy wszystkich trzech poziomach obciążenia pionowego wyższe wartości oporu charakteryzowały oponę 7.5-16.

Analiza wartości oraz charakteru zmian sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 wykazała, że przy wszystkich trzech poziomach obciążenia pionowego największe wartości tego parametru występowały na glebie zagęszczonej, zaś najniższe na ścierniskach (nie stwierdzono różnic pomiędzy poszczególnymi systemami uprawowymi). Na podstawie analizy przebiegów sprawności w funkcji poślizgu wykazano, że maksymalne wartości sprawności trakcyjnej występowały przy poślizgach

z zakresu 2 – 7%, przy czym wyższe wartości poślizgu dotyczyły mniejszych obciążeń pionowych. Zastosowanie najwyższego poziomu obciążenia wpłynęło ponadto na wzrost różnicy sprawności między glebą zagęszczoną a pozostałymi podłożami. Różnice w przebiegach sprawności trakcyjnej na ścierniskach występowały jedynie przy najniższych wartościach poślizgów (0 – 5%). Nie stwierdzono jednolitej tendencji zmian wartości sprawności na skutek zmiany poziomu obciążenia pionowego koła.

Ocena zmian sprawności opony 8.3-20 wykazała, że najwyższe wartości tego parametru wystąpiły na podłożach o największej wytrzymałości (droga leśna, darń i gleba zagęszczona). Na ścierniskach, podobnie jak to miało miejsce dla opony 7.5-16, maksymalne wartości sprawności przy poszczególnych systemach uprawy były na zbliżonym poziomie, w przypadku przebiegów różnice stwierdzono jedynie przy najniższych wartościach poślizgu. Ocena przebiegów sprawności na pozostałych podłożach wykazała, że przy najniższym poziomie obciążenia maksymalne wartości sprawności występowały przy wyższych poślizgach niż w przypadku dwóch pozostałych obciążeń pionowych. Analiza wartości sprawności przy różnych obciążeniach pionowych i poślizgach wykazała, że na podłożach o większej wytrzymałości różnice w wartościach sprawności przy poszczególnych poślizgach były wyższe. Jedynie na glebie zagęszczonej wykazano wzrost wartości sprawności na skutek zwieszania obciążenia pionowego.

Porównanie wartości sprawności obu badanych opon wykazało, że przy najniższym poziomie obciążenia pionowego wartości sprawności były zbliżone, z wyjątkiem ścierniska w uprawie uproszczonej, gdzie wyższą sprawnością wykazała się opona 7.5-16. Przy dwóch wyższych poziomach obciążenia opona 8.3-20 osiągała wyższe wartości sprawności na glebie zagęszczonej i glebie luźnej natomiast w przypadku ściernisk wartości sprawności były porównywalne. Zmiana rodzaju podłoża skutkowała większymi różnicami sprawności w przypadku opony 8.3-20 – taką sytuację stwierdzono przy wszystkich trzech poziomach obciążenia pionowego.

Podobnie jak w przypadku siły trakcyjnej, dokonano oceny zmian sprawności trakcyjnej na skutek stosowania łańcucha antypoślizgowego; ocenę taką przeprowadzono przy najwyższym poziomie obciążenia na ściernisku w uprawie tradycyjnej, ściernisku w uprawie uproszczonej i na drodze leśnej. Wykazano, że na ścierniskach przy obu systemach uprawowych różnice w sprawnościach trakcyjnych opony z łańcuchem i bez łańcucha wystąpiły jedynie przy niskich wartościach poślizgów (wyższe wartości sprawności stwierdzono dla opony wyposażonej w łańcuch). Na drodze leśnej przy

poślizgach z zakresu 0 – 15% wyższe wartości sprawności osiągnęła opona bez łańcucha antypoślizgowego.

Przeprowadzony bilans mocy koła wyposażonego w oponę 7.5-16 wykazał, że na odmiennych podłożach wystąpiły różnice w wartościach poszczególnych mocy oraz charakterach ich zmian. Przebiegi mocy uciągu, mocy traconej na opór przetaczania oraz mocy całkowitej w funkcji poślizgu charakteryzowały się dużym przyrostem, a następnie ustabilizowaniem. Przebiegi mocy traconej na poślizg cechowały się przyrostem proporcjonalnym do poślizgu. W przypadku ściernisk największe wartości wszystkich mocy stwierdzono przy uprawie uproszczonej, zaś najmniejsze przy uprawie tradycyjnej. Wartości mocy na glebie luźnej były nieco wyższe niż na ścierniskach. Najmniejsze wartości mocy (i najmniejsze zapotrzebowanie na moc) koła wyposażonego w oponę 7.5-16 stwierdzono na glebie zagęszczonej; na tym też podłożu wystąpiła najmniejsza różnica między wartościami mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania (na wszystkich pozostałych podłożach wartości mocy traconej na opór przetaczania były znacznie wyższe niż wartości mocy uciągu). Analiza udziałów poszczególnych mocy w mocy całkowitej wykazała, że na glebie zagęszczonej występował największy udział mocy uciągu (równy 41%) i najmniejszy udział mocy traconej na poślizg. Na większości podłoży stwierdzono wzrost wartości mocy całkowitej na skutek zwiększania obciążenia pionowego koła.

W przypadku koła wyposażonego w drugą oponę (8.3-20) również wykazano zróżnicowanie w wartościach oraz charakterach zmian mocy na poszczególnych podłożach. Podobnie jak dla koła z oponą 7.5-16, przebiegi mocy uciągu, mocy traconej na opór przetaczania oraz mocy całkowitej w funkcji poślizgu charakteryzowały się dużym przyrostem, po którym następowało ustabilizowanie. Zaobserwowano zależność pomiędzy zwiężłością podłoża a wartościami mocy dostarczanej do koła – najwyższe zapotrzebowanie na moc wystąpiło bowiem na glebie luźnej (podłoże o najmniejszej zwiężłości), zaś najniższe na drodze leśnej i glebie zagęszczonej - czyli na podłożach o najmniejszych wartościach zwiężłości. Ponadto, na podłożach o większej zwiężłości wystąpiły największe udziały mocy uciągu w mocy całkowitej (dochodzące do 49%), co miało związek z mniejszymi udziałami mocy traconej na opór przetaczania. Analizując wpływ zmiany obciążenia pionowego na wartości mocy stwierdzono, że jedynie na glebie luźnej oraz darni łąkowej wystąpił wzrost mocy całkowitej na skutek zwiększenia obciążenia pionowego. Nie zaobserwowano jednak przy tym zmian udziałów poszczególnych mocy w mocy całkowitej.

Porównanie kół wyposażonych w obie badane opony w aspekcie wartości mocy wykazało, że największa różnica wartości mocy obu opon wystąpiła na glebie luźnej – przy wszystkich trzech poziomach obciążenia wyższe wartości mocy całkowitej zaobserwowano dla opony 8.3-20, przy czym różnice w udziałach poszczególnych mocy były niewielkie. W przypadku ściernisk wartości oraz udziały mocy dla obu opon były na zbliżonym poziomie. Ponadto zwiększanie obciążenia pionowego koła powodowało większe przyrosty mocy całkowitej w przypadku opony 8.3-20. Zmiana rodzaju podłoża skutkowała większymi zmianami mocy w przypadku opony 7.5-16.

Bilans mocy przeprowadzono również dla opony 8.3-20 wyposażonej w łańcuch antypoślizgowy, oceny zmian mocy dokonano na ścierniskach w uprawie tradycyjnej i uproszczonej oraz na drodze leśnej. Analizując przebiegi poszczególnych mocy w funkcji poślizgu wykazano, że na ścierniskach stosowanie łańcucha antypoślizgowego skutkuje wcześniejszą stabilizacją przebiegów mocy uciągu, mocy traconej na opór przetaczania oraz mocy całkowitej. Zaobserwowano, że na ściernisku w uprawie tradycyjnej moc całkowita opony wyposażonej w łańcuch antypoślizgowy była wyższa. W przypadku drogi leśnej zaobserwowano, że opona wyposażona w łańcuch charakteryzowała się wyższymi wartościami mocy traconej na opór przetaczania, wartości mocy uciągu i mocy traconej na poślizg obu wariantów opon były natomiast porównywalne. Na ścierniskach nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy udziałami mocy opony z łańcuchem i bez łańcucha, na drodze leśnej zastosowanie łańcucha skutkowało spadkiem udziału mocy uciągu na rzecz mocy traconej na opór przetaczania.

Teoretyczna ocena transmisji mocy z silnika na koła hipotetycznego ciągnika rolniczego klas 4.0, 6.0 kN miała za zadanie wykazać jakie powinny być parametry silnika aby siła trakcyjna rozwijana była przy maksymalnych sprawnościach trakcyjnych w pełnym zakresie eksploatacji. Przyjęto dwie prędkości jazdy (8 i $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) oraz dwa skrajne poziomy obciążenia pionowego osi napędowej (9240 i 12220N). Przeprowadzona analiza wykazała, że osiągnięcie wymaganej siły trakcyjnej przy założonych prędkościach uwarunkowane jest doбором przełożenia w układzie napędowym. Występowały przypadki, kiedy ciągnik nie mógł osiągnąć wymaganej siły trakcyjnej przy założonej prędkości jazdy, ponieważ zapotrzebowanie na moc i moment obrotowy silnika było wyższe niż maksymalne wartości tych parametrów przy danej prędkości obrotowej silnika.

