



# UNIwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

**mgr inż. Małgorzata Wilkosz-Stróżyk**

**Wpływ nawożenia azotem na plonowanie i jakość technologiczną korzeni  
buraka cukrowego**

The influence of nitrogen fertilization on the yield and technological quality of  
sugar beet roots

**Rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem**

**dr hab. inż. Grzegorza Kulczyckiego, profesora uczelni**

**oraz**

**Promotor pomocniczej, dr Elżbiety Sacały**

**Instytut Nauk o Glebie, Żywienia Roślin i Ochrony Środowiska**

Wrocław 2024

*Szczególne podziękowania kieruję do Promotora pracy dr hab. inż. Grzegorza Kulczyckiego profesora uczelni za podjęcie się trudu prowadzenia niniejszej rozprawy doktorskiej, wsparcie merytoryczne i ogromną pomoc przy przygotowywaniu pracy, a także wyrozumiałość, cierpliwość i zaangażowanie.*

*Słowa podziękowania kieruję również do promotor pomocniczej - dr Elżbiety Sacały, za pomoc w przeprowadzeniu badań, ukierunkowanie merytoryczne, a także ogromną wyrozumiałość, cierpliwość i przede wszystkim wsparcie na każdym etapie studiów doktorskich oraz podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej.*

*Pragnę złożyć serdeczne podziękowania prof. dr hab. Urszuli Prošbie-Białczyk za owocną czteroletnią współpracę w ramach studiów doktoranckich oraz ogromny wkład w przygotowanie wyników badań i merytoryczne ukierunkowanie pracy doktorskiej.*

*Pragnę podziękować również wszystkim Pracownikom Instytutu Agroekologii i Produkcji Roślinnej, Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu za pomoc przy realizacji badań polowych i laboratoryjnych, a także za owocną czteroletnią współpracę podczas studiów doktoranckich.*

*Niniejszą rozprawę doktorską dedykuję moim rodzicom,  
mężowi oraz przyjaciołom w podziękowaniu za pomoc,  
wrozumiałość i słowa otuchy w trakcie jej pisania.*

## Streszczenie

W latach 2015-2017 przeprowadzono doświadczenie polowe w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu w Pawłowicach. Celem przeprowadzonych badań było określenie w jakich ilościach i formach nawożenie azotem oddziałuje na plon i jakość technologiczną korzeni buraka cukrowego. Dodatkowo badano również dynamikę zmian określonych parametrów w wybranych fazach BBCH, takich jak: cechy morfologiczne korzeni buraka cukrowego (długość i szerokość), zawartości suchej masy w korzeniach i liściach buraka cukrowego, narastania świeżej masy korzeni i liści z pojedynczej rośliny, zawartości i akumulacji azotu w korzeniach, aktywności reduktazy azotanowej i zawartości barwników fotosyntetycznych. W pracy w modelu doświadczenia wielokrotnego określono efekty główne działania badanych zmiennych oraz ich interakcje. Wykonano również analizę regresyjną dla wybranych zależności pomiędzy badanymi zmiennymi w celu określenia ich kierunku oraz siły oddziaływania. W warunkach przeprowadzonego doświadczenia polowego optymalną dawką pod względem osiągnięcia największych plonów buraka (świeżej i suchej masy korzeni oraz liści) była dawka azotu  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Największy biologiczny i technologiczny plon cukru również osiągnięto przy zastosowaniu największej dawki azotu. Forma szybko działającego azotu (D-D) znacząco zwiększała plony korzeni buraka, w porównaniu do formy wolno działającego azotu (W-D). Natomiast azot w formie W-D znacząco zmniejszył zawartość azotu- $\alpha$ -aminowego, czyli melasotworu, który istotnie ogranicza ekstrakcję cukru z buraków cukrowych.

## Summary

A field experiment was conducted at the Agricultural Experimental Station of the Wrocław University of Life Sciences in Pawłowice in 2015-2017. The aim of the research was to determine in what doses and forms nitrogen fertilisation affects the yield and technological quality of sugar beet roots. In addition, the dynamics of changes in specific parameters at selected BBCH stages was also studied, such as: morphological features of sugar beet roots (length and width), dry matter content in roots and leaves of sugar beet, fresh weight accumulation of roots and leaves from a single plant, nitrogen content and accumulation in roots, nitrate reductase activity and photosynthetic pigment content. In this study, the main effects of the variables studied and their interactions were determined in a multiple experiment model. Regression analysis was also performed for selected relationships between the variables studied to determine their direction and strength of interaction. Under the conditions of the conducted field experiment, the optimum dose in terms of achieving the highest beet yields (fresh and dry mass of roots and leaves) was the nitrogen dose of 160 kg-ha<sup>-1</sup>. The highest biological and technological sugar yields were also achieved with the highest nitrogen dose. The fast-acting nitrogen form (D-D) significantly increased beet root yields, compared to the slow-acting nitrogen form (W-D). In contrast, nitrogen in the W-D form significantly reduced the content of nitrogen- $\alpha$ -amino, a molasses, which significantly limits sugar extraction from sugar beet.