Przeprowadzona dla wyników badań I etapu analiza statystyczna wykazała, że rodzaj podłoża (w tym przypadku definiowany technologią uprawy), miał istotny wpływ na wartości siły trakcyjnej, oporu przetaczania oraz sprawności trakcyjnej opony 7.5-16.

Ponadto stwierdzono statystycznie istotną zależność analizowanych parametrów od wielkości poślizgu koła. Nie stwierdzono istotnego wpływu obciążenia pionowego koła na wartości wszystkich analizowanych parametrów.

Analiza statystyczna wyników badań II etapu wykazała, że w przypadku opony 7.5-16 wystąpił istotny wpływ rodzaju podłoża na wszystkie analizowane parametry (siłę trakcyjną, sprawność trakcyjną, opór przetaczania i wartości wszystkich mocy), wykazano również zależność pomiędzy wartościami poślizgu a wszystkimi analizowanymi parametrami. Nie stwierdzono natomiast istotnego wpływu obciążenia pionowego koła na analizowane parametry. Analiza przeprowadzona dla drugiej z badanych opon (8.3-20) wykazała istotny wpływ rodzaju podłoża na wszystkie analizowane parametry oraz istotny wpływ obciążenia pionowego na wartości siły trakcyjnej, mocy całkowitej, mocy uciągu i mocy traconej na opór przetaczania. Ponadto stwierdzono, że jedynie w przypadku mocy traconej na opór przetaczania nie wystąpiła istotna zależność od wielkości poślizgu. Analiza statystyczna przeprowadzona dla obu opon wykazała, że rozmiar opony miał istotny wpływ na wartości siły trakcyjnej, sprawności trakcyjnej, oporu przetaczania i mocy uciągu. Przeprowadzono również analizę statystyczną mającą na celu wykazane czy stosowanie łańcucha antypoślizgowego przyczynia się do zmian analizowanych parametrów; na tej podstawie wykazano istotny wpływ stosowania łańcucha na wartości siły trakcyjnej, oporu przetaczania oraz mocy uciągu.

7.2. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Wartości siły trakcyjnej, oporu przetaczania oraz sprawności trakcyjnej obu opon były zależne od rodzaju podłoża, na którym opony te były eksploatowane. Obie opony wyższe wartości siły trakcyjnej osiągały na podłożach o mniejszych wartościach zwięzłości i naprężeń ścinających. Analogiczna sytuacja wystąpiła w przypadku oporu przetaczania. Wyższe wartości sprawności trakcyjnej obie opony osiągały natomiast na podłożach bardziej wytrzymałych.
2. Na podłożach o większej wytrzymałości wystąpiły największe udziały mocy uciągu kół wyposażonych w obie badane opony. Najwyższe udziały mocy traconej na opór przetaczania występowały na podłożach o niskiej wytrzymałości. Niższe udziały mocy traconej na poślizg dotyczyły podłoży o wyższej wytrzymałości. Wykazano

ponadto, że najwyższe wartości mocy całkowitej występowały na podłożach o niskiej wytrzymałości.

3. Zwiększanie obciążenia pionowego kół powodowało wzrosty wartości siły trakcyjnej oporu przetaczania oraz mocy całkowitej obu badanych kół, przy czym dla koła z oponą 7.5-16 różnice okazały się statystycznie nieistotne. Opona 8.3-20 największymi zmianami właściwości trakcyjnych na skutek zmiany obciążenia pionowego odznaczała się na podłożach o wysokiej wytrzymałości. Dla obu opon nie stwierdzono wpływu obciążenia pionowego na wartości sprawności trakcyjnej.
4. Obie opony w odmiennym stopniu reagowały one na zmianę rodzaju podłoża. Większymi różnicami w wartościach siły trakcyjnej i oporu przetaczania na odmiennych podłożach cechowała się opona 7.5-16. W przypadku sprawności trakcyjnej większymi zmianami charakteryzowała się opona 8.3-20. Na podłożach o dużej wytrzymałości koło wyposażone w oponę 7.5-16 wymagało dostarczenia większej mocy. Różnice we właściwościach trakcyjnych obu opon na różnych podłożach sprawiają, że dyskusyjne jest stosowanie ich w ciągnikach określanych mianem uniwersalnych.
5. Właściwości trakcyjne obu opon były zależne od wartości poślizgu. Wszystkie analizowane parametry poza mocą traconą na poślizg cechowały się dużymi przyrostami wartości przy poślizgach nieprzekraczających 10%, a następnie stabilizacją bądź spadkiem. Moc tracona na poślizg we wszystkich przypadkach odznaczała się przyrostem proporcjonalnym do poślizgu.
6. Zastosowanie łańcucha antypoślizgowego skutkowało wyższymi wartościami siły trakcyjnej na podłożach o mniejszej wytrzymałości. Na podłożu o dużej wytrzymałości wzrost siły trakcyjnej na skutek stosowania łańcucha wystąpił dopiero przy poślizgu powyżej 15%. Na wszystkich podłożach stwierdzono wyższe wartości mocy uciągu dla opony z łańcuchem antypoślizgowym. Nie stwierdzono istotnego wpływu stosowania łańcucha na wartości sprawności trakcyjnej, mocy całkowitej i mocy traconych.
7. Na podstawie teoretycznej oceny transmisji mocy z silnika pojazdu na koła stwierdzono, że przy szerokiej zmienności warunków eksploatacji niebagatelne znaczenie ma dobór przełożenia w układzie napędowym pojazdu. Zasadne wydaje się stwierdzenie, że uniwersalność ciągnika rolniczego w dużej mierze zależy od parametrów układu napędowego.

Spis literatury

1. Abd El-Gawwad K. A., Crolla D. A., Soliman A. M. A., El-Sayed F. M. 1999. Off-road tire modeling III: effect of angled lugs on tire performance. *Journal of Terramechanics* 36. 63-75.
2. Abu-Hamdeh N. H. 2003. Soil compaction and rut distribution for okra as affected by tillage and vehicle parameters. *Soil and Tillage Research* 74. 25-35.
3. Alakuku L. P., Weisskopf W., Chamen F. G., Tijink J. P., Van Den Linden S., Pires C., Sommer R., Spoor G. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil and Tillage Research* 73. 145-160.
4. Al-Hamed S.A., Al-Janobi A.A. 2001. A program for predicting tractor performance in visual C++. *Computers and Electronics in Agriculture* Vol. 31 Issue 2. 137-149.
5. Al-Janobi A. 1997. Field comparison of tractive performance of an FWA tractor on sandy loam soil. *Misr Journal of Agricultural Engineering* 14(1). 26-32.
6. Ansorge D., Godwin R. J. 2007. The effect of tires and a rubber track at high axle loads on soil compaction, Part 1: single axle studies.
7. Antille D. L., Ansorge D., Dresser M. L., Godwin R. J. 2008. The effect of tyre size on soil deformation and soil bulk density changes. *An ASABE Meeting Presentation Paper Number 083879*. 1-11.
8. Arvidsson J. Ristic S. 1996. Soil stress and compaction effects for four tractor tires. *Journal of Terramechanics* 33(5). 223-232.
9. Arvidsson J., Keller T. 2007a. Soil stress as affected by wheel load and tire inflation pressure. *Soil and Tillage Research* 96. 284-291.
10. Arvidsson J., Keller T. 2007b. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research* 79, 191-205.
11. Bailey A. C., Raper R. L., Way T. R., Burt E. C., Johnson C. E. 1996. Soil stresses under tractor tire at various loads and inflation pressures. *Journal of Terramechanics* 33(1). 1 – 11.
12. Bashford L. L., Al-Hamed S., Jenane C. 1993. Effects of tire size and inflation pressure on tractive performance. *ASAE Paper no 92-1011*. 343-348.
13. Bashford L. L., Kocher M. F., Tibbetts T. S. 1999. Wide tires, narrow tires. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications; Paper 174*. 1-7.
14. Bashford L. L., Von Bargen K., Way T. R., Xiaoxian L. 1987. Performance comparisons between duals and singles on the rear axle of a front wheel assist tractor. *ASAE Paper no86-1056*. 641-645.
15. Bekker M. G. 1960. *Off the road locomotion*. University of Michigan Press.
16. Bekker M.G. 1956. *Theory of land locomotion*. The university of Michigan Press, Ann Arbor.