## Spis treści

1. Wstęp.....	8
2. Przegląd literatury .....	11
2.1. Znaczenie azotu w żywieniu buraka cukrowego .....	11
2.2. Formy azotu i ich wpływ na środowisko .....	13
2.3. Wpływ azotu na środowisko naturalne .....	14
2.4. Nawożenie buraka azotem a program azotanowy .....	16
2.5. Wpływ azotu na plonowanie i cechy jakościowe buraka cukrowego .....	16
3. Cel i hipotezy badawcze.....	21
3.1. Hipotezy badawcze:.....	21
4. Metodyka badań.....	21
4.1. Statystyczne opracowanie wyników .....	23
4.2. Lokalizacja i warunki przyrodnicze .....	24
4.2.1. Lokalizacja .....	24
4.2.2. Warunki klimatyczne .....	24
4.2.3. Warunki glebowe .....	33
4.3. Agrotechnika.....	33
5. Wyniki i dyskusja.....	35
5.1. Plon świeżej masy korzeni buraka cukrowego .....	35
5.2. Plon suchej masy korzeni buraka cukrowego .....	41
5.3. Plon liści buraka cukrowego .....	42
5.4. Jakość technologiczna korzeni buraka cukrowego .....	46
5.5. Biologiczny plon cukru .....	51
5.6. Technologiczny plon cukru.....	53
5.7. Cechy morfologiczne korzeni buraka cukrowego .....	56
5.8. Sucha masa liści i korzeni buraka cukrowego.....	59
5.9. Świeża masa liści i korzeni z pojedynczej rośliny.....	62
5.10. Świeża masa pojedynczego korzenia a plon biologiczny cukru .....	65
5.11. Zawartość azotu w korzeniach .....	66
5.12. Akumulacja azotu w korzeniach buraków cukrowych .....	68
5.12.1. Akumulacja N w korzeniach a plon korzeni buraka.....	69
5.12.2. Akumulowanie N w korzeniach a długość korzeni.....	71
5.12.3. Akumulowanie N w korzeniach a szerokość korzeni .....	72
5.13. Reduktaza azotanowa (NR).....	73
5.14. Barwniki fotosyntetyczne .....	76

5.14.1. Chlorofil <i>a</i> , a plon suchej masy korzeni .....	78
5.14.2. Chlorofil <i>b</i> , a zawartość sacharozy w korzeniach buraka .....	80
6. Podsumowanie badań .....	82
7. Wnioski .....	82
8. Literatura.....	84
9. Spis tabel.....	97
10. Spis rysunków.....	97

## 1. Wstęp

Burak cukrowy (*Beta vulgaris* L. *subsp. vulgaris*), należy do roślin okopowych, przemysłowych. W światowej produkcji stanowi znaczące źródło cukru. Wśród największych światowych producentów buraków cukrowych Polska plasuje się na szóstym miejscu, największym producentem buraków cukrowych jest Rosja, następnie Francja, Stany Zjednoczone, Niemcy i Turcja (FAOSTAT, 2022).

Z danych opublikowanych przez Krajowy Związek Plantatorów Buraka Cukrowego (KZPBC, 2023) wynika, iż w sezonie 2022/2023 areał zasiewów buraka cukrowego zmalał do 222 762 ha z 250 078 ha rok wcześniej, a produkcja do 14 147,8 tys. ton z 15 271,2 tys. ton. Z kolei produkcja cukru zmalała w tym czasie do 2 007,6 tys. ton z 2 300,7 tys. ton. W sezonie 2023/2024 areał zasiewów buraka cukrowego w Polsce znacząco wzrósł i wynosił 265 673 ha, odnotowano również wzrost produkcji do 16 966,2 tys. ton., wzrosła także produkcja cukru do 2341,4 tys. ton.

Buraki cukrowe stanowią 20% światowej produkcji cukru, pozostałe 80% produkowane jest z trzciny cukrowej. Zawartość cukru w korzeniu buraka cukrowego wynosi zwykle 13–20% (Antunović i in., 2021). Ponad 98% całkowitego cukru korzeniowego stanowi sacharoza, fruktoza i glukoza natomiast występują w bardzo małych ilościach (Varga i in., 2021).

Uprawa buraków cukrowych ma duże znaczenie gospodarcze. Pozyskiwany z nich cukier wykorzystywany jest nie tylko w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym, ale także paliwowym. Natomiast produkty uboczne w postaci wysłodków znajdują swoje zastosowanie w żywieniu zwierząt, a wprowadzane do gleby liście stanowią bogaty w makroelementy i mikroelementy nawóz organiczny. Za uprawą buraków cukrowych przemawia także wiele pozytywnych dla rolnictwa argumentów, chociażby zachowania odpowiedniego płodozmiaru, dobre stanowisko po ich uprawie, poprawa struktury gleby i wzbogacanie gleby w składniki pokarmowe (Fugol i Pilarski, 2011).

Uprawa buraków cukrowych kojarzona jest zazwyczaj z przemysłem cukrowniczym, jednak wykorzystanie tego surowca może być znacznie szersze na przykład jako substrat do biogazowni. Surowiec ten ma bardzo wysoki potencjał plonotwórczy, z hektara można uzyskać około 60, a nawet 100 ton, oczywiście przy zastosowaniu odpowiedniej agrotechniki. Buraki cukrowe charakteryzują się również wysokim potencjałem pozyskiwania biogazu na kilogram suchej masy, a mimo to jako wsad wykorzystano je w zaledwie kilku biogazowniach. Unijna reforma rynku cukru i związane z nią ograniczenia obszaru upraw buraków cukrowych



zwróciły uwagę na nowe możliwości wykorzystania tej rośliny do produkcji bioetanolu i biogazu. Innym istotnym aspektem, dla którego możliwe jest energetyczne przeznaczenie buraka cukrowego, są naciski płynące z Unii Europejskiej na wszystkie kraje członkowskie w kwestii podjęcia konkretnych działań, które przyczynią się do zwiększenia pozyskania energii ze źródeł odnawialnych w ogólnym bilansie energetycznym kraju. Działania te wynikają przede wszystkim z Unijnego Pakietu energetyczno-klimatycznego oraz zmian wprowadzanych za pośrednictwem Zielonego Ładu, które mają na celu ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery, także tych pochodzących ze źródeł rolniczych, zmniejszenie zużycia energii pierwotnej, a także zwiększenie udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych (Fugol i Pilarski, 2011; Artyszak, 2013).

Z punktu widzenia rolnika burak cukrowy, zwłaszcza w ostatnich latach zyskuje na atrakcyjności. Wiąże się to przede wszystkim ze wzrostem opłacalności produkcji, która szczególnie w ubiegłym sezonie znacząco wzrosła, ale także ze stabilnością dochodu w porównaniu do innych roślin takich jak zboża czy rzepak. Jest to jednak bardzo wymagająca uprawa pod względem stanowiska, warunków termiczno-wilgotnościowych, nawożenia i ochrony (Kotecki i in., 2020).

Do uprawy buraka cukrowego nadają się przede wszystkim gleby ciężkie i średnie, o odpowiedniej zawartości próchnicy i wysokiej kulturze. Zasobność gleby w składniki pokarmowe pod uprawę buraka cukrowego powinna być co najmniej średnia, a pH gleby powinno mieścić się w zakresie 6,0 – 7,5. Stanowisko pod uprawę buraków cukrowych powinno charakteryzować się wyrównaną powierzchnią i uregulowanymi stosunkami powietrzno-wodnymi. Na tym samym stanowisku buraki powinny być uprawiane nie częściej niż co 4 lata. Najlepszym przedplonem dla buraka jest bobik, groch, pszenica, pszenżyto oraz międzyplony ścierniskowe (Kotecki i in., 2020).

Ważnym aspektem w uprawie buraków cukrowych jest także zwalczanie chwastów. Długi okres wschodów, powolny wzrost początkowy, a przede wszystkim szeroka rozstawa rzędów powoduje presję ze strony chwastów. Rozpoczęcie zwalczania chwastów przedwschodowo, a także w trakcie wschodów buraków cukrowych i utrzymywanie ładu wolnego od chwastów aż do momentu zwarcia rzędów wpływa korzystnie na wielkość oraz jakość plonu buraka cukrowego (Krawczyk i in., 2007). Problem wycofywania wielu substancji aktywnych środków ochrony roślin w tym herbicydów, ale także fungicydów i insektycydów powoduje, że ochrona buraka cukrowego zaczyna stwarzać coraz większe problemy. Zdrowotność buraków cukrowych i zwalczanie najważniejszych sprawców chorób takich jak zgorzele siewek i zgnilizny korzeni, chwościk buraka, brunatna plamistość liści,

rizomania, rdza buraka czy mączniak prawdziwy jest istotnym elementem prowadzenia plantacji. W warunkach klimatycznych Polski występuje także wiele szkodników powodujących ogromne straty w produkcji buraków cukrowych. Do najważniejszych szkodników należą rolnice i drutowce, mątwik burakowy, śmietka ćwiklanka, mszyce, przędziorki, a także występujący od niedawna szarek komośnik (Grzebisz i in., 1996; Bartnik i in., 2008; Grzebisz, 2011a; Gniewowska i Maziarek, 2015; Kotecki i in., 2020).