17. Bernstein R. 1913. Probleme zur experimentellen Motorpflugmechanik. Motorwagen, 1913, No 16.
18. Białczyk W. 1978. Wpływ parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych ciągnika klasy 9,0 kN na pracę w warunkach górskich. Rozprawa doktorska Instytut Mechanizacji Rolnictwa AR Wrocław.
19. Białczyk W. 1988. Badania przyczepności ciągnika kołowego na zadarnionym podłożu gleby łąkowej górskich użytków zielonych. Zeszyty Naukowe AR Wrocław. Mechanizacja Rolnictwa 67.
20. Białczyk W. 2005. Historia rozwoju konstrukcji ciągników rolniczych. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu. ISBN 83-89189-74-7.
21. Białczyk W., Bernat J., Materek D. 1987. Analiza pracy rolniczych opon napędowych na podłożu zadarnionym. Zszyty Naukowe AR Wrocław, 164. 178-181.
22. Białczyk W., Bogdanowicz J. 1983. Poślizg kół ciągnika jako kryterium doboru głównych parametrów eksploatacyjnych ciągników pracujących na skłonach. Roczn. Nauk Roln. Seria C 75(4). 165-184.
23. Białczyk W., Cudzik A., Czarnecki J. 2009. Intensywność użytkowania darni a jej właściwości trakcyjne. Inżynieria Rolnicza nr 1 (110). 13-19.
24. Białczyk W., Cudzik A., Czarnecki J., Moś D. 2010a. Ocena energetycznych parametrów współpracy układu koło napędowe – droga leśna. Inżynieria Rolnicza nr 1(119). 15 – 21.
25. Białczyk W., Cudzik A., Czarnecki J., Pieczarka K. 2006. Ocena właściwości trakcyjnych opon na drogach leśnych o zróżnicowanych nawierzchniach. Inżynieria Rolnicza nr 2 (77), 87-95.
26. Białczyk W., Cudzik A., Czarnecki J., Pieczarka K., Brennensthul M. 2010b. Ocena zużycia występów bieżnika opon w aspekcie zdolności trakcyjnych ciągników rolniczych. Inżynieria Rolnicza. Nr 1 (119). 23-29.
27. Białczyk W., Czarnecki J., Cudzik A., Brennensthul M. 2010c. Ocena właściwości trakcyjnych wybranych opon na podłożach zadarnionych. Inżynieria Rolnicza nr 7(125). 15-22.
28. Białczyk W., Czarnecki J., Cudzik A., Jamroży K. 2010d. Ocena zmian parametrów wytrzymałościowych darni użytkowanej z różną intensywnością. Inżynieria Rolnicza nr 4 (122). 15-22.
29. Białczyk W., Czarnecki J., Jamroży K., Pieczarka K. 2008a. Ocena zmian maksymalnych sił trakcyjnych opon typu grass na podłożu zadarnionym. Inżynieria Rolnicza nr 4(102). 81-87.
30. Białczyk W., Czarnecki J., Pieczarka K. 2008b. Analiza sił trakcyjnych opony napędowej w zmodyfikowanych technologiach uprawy. Inżynieria Rolnicza nr 4 (102). 97-104.
31. Białczyk W., Materek D. 2001. Konstrukcja opony napędowej a właściwości uciągowe ciągnika. Inżynieria Rolnicza. Nr 13 (33). 71-77.

32. Białczyk W., Pieczarka K., Materek D. 2001. Badanie przyczepności koła mikrociagnika w zmiennych warunkach glebowych. *Inżynieria Rolnicza* nr 13 (33), 79-84
33. Błaszkiwicz Z. 2010. Badania wpływu wybranych parametrów ciągnikowych opon napędowych na strukturę gleby lekkiej w koleinach. *Inżynieria Rolnicza* nr 1 (119). 73-78.
34. Błaszkiwicz Z., Szafarz A. 2006. Model do wyznaczania oporu toczenia wynikającego z ugięcia opon na glebie. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 2 (77). 145-152.
35. Błaszkiwicz Z., Szafarz A. 2009. Prognozowanie oporu toczenia kół ciągników rolniczych na glebie. *Inżynieria Rolnicza* nr 9/118. 15-21.
36. Botta G. F., Jorajuria D., Draghi L. M. 2002. Influence of the axle load, tire size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soils. *Journal of Terramechanics* 39. 47-54.
37. Botta G. F., Rivero D. Tourn M., Melcon F. B., Pozzolo O., Nardon G., Balbuena R. 2008. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tires in two tillage regimes. *Soil and Tillage Research* 101. 44-51.
38. Botta G. F., Tollon-Becerra A., Tourne M., Lastra-Bravo X., Rivero D. 2012. Agricultural traffic: Motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions. *Soil and Tillage Research* 120. 92-98.
39. Botta G.F., Jorajuria D., Draghi L. 2002. Influence of the axle load, tire size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soils. *Journal of Terramechanics* vol. 39, 47-54.
40. Brixius . W. 1987. Traction prediction equations for bias ply tires. *ASAE Paper* No 87-1622.
41. Brodbeck K. N. 2004. Choosing the right tire. *ASAE Distinguished Lecture* 28. 1-13.
42. Buliński J., Sergiel L. 2011. Wpływ wilgotności gleby na jej zagęszczenie kołem ciągnika. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 8 (133). 45-51.
43. Burt E. C., Lyne P. W. L., Meiring P., Kenn J. F. 1983. Ballast and inflation effects on tire efficiency. *ASAE Paper* no 82-1567. 1352-1354.
44. Burt E. C., Schaffer R. L., Taylor J. H. 1974. Similitude of a model traction device: part II – Prediction of wheel sinkage. *ASAE Paper* No 73-138. 662-665.
45. Burt E.C., Bailey A.C. 1981. Load and inflation pressure effect on tires. *Transactions of the ASAE* 25(4), 881-884.
46. Canillas E. C., Salokhe V. M. 2002. Modeling compaction in agricultural soils. *Journal of Terramechanics* 39(2). 71-84.
47. Carman K, Tuner K. 2012. Prediction of tire tractive performance by using artificial neural networks. *Mathematical and Computational Applications* 17(3). 182-192.

48. Carman K. 2002. Compaction characteristics of towed wheels on clay loam in a soil bin. *Soil and Tillage Research* 65. 37-43.
49. Carman K., Dunyamahoglu F. 2003. Modelling tractive performance for drive wheel. *Mathematical and Computational Applications* 8(1). 49-54.
50. Catalan H., Linares P., Mendez V. 2008. Tractor PT: A traction prediction software for agricultural tractors. *Computers and Electronics in Agriculture* Vol. 60. 289-295.
51. Chan K. Y., Oates A., Swan A. D., Hayes R. C., Dear B. S., Peoples M. B. 2006. Agronomic consequences of a tractor wheel soil compaction on a clay soil. *Soil and Tillage Research* 89. 13-21.
52. Chancellor W.C. 1976. Compaction of soil by agricultural equipment. Division of agricultural sciences, Bulletin 1881, Univ. of California, Davis.
53. Chigarev Y., Śnieg M., Kulasza M. 2009. Wpływ rodzaju bieżnika i jego zużycia na zagęszczenie gleby piaszczystej. *Inżynieria Rolnicza* nr 1 (110). 61-67.
54. Coates W. 1984. Comparisons of bias and radial tractor tires on a soft soil. *Transactions of the ASAE* 28(4). 1090-1093.
55. Copeck K., Filipovic D. 2007. Comparison of tractor drawbar pull characteristics with new and semi-worn tires in loamy soil tillage. *Agronomski Glasnik* 4/2007. 297-308.
56. Cudzik A. 2006. Analiza właściwości trakcyjnych opon na wybranych drogach leśnych. Rozprawa doktorska Instytut Inżynierii Rolniczej AR we Wrocławiu.
57. Cudzik A., Białczyk W., Czarnecki J., Brennenstul M., Kaus A. 2011. Analiza wybranych właściwości gleby w różnych technologiach uprawy. *Inżynieria Rolnicza* nr 4 (129). 33-40.
58. Czarnecki J. 2000. Analiza właściwości trakcyjnych układu koło mikrociągnika – podłoże odkształcalne. Rozprawa doktorska Instytut Inżynierii Rolniczej AR we Wrocławiu.
59. Czarnecki J., Cudzik A., Pieczarka K., Białczyk W. 2005. Właściwości trakcyjne opon na drogach leśnych. *Inżynieria Rolnicza* nr 3 (63). 55-62.
60. Diserens E., Battiato A. 2012. Traction force in arable farming: Agronomic and environmental aspects after field-data acquisition and modeling. *International Conference of Agricultural Engineering. CIGR AgEng* 8 – 12 July 2012.
61. Domier K. W., Willans A. E. 1978. Traction efficiency – maximum or optimum? *ASAE Paper* no 77-1053. 650-653.
62. Duarte V., Somoudip S. 2009. A Cinderella story: The early evolution of the american tractor industry. *CEFAGE-UE Working Paper* 2009/16.
63. Dwyer M. J. 1984. Tractive performance of wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics* 21(1). 19-34.
64. Dwyer M. J., Heigho D. P. 1984. The tractive performance of some large tractor drive wheel tyres compared with dual wheels. *Journal of Agricultural Engineering Research* 29, 43-50.