Wytwarzanie wyjątkowo dużej masy z hektara sprawia, iż buraki wykazują wysokie zapotrzebowanie nie tylko na wodę, ale także na składniki pokarmowe. Wobec tego wszystkie aspekty uprawy, mające wpływ na glebę i jej produktywność, mają ogromne znaczenie w prowadzeniu plantacji buraka cukrowego. Nawożenie mineralne oraz organiczne stanowi kluczowy element powodzenia uprawy buraka cukrowego, gdyż w dużej mierze decyduje o wielkości plonu i jego jakości. Właściwe zaopatrzenie roślin w NPK oraz Mg, S, a także niezbędne mikroelementy takie jak bor, żelazo, cynk, miedź czy mangan oraz krzem i sód bezpośrednio oddziałują na wielkość plonu i jakość przetwórczą korzeni buraka (Gutmański, 1991; Barłóg i Grzebisz, 2004; Szewczuk, 2008; Grzebisz, 2011a, 2014; Barłóg, 2016, 2021; Kotecki i in., 2020).

Z punktu widzenia wielkości i jakości plonu największe znaczenie w nawożeniu buraka cukrowego odgrywa azot (Draycott i Christenson, 2003; Szewczuk, 2007; Malnou i in., 2008; Szewczuk, 2008; Grzebisz, 2011b; Barłóg, 2012; Górski, 2014; Grzebisz, 2015; Grzebisz, 2018, 2020a, 2020b, 2021; Varga i in., 2022) U wszystkich roślin azot, bierze udział w biosyntezie aminokwasów, białek, kwasów nukleinowych czy chlorofilu, co bezpośrednio wpływa na prawidłowy wzrost i rozwój roślin (Rutkowska, 2014; Sainju i in., 2020; Varga i in., 2022) w przypadku buraka cukrowego jest ważnym czynnikiem decydującym o jakości technologicznej korzeni. Dlatego też właściwy dobór dawki nawożenia azotowego jest sprawą pierwszoplanową. Nawożenie azotem powinno być na tyle wysokie by zapewnić burakom osiągnięcie maksymalnych plonów, a z drugiej strony na tyle niskie by nie spowodowało obniżenia ich wartości jako surowca przemysłowego. Szczególna rola azotu w uprawie buraków cukrowych i niekorzystne aspekty wynikające ze stosowania zbyt wysokich jego dawek zmuszają do pogłębienia wiedzy i przeanalizowania kwestii doboru odpowiedniej dawki oraz formy azotu, pobierania i przyswajania tego składnika uwzględniając przy tym aspekty plonowania i jakości technologicznej buraka cukrowego (Li i in., 2023; Varga i in., 2021, 2022, 2023; Chatterjee i in., 2018; Barzegari i in., 2017; Tarkalson i in., 2016; Koch i in., 2016; Abdallah, Mekdad, 2015; Barłóg i in., 2013; Stevens i in., 2011; Borówczak i in., 2006; Szymczak-Nowak i in., 2003; Jaszczułt, 1995).

## 2. Przegląd literatury

### 2.1. Znaczenie azotu w żywieniu buraka cukrowego

Azot jest potrzebny roślinom do budowy białek, wchodzi również w skład kwasów nukleinowych, witamin, alkaloidów, nukleotydów, a także chlorofilu. Ma również wpływ na pobieranie pozostałych makroelementów takich jak potas, fosfor czy magnez. Niedobór azotu w roślinach najczęściej objawia się blednięciem liści, chlorozami, karłowaceniem roślin oraz słabo rozwiniętymi liśćmi. Dostarczenie azotu do gleby lub nalistnie powoduje, że rośliny szybko go pobierają, dzięki czemu szybko zaczynają przybierać intensywny zielony kolor. Przenawożenie azotem ma jednak niekorzystny wpływ na rośliny, gdyż mają one wtedy wybujałe rozmiary, ich dojrzewanie może zostać opóźnione, są bardziej podatne na choroby, a także pogarsza się ich wartość biologiczna i technologiczna (Varga i in., 2023; Staszewski, 2011; Malnou i in., 2006).

Nadmiar lub brak azotu w burakach cukrowych ma bezpośredni wpływ na ich wzrost i rozwój. Z jednej strony dość łatwo można wizualnie rozpoznać jego brak w burakach cukrowych, gdyż w tym przypadku rozeta liściowa nie może się w pełni rozwinąć, a wzrost zostaje wcześniej zatrzymany. Objawy niedoboru azotu pojawiają się najpierw na najstarszych liściach, które tracą zieloną barwę, a żółknięcie rozprzestrzenia się wzdłuż nerwów liścia, przy czym brzeżne części liścia pozostają zielone (Varga i in., 2023; Varga, Lončarić, 2020; Pospišil i in., 2000). Z drugiej strony zbyt wysokie nawożenie azotem sprzyja wzrostowi nadziemnej części rośliny, co skutkuje nadmierną masą liści roślin, kosztem zawartości cukru (Ebmeyer, Hoffmann, 2021; Hadir i in., 2020). Dodatkowo zwiększa się udział szkodliwych związków azotowych kosztem cukru, a co za tym idzie, pogarsza się jakość technologiczna surowca. Zatem znaczenie zrównoważonego nawożenia azotem ma kluczowe znaczenie dla stabilnego plonu korzeni i parametrów jakościowych (Wesołowski i in., 2023; Varga i in., 2023; Zhou i in., 2023; Rašovský i in., 2022; Varga i in., 2022; Barzegari i in., 2017; Moustafa i in., 2011; Szczepaniak i in., 2002; Wyszyński i in., 2002).

Korzenie buraków cukrowych zawierają około 0,1—2 % azotu ogólnego. Zawartość azotu w korzeniu zależy w dużej mierze od odmiany, warunków termiczno-wilgotnościowych oraz poziomu nawożenia, głównie nawozami azotowymi i wieloskładnikowymi. Wiedza dotycząca ilości związków azotowych w buraku cukrowym jest szczególnie istotna ze względów technologicznych, ponieważ w czasie procesu produkcji i ekstrakcji cukrów z buraków cukrowych wysoka zawartość azotu oraz pozostałych melasotworów w korzeniach utrudnia proces technologiczny. Białka stanowią około 40 do 50% związków azotowych

korzeni. Część białka zawartego w korzeniach buraków cukrowych jest ściśle związana z celulozą i ligniną, tworząc ściany komórkowe, dlatego trudno jest wyekstrahować azot z miazgi buraków. Około 30 do 40% ogólnej zawartości azotu w korzeniach buraków cukrowych stanowią wolne aminokwasy na przykład kwas glutaminowy, kwas asparaginowy, alanina oraz leucyna. Liście buraków zawierają zdecydowanie większe ilości azotu niż korzenie. Zawartość azotu w liściach kształtuje się na poziomie 2 do 6 % (Rutkowska, 2014; Prvulović i in., 2010; Trzebiński, Cieśla, 1979). W młodych liściach natomiast znajdują się wyższe ilości azotu niż w liściach starszych (Varga i in., 2022).

Źródłem azotu dla roślin są przede wszystkim jony amonowe ( $\text{N-NH}_4$ ) i azotanowe ( $\text{N-NO}_3$ ). Formy te są łatwo przyswajane i pobierane przez rośliny. Kurus i in. (2004) wykazali, iż forma azotanowa ( $\text{N-NO}_3$ ) wykazuje dużą dynamikę w glebie podczas okresu wegetacji buraka cukrowego w porównaniu z formą amonową ( $\text{N-NH}_4$ ). Autorzy odnotowali duży spadek ilości formy azotanowej w glebie w czasie okresu wegetacji, co może świadczyć o intensywnym pobieraniu właśnie tej formy azotu przez buraki cukrowe. Dodatkowo w fazie jednego i pięciu liści buraka cukrowego odnotowano wzrost zawartości azotanów w glebie pod wpływem nawożenia dawką  $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Jednocześnie w okresie wegetacji buraków cukrowych zawartość azotanów w roztworze glebowym ulegała dużym wahaniom. Od wiosny ilość azotu rosła wraz ze zwiększaniem nawożenia azotem, gwałtowny spadek jego ilości odnotowano w pełni wegetacji, natomiast najmniejszą ilość azotu odnotowano w czasie zbioru buraków cukrowych.