65. Elwaleed A. K., Yahya A., Zohadie M., Ahmad D., Kheiralla A. F. 2006a. Net traction ratio prediction for high-lug agricultural tire. *Journal of Terramechanics* 43. 119 – 139.
66. Elwaleed A.K., Yahya A., Zohadie M., Ahmad D., Kheiralla A. F. 2006b. Effect of inflation pressure on motion resistance ratio of a high-lug agricultural tire. *Journal of Terramechanics* 43. 69-84.
67. Forrest P.J., Reed I.F., Constantakis G.V. 1962. Tractive characteristics of radial ply tires. *Transactions of the ASAE* 5(2). 108-115.
68. Foxwell W. J. 2008. A customized tractor for controlled traffic farming on small farms. *Landwards* Vol. 62 No 3. 1-7.
69. Gee-Clough, Mac Allister D. M., Everndnen D. W. 1977. Tractive performance of tractor drive tyres: a comparison of radial and cross-ply carcass construction. *Journal of Agricultural Engineering Research* 22, S. 385-395.
70. Gholkar M. D., Salokhe V. M., Keen A. 2009. The Effect of axle load and tyre inflation pressure on the tractive performance of a two wheel drive tractor on soft clay paddy field. *An ASABE Meeting Presentation Paper Number 096606*. 1-12.
71. Głęb T. 2009. Analiza przyczyn zmian plonowania wybranych gatunków traw pod wpływem wielokrotnych przejazdów kół ciągnika. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 3 (112).
72. Głęb T., Żabiński A. 2010. Wpływ wielokrotnych przejazdów ciągnika na dynamikę wzrostu i plonowanie tymotki łąkowej. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 1 (119). 183-190.
73. Godbole R., Alcock R., Hetiaratchi D. 1993. The Prediction of Tractive Performance on Soil Surfaces. *Journal of Terramechanics* 30(6). 443-459.
74. Goering C. E., Hansen A. C. 2004. *Engine and Tractor Power*. ASAE Publication, ISBN 1892769425.
75. Goriaczkin W. P. 1937: *Tieoria kolesa. Sobranie soczinieni*. Sielchozgisz 1937.
76. Grecenko A. 1969. Slip and drift of the wheel with tyre on soft ground. *Proc. 3rd ISTVS Conf. Essen*, vol. II. 76-95.
77. Grecenko A. 1995. Tyre footprint area on hard ground computed from catalogue value. *Journal of Terramechanics* 32(6). 325-333.
78. Grecenko A. 2003. Tire load rating to reduce soil compaction. *Journal of Terramechanics* 40. 97-115.
79. Grisso R. D., Taylor R. K., Way T. R., Bashford L. L. 1992. Tractive performance of 18.4R46 and 18.4R42 radial tractor tires. *ASAE Paper no 91-1589*. 739-745.
80. Grisso R., Perumpral J., Zoz F. 2003. Modified traction equation to predict the performance of belt tracks. *International Soil Tillage Organisation*. Iowa State University.

81. Grisso R., Perumpral J., Zoz F. 2006. An empirical model for tractive performance of rubber-tracks in agricultural soils. *Journal of Terramechanics* 43. 225-236.
82. Grisso R., Pitman R., Perumpral J., Vaughan D., Robertson G., Hoy R. 2011. "Gear up and throttle down" to save fuel. Virginia Cooperative Extension Publication 442. 1-7.
83. GUS 2010 – Środki produkcji w Rolnictwie w roku gospodarczym 2008/2009.
84. Habich E. 1948. Postęp w rozwoju konstrukcji ciągników. *Przegląd Mechaniczny Rok VII, zeszyt 7-8*. 291-296.
85. Hakansson I., Voorhees W. B., Riley H. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil and Tillage Research* 11(3-4). 239-282.
86. Hallonborg U. 1996. Super-ellipse as tyre – ground contact area. *Journal of Terramechanics* 33 (3). 125-132.
87. Hofman V., Giles J. 1988. Reducing soil compaction. NSDU Extension Service AE-955. 13-17.
88. Horn R., Way T. R., Rostek J. 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil and Tillage Research* 73. 101-106.
89. Janosi Z., Hanamoto B. 1962. The analytical determination of drawbar pull as function of slip for tracked vehicles in deformable soil. In *Proceedings of the 1st International Conference on Terrain-Vehicle Systems*, Turin, Italy. 707-736.
90. Jenane C., Bashford L. L., Monroe G. 1996. Reduction of fuel consumption through improved tractive performance. *Journal of Agricultural Engineering Research* 64. 131-138.
91. Jenane C., Bashford L. L. 1995. Field tractive performance comparisons between a tractor operated in the 2WD and 4WD mode. *Actes. Inst. Agron. Vet.* 15(1). 47-54.
92. Jenane C., Bashford L. L. 2000. Tractive performance of a mechanical front-wheel assist tractor as related to forward speeds. *Journal of Agricultural Engineering Research* 77(2). 221-226.
93. Jun H., Way T. R., Löfgren B., Landström M., Bailey A. C., Burt E. C., McDonald T. P. 2004. Dynamic load and inflation pressure effects of contact pressures of a forestry forwarder tire. *Journal of Terramechanics* 41. 209-222.
94. Kacigin V. V., Guskov. W. 1968. The basis of tractor performance theory. *Journal of Terramechanics* 3(5). 43-66.
95. Kanafojski Cz. 1934. Przyczynek do laboratoryjnych badań odkształceń i oporów gleby wywoływanych działaniem ostróg ciągowki. *Czasopismo Techniczne* nr 3-7.
96. Keller T., Arvidsson J. 2004. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels, and tire inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil and Tillage Research* 79. 191-205.

97. Kichler C. M., Fulton J. P., Raper R. L., McDonald T. P., Zech W. C. 2011. effects of transmission gear selection on tractor performance and fuel cost during deep tillage operations. *Soil and Tillage Research* 113. 105-111.
98. Knezevic D. Sumanovac L., Juric T., Lukac P., Atanasov A. 2007. The effects of wheels or tracks on soil. *Research People and Actual Tasks on Multidisciplinary Sciences*.
99. Kolator B. 2006. Wybrane zagadnienia odkształceń napędowego koła pneumatycznego ciągnika rolniczego. *MOTROL* 8/2006. 118-124.
100. Komandi G. 1990. Establishment of soil – mechanical parameters which determine traction on deforming soil. *Journal of Terramechanics* 27 (2). 115-124.
101. Komandi G. 1999. An evaluation of the concept of rolling resistance. *Journal of Terramechanics* 36. 159-166.
102. Komandi G. 2005. Soil vehicle relationship: The peripheral force. *Journal of Terramechanics* 43. 213-223.
103. Kopeć S., Głąb T. 2004. Wpływ ugniatania kołami ciągnika dwóch gleb – piaszczystej i pyłowej na ich właściwości retencyjne. *Woda – Środowisko - Obszary Wiejskie* t.4 z. 2a (11). 87-93.
104. Krauze J. 1916. Badania pługów motorowych. *Czasopismo Techniczne rocznik XXXIV* nr 9/1916.
105. Krick G. 1969. Radial and shear stress distribution under rigid wheels and pneumatic tyres operating on yielding soils with consideration of tyre deformation. *Journal of Terramechanics* 6(3). 73-98.
106. Lancas K. P. Upadhyaya S. K., Sime M., Shafii S. 1996. Overinflated tractor tires waste fuel, reduce productivity. *California Agriculture* 50(2). 28-31.
107. Lee D. R., Kim K. U. 1997. Effect of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tires. *Journal of Terramechanics* 34(3). 187-208.
108. Leffingwell R. 2002. *American farm tractors*. Voyageur Press. ISBN 0760313709.
109. Lipiec J., Hatano R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116. 107-136.
110. Lyasko M. I. 1994. The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tyre on a rigid surface. *Journal of Terramechanics* 31(4). 239-242.
111. Lyasko M. I. 2010a. How to calculate the effect of soil conditions on tractive performance. 47(10). *Journal of Terramechanics*. 423-445.
112. Lyasko M. I. 2010b. Multi-pass effect on off-road vehicle tractive performance. *Journal of Terramechanics* 47. 275-294.
113. Lyne P. W. L., Burt E. C. 1988. Real time optimization of tractive efficiency. *ASAE Paper no 87-1624*. 431-435.
114. Lyne P. W. L., Burt E. C., Meiring P. 1983. Effect of tire and engine parameters on efficiency. *ASAE Paper no 82-1568*. 5-11.

115. Materek D. 1990. Wpływ konstrukcji układu jezdnego na właściwości trakcyjne pojazdu rolniczego poruszającego się po zadarnionym podłożu. Zeszyty Naukowe AR Wrocław Mechanizacja Rolnictwa I, nr 183. 89-102.
116. Materek D. 2004. Analiza właściwości trakcyjnych kołowego ciągnika rolniczego w wybranych technologiach uprawy roślin. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu. Rozprawy CCXIX nr 493.
117. Materek D. 2008. Analiza wybranych właściwości trakcyjnych ciągnika John Deere 7720. Inżynieria Rolnicza nr 5(103). 127-130.
118. McAllister M., Gee-Clough D., Evernden D.W., 1976. The effect of aspect ratio on the tractive performance of tractor driving wheel tyres. NIAE Dept. Note, DN/T/708/1415. Silsoe, Bedford, UK, Nationalinstitut of Agricultural Engineering.
119. McAllister M. 1983. Reduction in the rolling resistance of tyres for trailed agricultural machinery. Journal of Agricultural Engineering Research 28(2), 127-137.
120. McKibben E. G., Hall D. O. 1940. Soil penetration tests as a means of predicting rolling resistance. Agricultural Engineering 6/1940.
121. McMillan D., Broehl W. G. 2007. The John Deere two-cylinder tractor encyclopedia: the complete model-by-model history. Voyageur Press. ISBN 0760329634.
122. Monroe G. E., Burt E. C., Bailey A. C. 1989. Tire performance using different treads on traffic lanes. ASAE Paper no 89-1057. 51-55.
123. Musonda N. G., Kushwaha R. L., Ford R. J. 1989. Effect of tire combinations and ballasting on 4WD and 2WD tractive efficiency. ASAE Paper no 86-1541. 517-521.
124. Muzikravic V., Pozanowic M., Casnji F., Stojic B., Ruzic D. 2003. Tire selection for tractors 60 – 120 kW. Tractors and Power Machines 8 (4). 79-84.
125. Nam J. S., Park Y. J., Kim K. U. 2010. Determination of rating cone index using wheel sinkage and slip. Journal of Terramechanics 47(4). 243-248.
126. Narang S., Varshney A. C. 2006. Draftability of 8.95 kW walking tractor on tilled land. Journal of Terramechanics 43. 395-409.
127. Nevens F., Reheul D. 2003. The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. Soil and Tillage Research 70. 175-184.
128. O’Sullivan M. F., Henshall J. K., Dickson J. W. 1999. A simplified method for estimating soil compaction. Soil and Tillage Research 49. 325-335.
129. Ogunjirin O. A., David J., Kasali M. Y. 2011. Effect of tyre inflation pressure and tractor passes on sandy loam soil. Conference “Tillage for agricultural productivity and environmental sustainability” Nigeria 21-23 2011. 164-170.
130. Okello J. A. 1992. Prediction of the distribution between the soil and a pneumatic wheel. Journal of Agricultural Engineering Research 51. 249-262.

131. Ortiz-Canavate J., Gil-Sierra J., Gil-Quiros V., Casanova J. 2008. Energy efficiency in agricultural tractors considering the engine and the transmission. International Conference on Agricultural Engineering, 23 – 25.06. 2008 Creta Greece.
132. Owsiak Z., Lejman K. 2006. Przyrosty zwężłości gleb gliniastych zagęszczanych kołami ciągnika. Inżynieria Rolnicza. Nr 4 (79). 37-44.
133. Patel S. K., Mani I. 2011. Effect of multiple passes of tractor with varying normal load on subsoil compaction. Journal of Terramechanics 48. 277-284.
134. Peca J., Serrano J., Pinheiro A., Carvalho M., Nunnes M., Ribeiro L., Santos F. 2010. Speed advice for power efficient drawbar work. Journal of Terramechanics 47. 55-61.
135. Perdok U. D. 1978. A prediction model for the selection of tires for towed vehicles on tilled soils. Journal of Agricultural Engineering Research 23. 369-383.
136. Powalka M., Buliński J. 2005. Wpływ technicznych parametrów opon ciągnikowych i sztywności podłoża na wielkość powierzchni podparcia koła. Inżynieria Rolnicza. Nr 4 (64). 155-163.
137. Pranav P. K., Pandey K. P. 2008. Computer simulation for ballast management for agricultural tractors. Journal of Terramechanics 45. 185-192.
138. Pranav P. K., Pandey K. P., Tewari V. K. 2010. Digital wheel slipmeter for agricultural 2WD tractors. Computers and Electronics in Agriculture Vol. 73. 188-193.
139. Pytka J., Dąbrowski J., Zając M., Tarnowski P. 2006. Effects of reduced inflation pressure and vehicle loading of off-road traction and soil stress and deformation state. Journal of Terramechanics 43. 469-485.
140. Raper R. L., Bailey A. C., Burt E. C., Johnson C. E. 1994. Prediction of soil stresses caused by tire inflation pressures and dynamic loads. An ASAE Meeting Presentation no 941547. 1-14.
141. Raper R. L., Bailey A. C., Burt E. C., Way T. R. Liberati P. 1995a. The effects of reduced inflation pressure on soil-tire interface stresses and soil strength. Journal of Terramechanics 32(1). 43-51.
142. Raper R. L., Bailey A. C., Burt E. C., Way T. R. Liberati P. 1995b. Inflation pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil-tire interface stresses. Transactions of the ASAE vol. 38(3). 685-689.
143. Rebati J., Loghavi M. 2006. Investigation and evaluation of rolling resistance prediction models for pneumatic tire of agricultural vehicles. Iran Agricultural Research 24(2). 77-88.
144. Reece A. R. 1965. Principles of soil – vehicle mechanics automobile division. The Institution of Mechanical Engineers. Bridgeway Wall, London.
145. Reichenberger L. 1992. Radial tire needs cheeks. Farm Journal February 1992.

146. Rosca R., Rakosi E., Manolanche G. 2004a. Wheel traction prediction – a comparison between models and experimental data. SAE Technical Paper Series 2004-01-2707.
147. Rosca R., Rakosi E., Manolanche G. 2004b. Wheel traction prediction on agricultural soil. Mat. Konf. Aktualni zadaci mehanizacije poljoprivrede. Zbornik radova, 32. međunarodnog simpozija iz područja mehanizacije poljoprivrede, Opatija, Hrvatska, 23-27 veljač 2004. 71-79.
148. Schreiber M., Kutzbach H. D. 2008. Influence of soil land tire parameters of traction. Res. Agr. Eng. 54(2). 43-49.
149. Senatore C., Sandu C. 2011a. Off-road tire modeling and the multi-pass effect for vehicle dynamics simulation. Journal of Terramechanics 48. 265-276.
150. Senatore C., Sandu C. 2011b. Torque distribution influence on tractive efficiency and mobility of of-road wheeled vehicles. Journal of Terramechanics 48. 372-383.
151. Sharma A. K., Pandey K. P. 1996. The deflection and contact characteristics of some agricultural tires with zero sinkage. Journal of Terramechanics 33(6). 293-299.
152. Sharma A. K., Pandey K. P. 2001. Matching tire size to weight, speed and power available for maximizing pulling ability of agricultural tractors. Journal of Terramechanics 38. 89-97.
153. Shmulevich I., Osetinsky A. 2003. Traction performance of a pushed/pulled drive wheel. Journal of Terramechanics 40. 33-50.
154. Silversides C. R., Sundberg U. 1989. Operational efficiency in forestry. Vol. 2. Practice. Kluwer Academic Publishers. 169.
155. Simikić M., Dedović N., Savin L., Tomić M., Silleli H., Ponjican O. 2012. Influence of eccentric drawbar force on power delivery efficiency of a wheeled tractor. Turkish Journal of Agricultural and Forestry 36. 1-16.
156. Situala B. K., Hansen S., Situala J. I. B., Bakken L. R. 2000. Effects of soil compaction on N₂O emission in agricultural soil. Chemosphere – Global Change Science 2. 367-371.
157. Smerda T., Cupera J. 2010. Tire inflation and its influence on drawbar characteristics and performance - energetic indicators of a tractor set. Journal of Terramechanics 47. 395-400.
158. Söhne B. D. 1970. The effects of traffic and implements on soil compaction. J. Proc. Inst.
159. Söhne W. 1961. Wechselbeziehungen zwischen Fahrzeug-Laufwerk und Boden beim Fahren auf unbefestigter Fahrbahn. Grundlagen der Landtechnik 13. 21-34.
160. Sołtyński A. 1973. Relation of soil conditions to the performance of simple traction device. Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture. Warsaw.
161. Stasiak W. 2008. Analiza modeli opisujących rozkład naprężeń w glebie. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering 53(2). 39-43.