Burak cukrowy dobrze pobiera również formę amonową azotu ( $\text{NH}_4^+$ ), która może jednak niekorzystnie wpływać na zawartość cukru w korzeniu. Dlatego wiosną oraz do dokarmiania buraków cukrowych, powinno się unikać używania nawozów zawierających amonową formę N, takich jak mocznik czy roztwór saletrzano-mocznikowy (RSM) (Varga i in., 2022) Potwierdzają to badania Brentrup i in. (2001) którzy stwierdził, że wydajność cukru z buraków przy zastosowaniu  $115 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  N w postaci saletry wapniowo-amonowej (CAN) wyniósł  $47,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a plon cukru  $8,49 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , przy tej samej ilości N z mocznika, plon korzeni był niższy i wyniósł  $44,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a plon cukru  $7,31 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Kristek i in. (2011) zwracają także uwagę, że gatunek gleby, a zwłaszcza czas aplikacji azotu, w istotny sposób wpływają na elementy plonu i jakość korzeni buraka cukrowego. Według autorów burak cukrowy preferuje azotanową formę  $\text{N-NO}_3$ , dodatkowo na wskazane parametry lepiej wpływa pogłowne zastosowanie azotu w fazie 3-4 liści na przykład w postaci saletry amonowo - wapniowej zawierającej 27% N.

## 2.2. Formy azotu i ich wpływ na środowisko

Azot w nawozach występuje w trzech formach: azotanowej (saletrzaney –  $\text{N-NO}_3^-$ ), amonowej ( $\text{N-NH}_4^+$ ) i amidowej ( $\text{N-NH}_2$ ). Każda z nich charakteryzuje się innym sposobem działania (Fotyma, 2000; Mercik, 2004; Rutkowska, 2014).

Nawozy azotowe oparte o azot w **formie amonowej**, są sorbowane w glebie, nie ulegając przy tym wymywaniu, dlatego przez dłuższy czas stanowią źródło azotu dla roślin. Nawozy te stosuje się zazwyczaj przedsiewnie. Forma amonowa w glebie ulega procesowi nityfikacji do formy azotanowej. Nawozy zawierające amonową formę azotu zaleca się stosować na glebach ciężkich zarówno jesienią, jak i wczesną wiosną, ze względu na procesy nityfikacji, które w tym czasie przebiegają bardzo powoli lub w ogóle nie zachodzą. Wymienione warunki przyczyniają się do tego by azot amonowy nie został zbyt szybko przekształcony do wymywanej formy azotanowej. Nawozy zawierające amonową formę azotu zaleca się szybko wymieszać z glebą w celu ograniczenia strat azotu poprzez ulatnianie się amoniaku, zwłaszcza na glebach o uregulowanym odczynie (Mercik, 2004; Fotyma, 1996, 2000). Nawozy amonowe przyczyniają się do zakwaszenia gleb, dlatego nie powinno się ich stosować pod uprawy wrażliwe na niskie pH.

Nawozy zawierające azot w **formie azotanowej**, inaczej zwanej saletrzaną są nawozami bardzo szybko działającymi, w glebie nie ulegają sorpcji wymiennej. Zaleca się stosować je pogłównie, ponieważ  $\text{NO}_3^-$  ze względu na swój ujemny ładunek nie jest wiązany w kompleksie sorpcyjnym, dlatego może ulegać wymywaniu (Mercik, 2004; Fotyma, 1996, 2000).

Azot w **formie amidowej** nie jest bezpośrednio dostępny dla roślin. Jest to forma wolno działająca, ponieważ w pierwszej kolejności musi dojść do hydrolizy, która prowadzi do przemiany azotu amidowego w azot amonowy, a następnie podczas procesu nityfikacji do formy azotanowej. Dzięki temu azot udostępniany jest równomiernie, a azotany nie gromadzą się w roślinie i nie podlegają stratom przez wymywanie. W procesie hydrolizy bierze udział enzym ureazy, podczas tego procesu dochodzi do utleniania, a tym samym uwolnienia się cząsteczek azotu do atmosfery. Aby zapobiec temu procesowi coraz częściej stosuje się inhibitory ureazy. Nawozy zawierające formę amidową, na przykład mocznik, można stosować zarówno przedsiewnie, jak i pogłównie. Można go również stosować w formie nalistnego roztworu (Mercik, 2004; Fotyma, 1996, 2000).

### 2.3. Wpływ azotu na środowisko naturalne

Nawożenie jest jednym z najistotniejszych czynników wpływających na plonowanie roślin i żyzność gleb. Niewłaściwe stosowanie nawozów może przyczyniać się do niekorzystnych zmian w środowisku glebowym, wpływając na jej żyzność, a także przyczyniać się do zmian jakości wód gruntowych (Kopiński, 2010; M. Fotyma i in., 2010; Hoffmann i Kluge-Severin, 2011). Do prawidłowego wzrostu i rozwoju rośliny uprawne wymagają wielu składników mineralnych. Za niezbędne dla roślin uznaje się obecnie 17 pierwiastków (Rengel i in., 2022). Pierwsze z nich to oczywiście węgiel, tlen i wodór. Czternaście pozostałych pierwiastków to przede wszystkim składniki mineralne, a sześć z nich to makroskładniki. Wśród makroelementów za główny składnik plonotwórczy uznaje się azot. Jego ilość, która może zostać zakumulowana przez organy roślin podczas sezonu wegetacyjnego istotnie kształtuje i wpływa na wielkość i jakość plonu użytkowego (Rengel i in., 2022). Produkcja roślinna nie tylko w Polsce, ale także w Europie jest ściśle powiązana z dostarczaniem do gleby azotu w formie mineralnej (Rengel i in., 2022; Kasztelan i in., 2021; Sulewski i in., 2020; Mercik, 2004). Stosowanie nawozów azotowych w uprawie roślin pozwala uzyskać o około 30% wyższe plony w porównaniu z obiektami nawożonymi nawozami naturalnymi (Ponti i in., 2012) oraz nawet blisko 50% wyższe w porównaniu do upraw, w których nie stosowano nawozów azotowych (Ladha i in., 2005). Mimo niewątpliwych zalet i zysków ekonomicznych, wynikających ze stosowania nawozów azotowych, nie należy zapominać o ich oddziaływaniu na środowisko naturalne oraz możliwej gorszej jakości wielu produktów rolnych wynikającej z gromadzenia się azotanów oraz kosztach niwelowania skutków nadmiernego nawożenia, zwłaszcza azotowego (Grzebisz, 2011b; Barłóg, 2009; Kurus, 2006; Przeździecki, 1980; Trzebiński, Cieśla, 1979). Dobór odpowiedniej formy nawozu azotowego, skorelowany z odpowiednim terminem jego aplikacji determinuje jego skuteczność działania oraz zmniejsza szybkość wymywania azotanów do wód gruntowych (Rutkowska, 2014). Według Bilir i Saltali (2023) straty azotu w wyniku nadmiernej lub niewłaściwej jego aplikacji mogą sięgać nawet 70%. W Niemczech Ecke i in. (2024) podają, że w przypadku pszenicy i buraków cukrowych największą emisję  $N_2O$  i  $N_2$  stwierdzono we wczesnych fazach wzrostu roślin, gdy pobieranie N i wody z gleby było na niskim poziomie. Nadmierne stosowanie nawozów azotowych może prowadzić także do problemów związanych z jego toksycznością (Głodowska, Galazka, 2018; Rutkowska, 2014; Kokoszka, 2009).

Kluczowa rola azotu w uprawie buraka cukrowego wynika przede wszystkim z faktu, iż roślina ta wytwarza bardzo dużą masę zarówno korzeni jak i liści, co bezpośrednio wiąże się także z wysokim zużyciem nawozów azotowych (Grzebisz, 2002, 2015, 2018, 2020, 2021;

Barlóg i in., 2013; Barlóg i in., 2010; Grzebisz i in., 2010; Barlóg, Grzebisz, 2004; Szczepaniak i in., 2002). Możliwością ograniczenia nadmiernego przedostawania się związków azotu do środowiska w uprawie buraka cukrowego może być zastosowanie uprawy konserwującej, która według autorów Jug i in. (2018) oraz Stoś i in. (2020) mogłoby przynieść korzyści dla środowiska naturalnego, ale również przyczyniłaby się do poprawy żyzności gleby, tym samym mniejszego odpływ azotu do wód gruntowych.

Zbyt wysoki poziom nawożenia azotowego może doprowadzać do nagromadzenia się nadmiernych ilości azotanów nie tylko w roślinach, ale także w glebie. Azotanowa forma azotu, gdy nie zostanie szybko zaabsorbowana przez korzenie roślin, może szybko ulegać wymyciu w głąb gleby, a tym samym przenikać także do wód gruntowych (Melino i in., 2022; Stevanato i in., 2019). Od lat naukowcy wskazują także na fakt, iż kumulowanie się azotanów oraz azotynów w roślinach może skutkować powstawaniem związków rakotwórczych - nitrozoamin. Przedostanie się azotynów do krwioobiegu człowieka, ale także zwierząt powoduje proces redukcji cząsteczek hemoglobiny, wywołując anemię, a także zaburzenia w transportowaniu tlenu w organizmie (Malinowska-Pańczyk, 2015; Majewska i in., 2011).