162. Steiner R. 1979. Analyse, Synthese, und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlumpfungskurve von Luftreifen auf nachgiebigen Boden. M.E.G. Technische Universität München. Lehrstuhl für Landmaschinen. No 33.
163. Stombaugh T., Shearer S., Wilhoit J., McNeill S. 2008. Proper ballast and tire inflation. Cooperative Extension Service. University of Kentucky College of Agriculture, Lexington KY. Issue12/2008.
164. Sumer S. K., Sabanci A. 2005. Effects of different tire configurations on tractor performance. Turkish Journal of Agricultural and Forestry 29(2005). 461-468.
165. Świeżawski T. 1932. Toczenie koła. Czasopismo Techniczne nr 2-6.
166. Taylor J. H. 1973. Lug angle effect on traction performance of pneumatic tractor tires. Transactions of the ASAE. 16-18.
167. Taylor J. H., Burt E. C. 1974. Track and tire performance on agricultural soils. ASAE Paper No 73-1509. 3-6.
168. Turner R. J. 1993. Single, dual and triple tires and rubber belt tracks in prairie soil conditions. ASAE Paper no 93-1516. 1-18.
169. Turner R. J. 1995. Comparison of two and four track machines to rubber tire tractors in prairie soil conditions. SAE Technical Paper Series, Paper no 952097. 1-14.
170. Turner R. J. 1999. Field performance of Trelleborg and similar size radial tires. ASAE Paper no 99-1038. 1-14.
171. Upadhyaya S. K., Wulfsohn D. 1990. Relationship between tyre deflection characteristics and 2-D tyre contact area. Transaction of the ASAE 33(1). 25-30.
172. Upadhyaya S. K., Wulfsohn D., Jubbal G. 1989. Traction prediction equations for radial ply tires. Journal of Terramechanics 26. 149-175.
173. Van N. N., Matsuo T., Koumoto T., Inaba S. 2007. Effects of tire inflation pressure on soil contact pressure and rolling resistance of farm tractors. Bulletin of the Faculty of Agriculture - Saga University No 93. 101-108.
174. Van N. N., Matsuo T., Koumoto T., Inaba S. 2008. Transducers for measuring dynamic axle load of farm tractor. Bulletin of the Faculty of Agriculture - Saga University No 94. 23-25.
175. Vechinsky C. R., Johnson C. E., Raper R. L. 1998. Evaluation of a empirical traction equation for forestry tires. Journal of Terramechanics 35. 55-67.
176. Vermeulen G. D., Klooster J. J. 1992. The potential of a low ground pressure traffic system to reduce soil compaction on a clayey loam soil. Soil and Tillage Research 24(4). 337-358.
177. Wanjii S., Hiroma T., Ota Y., Kataoka T. 1997. Prediction of wheel performance by analysis of normal and tangential stress distributions under the wheel-soil interface. Journal of Terramechanics vol. 34, No 3. 165-186.
178. Way T. R., Bailey A. C., Raper R. L., Burt E. C. 1995. Tire lug height effect on soil stress and bulk density. ASAE Paper No 93-1033. 669-674.

179. Way T. R., Kishimoto T. 2004. Interface pressures of a tractor drive tire on structured and loose soils. *Biosystems Engineering* 87(3). 375-386.
180. Way T. R., Kishimoto T., Allen Torbert H., Burt E. C., Bailey A. C. 2009. Tractor tire aspect ratio effects on soil bulk density and cone index. *Journal of Terramechanics* 46. 27-34.
181. Weissbach M. 2001. Neue Reifkonzepte zur Bodenschonung. *Landtechnik*, Jg. 56, nr 2. 71-73.
182. White W. J. 2008. Economic history of tractors in the United States. *EH.Net Encyclopedia*, edited by Robert Whaples.
183. Wismer R.D., Luth H.J. 1974. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics* vol. 10, No 2. 49-61.
184. Wolf D., Shmulevich I., Mussel U. 1996. Wheel traction prediction on hard soil. *ASAE Paper No 92-1012*. 1275-1283.
185. Wong J.Y., Preston T. 1982. On the characterization of the shear stress-displacement relationship of terrain. 19(4). *Journal of Terramechanics* 81-98.
186. Wong J.Y., Reece A. 1967. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stressed. *Journal of Terramechanics* 4 (1). 81-98.
187. Wulfsohn D., Way T. R. 2009. Factors that influence tractive performance of wheels, tracks and vehicles. In: *Advances in Soil Dynamics* vol. 3. St Joseph Michigan ASABE. 209-252.
188. Wulfsohn D., Upadhyahya S. K., Chancellor W. J. 1988. Tractive characteristics of radial ply and bias ply tires in a California soil. *Journal of Terramechanics* vol. 25, No 2, 111-134.
189. Wulfsohn D., Upadhyaya S. K. 1992. Prediction of traction and soil compaction using three-dimensional soil-tyre contact profile. *Journal of Terramechanics* vol. 29, No 6. 541-564.
190. Xu D. M., Yong R. N., Mohamed A. M. O. 1991. Modeling of tire-clay soil interaction via quasi-static moving boundary displacement method. *Journal Of Forest Engineering* 2(2). 7-19.
191. Yong R. N., Boonsinsuk P., Fattah E. A. 1980. Tyre flexibility and mobility on soft soil. *Journal of Terramechanics* 17(1). 43-58.
192. Żabiński A., Jezierski T. 2011. Wpływ wielokrotnych przejazdów ciągnika na dynamikę wzrostu i plonowanie życicy trwałej *Lolium Perenne L.* *Inżynieria Rolnicza* 5(130). 299-306.
193. Zoz F. M., Grisso R. D. 2003. Traction and tractor performance. *ASAE Distinguished Lecture Series, Tractor Design No 27*, publication number 913C0403.
194. Zoz F. M., Turner R. J., Shell L. R. 1999. Power delivery efficiency: a valid measure of belt/tire tractor performance? *An ASAE Meeting Presentation Paper no 99-1034*. 1-10.

195. Zoz F. M, Turner R., Shell L. 2001. Power delivery efficiency: a valid measure of belt and tire tractor performance. Transactions of the ASAE vol. 45(3). 509 – 518.
196. Zoz F.M., Turner R. J. 1994. Effect of "correct" pressure on tractive efficiency of radial ply tires. An ASAE Meeting Presentation Paper No 94-1051. 1 -11.

Spis tabel

<i>Tabela 4.1. Zestawienie zabiegów agrotechnicznych w sezonie 2009/2010</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 4.2. Zestawienie zabiegów agrotechnicznych w sezonie 2010/2011</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 4.3. Maszyny stosowane przy zabiegach agrotechnicznych na poletkach w Jelczu-Laskowicach.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 4.4. Charakterystyka gruntowej drogi leśnej</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 4.5. Skład wysianej mieszanki tworzącej darń łąkową</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 4.6. Skład botaniczny badanej darni łąkowej.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 4.7. Skład granulometryczny gleby na poletku doświadczalnym Instytutu Inżynierii Rolniczej UP we Wrocławiu</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 4.8. Parametry opon użytych do badań trakcyjnych</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 6.1. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla siły trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 6.2. Wyniki testu Kruskalla-Wallisa dla siły trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 6.3. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla oporu przetaczania opony 7.5-16 w I etapie badań</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 6.4. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla oporu przetaczania opony 7.5-16 w I etapie badań</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 6.5. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 6.6. Wyniki testu jednorodności wariancji (Levene'a) dla sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 6.7. Wyniki testu Kruskalla-Wallisa dla sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 6.8. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla siły trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 6.9. Wyniki testu jednorodności wariancji (Levene'a) dla siły trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 6.10. Wyniki testu Kruskalla-Wallisa dla siły trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 6.11. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla siły trakcyjnej opony 8.3-20</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 6.12. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla siły trakcyjnej opony 8.3-20.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabela 6.13. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla siły trakcyjnej obu badanych opon</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 6.14. Wyniki testu Kruskalla-Wallisa dla siły trakcyjnej obu badanych opon.....</i>	<i>112</i>

<i>Tabela 6.15. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>114</i>
<i>Tabela 6.16. Wyniki testu jednorodności wariancji (Levene'a) dla siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>114</i>
<i>Tabela 6.17. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 6.18. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla oporu przetaczania opony 7.5-16 w II etapie badań.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 6.19. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla oporu przetaczania opony 7.5-16 w II etapie badań.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 6.20. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla oporu przetaczania opony 8.3-20</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 6.21. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla oporu przetaczania opony 8.3-20</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 6.22. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla oporu przetaczania obu badanych opon</i>	<i>120</i>
<i>Tabela 6.23. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla oporu przetaczania obu badanych opon</i>	<i>120</i>
<i>Tabela 6.24. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla oporu przetaczania opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 6.25. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla oporu przetaczania opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 6.26. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabela 6.27. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabela 6.28. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla sprawności trakcyjnej opony 8.3-20.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabela 6.29. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla sprawności trakcyjnej opony 8.3-20</i>	<i>140</i>
<i>Tabela 6.30. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla sprawności trakcyjnej obu badanych opon</i>	<i>142</i>
<i>Tabela 6.31. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla sprawności trakcyjnej obu badanych opon</i>	<i>142</i>
<i>Tabela 6.32. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>145</i>
<i>Tabela 6.33. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>145</i>

<i>Tabela 6.34. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy całkowitej i mocy uciagu koła z oponą 7.5-16</i>	<i>151</i>
<i>Tabela 6.35. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy traconych koła z oponą 7.5-16.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabela 6.36. Wyniki testu Kruskalla-Wallisa dla wszystkich mocy koła z oponą 7.5-16)</i>	<i>152</i>
<i>Tabela 6.37. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy całkowitej i mocy uciagu koła z oponą 8.3-20)</i>	<i>159</i>
<i>Tabela 6.38. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy traconych koła z oponą 8.3-20.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabela 6.39. Wyniki testu Kruskalla-Wallisa dla wszystkich mocy koła z oponą 8.3-20 .</i>	<i>160</i>
<i>Tabela 6.40. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy całkowitej oraz mocy uciagu kół z obiema badanymi oponami</i>	<i>165</i>
<i>Tabela 6.41. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy traconych kół z obiema badanymi oponami</i>	<i>165</i>
<i>Tabela 6.42. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla wszystkich mocy kół z obiema badanymi oponami</i>	<i>165</i>
<i>Tabela 6.43. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy całkowitej oraz mocy uciagu koła z oponą 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>169</i>
<i>Tabela 6.44. Wyniki testu normalności (Shapiro-Wilka) dla mocy traconych koła z oponą 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>169</i>
<i>Tabela 6.45. Wyniki testu jednorodności wariancji (Levene'a) dla mocy uciagu koła z oponą 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>169</i>
<i>Tabela 6.46. Wyniki testu Kruskala-Wallisa dla wszystkich mocy koła z oponą 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego</i>	<i>170</i>
<i>Tabela 6.47. Zestawienie parametrów silnika ciągnika przyjętego do analizy</i>	<i>170</i>
<i>Tabela 6.48. Wartości przełożeń skrzynki przekładniowej ciągnika przyjętego do analizy.....</i>	<i>171</i>
<i>Tabela 6.49. Zakresy prędkości jazdy hipotetycznego ciągnika na poszczególnych biegach.....</i>	<i>171</i>
<i>Tabela 6.50. Wartości siły trakcyjnej opony 7.5-16 wykorzystane do oceny transmisji mocy hipotetycznego ciągnika</i>	<i>172</i>
<i>Tabela 6.51. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 wykorzystane do oceny transmisji mocy hipotetycznego ciągnika</i>	<i>172</i>
<i>Tabela 6.52. Wartości poślizgów odpowiadających maksymalnej sprawności trakcyjnej opony 7.5-16</i>	<i>172</i>
<i>Tabela 6.53. Wartości poślizgów odpowiadających maksymalnej sprawności trakcyjnej opony 8.3-20</i>	<i>173</i>

Spis rysunków

Rys. 4.1. Wartości średnich miesięcznych temperatur w I roku badań (2010) w porównaniu ze średnimi z wielolecia	42
Rys. 4.2. Wartości sum opadów w I roku badań (2010) w porównaniu ze średnimi z wielolecia	42
Rys. 4.3. Wartości średnich miesięcznych temperatur w II roku badań (2011/2012) w porównaniu ze średnimi z wielolecia	43
Rys. 4.4. Wartości sum opadów w II roku badań (2011/2012) w porównaniu ze średnimi z wielolecia	44
Rys. 4.5. Lokalizacja ściernisk na terenie IUNG w Jelczu-Laskowicach	45
Rys. 4.6. Widok ogólny pola IUNG w Jelczu - Laskowicach	45
Rys. 4.7. Lokalizacja gruntowej drogi leśnej	49
Rys. 4.8. Widok ogólny gruntowej drogi leśnej	50
Rys. 4.9. Lokalizacja darni łkowej na terenie RZD Swojec	50
Rys. 4.10. Lokalizacja gleb na poletkach doświadczalnych Instytutu Inżynierii Rolniczej UP we Wrocławiu	52
Rys. 4.11. Zastosowania ciągników kompaktowych	54
Rys. 4.12. Przykład ciągnika kompaktowego – Massey Ferguson 1540	55
Rys. 4.13. Różne warianty wyposażenia ciągników Pronar serii 320	55
Rys. 4.14. Widok opony 7.5-16 użytej podczas I i II etapu badań	56
Rys. 4.15. Widok opony 8.3-20 użytej podczas II etapu badań	57
Rys. 4.16. Widok łańcucha antypoślizgowego po zamontowaniu na badanej oponie	58
Rys. 5.1. Plan badań I etapu	60
Rys. 5.2. Plan badań II etapu	62
Rys. 5.3. Urządzenie Penetrologger do pomiaru wilgotności i zwięzłości podłoża	63
Rys. 5.4. Widok ogólny i schemat sondy skrzydełkowej Geonor VANE H-60	64
Rys. 5.5. Schemat stanowiska do badań właściwości trakcyjnych	65
Rys. 5.6. Widok ogólny stanowiska do badań trakcyjnych	65
Rys. 6.1. Zestawienie wilgotności podłoża w badaniach etapu I	71
Rys. 6.2. Zestawienie zwięzłości podłoża w badaniach etapu I	72
Rys. 6.3. Zestawienie maksymalnych naprężeń ścinających w badaniach etapu I	73
Rys. 6.4. Przebieg siły trakcyjnej w funkcji poślizgu przy obciążeniu pionowym 4620 N ..	75
Rys. 6.5. Przebieg siły trakcyjnej w funkcji poślizgu przy obciążeniu pionowym 5320 N ..	75
Rys. 6.6. Średnie wartości siły trakcyjnej opony 7.5-16 w I etapie badań przy poślizgu 0 – 30%	76

<i>Rys. 6.7. Średnie wartości oporu przetaczania opony 7.5-16 w I etapie badań przy poślizgu 0 – 30%</i>	79
<i>Rys. 6.8. Przebieg sprawności trakcyjnej w funkcji poślizgu przy obciążeniu pionowym 4620 N</i>	81
<i>Rys. 6.9. Przebieg sprawności trakcyjnej w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N</i>	82
<i>Rys. 6.10. Maksymalne wartości sprawności trakcyjnych opony 7.5-16 przy obu poziomach obciążenia pionowego koła</i>	83
<i>Rys. 6.11. Zestawienie wilgotności podłoża w badaniach etapu II</i>	86
<i>Rys. 6.12. Zestawienie zwięzłości podłoża w badaniach etapu II</i>	87
<i>Rys. 6.13. Zestawienie maksymalnych naprężeń ścinających w badaniach etapu II</i>	88
<i>Rys. 6.14. Przebieg siły trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N</i>	89
<i>Rys. 6.15. Przebieg siły trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N</i>	90
<i>Rys. 6.16. Przebieg siły trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N</i>	91
<i>Rys. 6.17. Średnie wartości siły trakcyjnej opony 7.5-16 przy poślizgu 0 – 30%, przy wszystkich poziomach obciążenia pionowego</i>	92
<i>Rys. 6.18. Wartości siły trakcyjnej opony 7.50-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej</i>	93
<i>Rys. 6.19. Wartości siły trakcyjnej opony 7.50-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie uproszczonej</i>	94
<i>Rys. 6.20. Wartości siły trakcyjnej opony 7.50-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w siewie bezpośrednim</i>	94
<i>Rys. 6.21. Wartości siły trakcyjnej opony 7.50-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie zagęszczonej</i>	95
<i>Rys. 6.22. Wartości siły trakcyjnej opony 7.50-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie luźnej</i>	96
<i>Rys. 6.23. Przebieg siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N na ścierniskach</i>	98
<i>Rys. 6.24. Przebieg siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N na drodze, darni oraz glebach</i>	99
<i>Rys. 6.25. Przebieg siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N na ścierniskach</i>	100
<i>Rys. 6.26. Przebieg siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N na drodze, darni oraz glebach</i>	100
<i>Rys. 6.27. Przebieg siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N na ścierniskach</i>	101

Rys. 6.28. Przebiegi siły trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N na drodze, darni oraz glebach	102
Rys. 6.29. Średnie wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy poślizgu 0 – 30%.....	103
Rys. 6.30. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej	104
Rys. 6.31. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie uproszczonej	105
Rys. 6.32. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w siewie bezpośrednim	105
Rys. 6.33. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na drodze leśnej.....	106
Rys. 6.34. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na darni.....	106
Rys. 6.35. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie zagęszczonej	107
Rys. 6.36. Wartości siły trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie luźnej.....	108
Rys. 6.37. Porównanie wartości siły trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 4620 N.....	109
Rys. 6.38. Porównanie wartości siły trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 5320 N.....	110
Rys. 6.39. Porównanie wartości siły trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 6110 N.....	110
Rys. 6.40. Przebiegi siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na ściernisku w uprawie tradycyjnej	112
Rys. 6.41. Przebiegi siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na ściernisku w uprawie uproszczonej.....	113
Rys. 6.42. Przebiegi siły trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na drodze leśnej.....	113
Rys. 6.43. Średnie wartości oporu przetaczania opony 7.5-16 przy poślizgach 0 – 30% w II etapie badań.....	115
Rys. 6.44. Średnie wartości oporu przetaczania opony 8.3-20 przy poślizgu 0 – 30%	117
Rys. 6.45. Średnie wartości oporu przetaczania obu opon przy poślizgu 0 – 30%	119
Rys. 6.46. Średnie wartości oporu przetaczania opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego, przy poślizgu 0 – 30%.....	121
Rys. 6.47. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N	122
Rys. 6.48. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N	123

<i>Rys. 6.49. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N</i>	<i>124</i>
<i>Rys. 6.50. Maksymalne wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 w II etapie badań</i>	<i>125</i>
<i>Rys. 6.51. Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej</i>	<i>126</i>
<i>Rys. 6.52. Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie uproszczonej</i>	<i>127</i>
<i>Rys. 6.53. Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w siewie bezpośrednim</i>	<i>127</i>
<i>Rys. 6.54. Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie zagęszczonej</i>	<i>128</i>
<i>Rys. 6.55. Wartości sprawności trakcyjnej opony 7.5-16 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie luźnej</i>	<i>129</i>
<i>Rys. 6.56. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N na ścierniskach</i>	<i>130</i>
<i>Rys. 6.57. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 4620 N na drodze, darni oraz glebach</i>	<i>131</i>
<i>Rys. 6.58. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N na ścierniskach</i>	<i>131</i>
<i>Rys. 6.59. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 5320 N na drodze, darni oraz glebach</i>	<i>132</i>
<i>Rys. 6.60. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N na ścierniskach</i>	<i>132</i>
<i>Rys. 6.61. Przebieg sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 w funkcji poślizgu przy obciążeniu 6110 N na drodze, darni oraz glebach</i>	<i>133</i>
<i>Rys. 6.62. Maksymalne wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20</i>	<i>134</i>
<i>Rys. 6.63. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej</i>	<i>135</i>
<i>Rys. 6.64. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w uprawie uproszczonej</i>	<i>135</i>
<i>Rys. 6.65. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na ściernisku w siewie bezpośrednim</i>	<i>136</i>
<i>Rys. 6.66. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na drodze leśnej</i>	<i>137</i>
<i>Rys. 6.67. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na darni</i>	<i>137</i>
<i>Rys. 6.68. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie zagęszczonej</i>	<i>138</i>

<i>Rys. 6.69. Wartości sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 przy różnym poślizgu i obciążeniu pionowym na glebie luźnej.....</i>	<i>138</i>
<i>Rys. 6.70. Porównanie wartości sprawności trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 4620 N.....</i>	<i>140</i>
<i>Rys. 6.71. Porównanie wartości sprawności trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 5320 N.....</i>	<i>141</i>
<i>Rys. 6.72. Porównanie wartości sprawności trakcyjnej obu badanych opon na ścierniskach i glebach przy obciążeniu 6110 N.....</i>	<i>141</i>
<i>Rys. 6.73. Przebiegi sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na ściernisku w uprawie tradycyjnej</i>	<i>143</i>
<i>Rys. 6.74. Przebiegi sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na ściernisku w uprawie uproszczonej.....</i>	<i>143</i>
<i>Rys. 6.75. Przebiegi sprawności trakcyjnej opony 8.3-20 z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego na drodze leśnej.....</i>	<i>144</i>
<i>Rys. 6.76. Przebiegi mocy koła z oponą 7.50-16 na ściernisku w uprawie tradycyjnej przy obciążeniu 6110 N.....</i>	<i>145</i>
<i>Rys. 6.77. Przebiegi mocy koła z oponą 7.50-16 na ściernisku w uprawie uproszczonej przy obciążeniu 6110 N.....</i>	<i>146</i>
<i>Rys. 6.78. Przebiegi mocy koła z oponą 7.50-16 na ściernisku w siewie bezpośrednim przy obciążeniu 6110 N.....</i>	<i>147</i>
<i>Rys. 6.79. Przebiegi mocy koła z oponą 7.50-16 na glebie zagęszczonej przy obciążeniu 6110 N</i>	<i>147</i>
<i>Rys. 6.80. Przebiegi mocy koła z oponą 7.50-16 na glebie luźnej przy obciążeniu 6110 N</i>	<i>148</i>
<i>Rys. 6.81. Zestawienie wartości mocy koła z oponą 7.5-16 na wszystkich badanych podłożach przy trzech poziomach obciążenia pionowego.....</i>	<i>149</i>
<i>Rys. 6.82. Zestawienie udziałów poszczególnych mocy w mocy całkowitej koła z oponą 7.5-16 na przy trzech poziomach obciążenia pionowego.....</i>	<i>150</i>
<i>Rys. 6.83. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na ściernisku w uprawie tradycyjnej przy obciążeniu 6110 N.....</i>	<i>152</i>
<i>Rys. 6.84. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na ściernisku w uprawie uproszczonej przy obciążeniu 6110 N.....</i>	<i>153</i>
<i>Rys. 6.85. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na ściernisku w siewie bezpośrednim przy obciążeniu 6110 N.....</i>	<i>154</i>
<i>Rys. 6.86. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na drodze leśnej przy obciążeniu 6110 N</i>	<i>154</i>
<i>Rys. 6.87. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na darni łkowej przy obciążeniu 6110 N</i>	<i>155</i>
<i>Rys. 6.88. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na glebie zagęszczonej przy obciążeniu 6110 N</i>	<i>155</i>

Rys. 6.89. Przebiegi mocy koła z oponą 8.3-20 na glebie luźnej przy obciążeniu 6110 N	156
Rys. 6.90. Zestawienie wartości mocy koła z oponą 8.3-20 na ścierniskach przy trzech poziomach obciążenia pionowego.....	157
Rys. 6.91. Zestawienie wartości mocy koła z oponą 8.3-20 na drodze, darni oraz glebach przy trzech poziomach obciążenia pionowego.....	157
Rys. 6.92. Zestawienie udziałów poszczególnych mocy w mocy całkowitej koła z oponą 8.3-20 na ścierniskach przy trzech poziomach obciążenia pionowego.....	158
Rys. 6.93. Zestawienie udziałów poszczególnych mocy w mocy całkowitej koła z oponą 8.3-20 na drodze, darni oraz glebach przy trzech poziomach obciążenia pionowego	158
Rys. 6.94. Wartości mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 4620 N	161
Rys. 6.95. Wartości mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 5320 N	162
Rys. 6.96. Wartości mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 6110 N	163
Rys. 6.97. Udziały mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 4620 N	163
Rys. 6.98. Udziały mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 5320 N	164
Rys. 6.99. Udziały mocy kół z obiema badanymi oponami przy obciążeniu pionowym 6110 N	164
Rys. 6.100. Przebiegi mocy koła z łańcuchem antypoślizgowym na ściernisku w uprawie tradycyjnej przy obciążeniu pionowym 6110 N	166
Rys. 6.101. Przebiegi mocy koła z łańcuchem antypoślizgowym na ściernisku w uprawie uproszczonej przy obciążeniu pionowym 6110 N	166
Rys. 6.102. Przebiegi mocy koła z łańcuchem antypoślizgowym na drodze leśnej przy obciążeniu pionowym 6110 N	167
Rys. 6.103. Wartości mocy dla koła z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego przy obciążeniu pionowym 6110 N	168
Rys. 6.104. Udziały mocy dla koła z łańcuchem i bez łańcucha antypoślizgowego przy obciążeniu pionowym 6110 N	168
Rys. 6.105. Zewnętrzna charakterystyka prędkościowa silnika przyjętego do analizy.....	171
Rys. 6.106. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N	174
Rys. 6.107. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N.....	174
Rys. 6.108. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N	175

Rys. 6.109. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N.....	175
Rys. 6.110. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N	176
Rys. 6.111. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N.....	176
Rys. 6.112. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N.....	177
Rys. 6.113. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 7.5-16 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N.....	178
Rys. 6.114. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N	179
Rys. 6.115. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9240 N.....	179
Rys. 6.116. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N	180
Rys. 6.117. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N.....	180
Rys. 6.118. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9420 N	181
Rys. 6.119. Zestawienie momentu obrotowego silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 9420 N.....	181
Rys. 6.120. Zestawienie mocy silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N.....	182
Rys. 6.121. Zestawienie momentu silnika ciągnika wyposażonego w opony 8.3-20 przy jeździe z prędkością $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy obciążeniu pionowym osi 12220 N	182

Wykaz oznaczeń

P_T – siła trakcyjna [N],
 P_U – siła uciagu [N],
 P_f – opór przetaczania [N],
 η – sprawność trakcyjna [%],
 δ – poślizg [%],
 r_D – promień dynamiczny [m]
 s_R – droga rzeczywista [m],
 s_T – droga teoretyczna [m]
 v_R – prędkość rzeczywista [$m \cdot s^{-1}$],
 v_T – prędkość teoretyczna [$m \cdot s^{-1}$]
 N_H – moc uciagu [W],
 N_f – moc tracona na opory przetaczania [W],
 N_δ – moc tracona na poślizg [W],
 N_k – moc dostarczana do koła (całkowita) [W],
 M_O – moment obrotowy [Nm],
 r_δ – promień poślizgu [m],
 ω_T – teoretyczna prędkość kątowna [s^{-1}].