Dodatkowo nawożenie mineralne, zwłaszcza azotem, może potęgować zakwaszenie gleb wpływając negatywnie na wzrost i rozwój roślin. Używanie nawozów azotowych zawierających formę amonową ( $N-NH_4$ ) i amidową ( $N-NH_2$ ), a zwłaszcza mocznika, który w procesie hydrolizy tworzy także formę amonową zdecydowanie przyczynia się do zakwaszenia gleb (Rutkowska, 2014; Skowrońska, Filipek, 2013). Zbyt wysoka koncentracja azotu mineralnego w glebach przyczynia się także do zahamowania rozwoju pożytecznych drobnoustrojów, które są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania gleby, ale także roślin (Petrović i in., 2023).

Według najnowszych danych przedstawionych przez GUS (2023) najwięcej nawozów azotowych zużywa się w województwach Mazowieckim, Kujawsko-pomorskim i Wielkopolskim. Zużycie nawozów azotowych w Polsce w przeliczeniu na 1 ha wynosi  $69,1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  i z roku na rok ma tendencję wzrostową. Ogólne zużycie nawozów azotowych w przeliczeniu na czysty składnik wynosi 1033 tys. ton, a sprzedaż nawozów azotowych w roku 2022 wynosiła 1 299 740 ton w przeliczeniu na czysty składnik.

Nadmierne stosowanie nawozów azotowych może przyczyniać się do wciąż postępującej degradacji gleb i zubożenia glebowej materii organicznej. W badaniach przeprowadzonych przez Ladha i in. (2011) oceniano wpływ długotrwałego stosowania nawozów azotowych na glebową substancję organiczną. Przeprowadzono blisko 600 obserwacji i udowodniono, że stosowanie mineralnych nawozów azotowych w porównaniu do

obiektów nienawożonych przyczyniło się do spadku węgla organicznego w glebie o 11-16 %. Wskazano również, że w glebach nawożonych mineralnymi formami azotu zdecydowanie zmniejsza się tempo ubytku glebowej materii organicznej. Natomiast zastosowanie obornika przyczyniło się do wzrostu glebowej materii organicznej średnio o 37%.

#### **2.4. Nawożenie buraka azotem a program azotanowy**

Z dniem 08.02.2023 r. weszło w życie Rozporządzenie z dnia 31 stycznia 2023 r. (Dz. U. 2023, poz. 244) w sprawie przyjęcia „Programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu”. Określono terminy, w których można stosować nawozy azotowe. W zależności od rodzaju stosowanego nawozu, lokalizacji i rodzaju gruntu, termin, w którym można stosować nawozy azotowe rozpoczyna się 1 marca, a kończy pomiędzy 15 października, a 30 listopada. Aktualizacja tego programu w roku 2023 wprowadziła możliwość stosowania nawozów azotowych wcześniej, tj. od pierwszego do ostatniego dnia lutego, jeżeli średnia temperatura powietrza będzie wynosić 3°C w przypadku roślin zasianych jesienią, trwałych i wieloletnich upraw oraz trwałych użytków zielonych i 5°C w przypadku pozostałych upraw. Należy jednak wziąć pod uwagę, że podane temperatury dotyczą sytuacji, gdy przez 5 dni następujących po sobie, każdego dnia, średnia dobową temperaturę powietrza powinna przekroczyć 3°C lub gdy przez pięć kolejnych dni, każdego dnia średnia dobową temperaturę powietrza przekroczy 5°C. Dodatkowo program azotowy normuje kwestię warunków przechowywania nawozów naturalnych oraz postępowania z odciekami. Rolnicy zostali również zobowiązani do wykonywania planów nawożenia azotem, corocznie, odrębnie dla każdego pola. Natomiast dla gospodarstw prowadzących chów lub hodowlę zwierząt oraz w gospodarstwach stosujących nawozy naturalne stworzono dodatkowe wytyczne. Stosowanie nawozów naturalnych na poszczególne uprawy należy rozplanować tak, by nie przekroczyć dopuszczalnej dawki azotu pochodzącej z nawozów naturalnych i wynoszącej 170 kg czystego azotu na 1 ha. Najważniejszymi działaniami określonymi w Programie azotowym są zalecenia związane z określeniem dawek stosowanych nawozów azotowych opartych o plany nawożenia azotem albo obliczenia maksymalnych dawek azotu, a dodatkowo ustalono kwestię stosowania nawozów azotowych w pobliżu wód, a także na terenach o dużym nachyleniu oraz na glebach zamarzniętych, zalanych wodą lub przykrytych śniegiem.

#### **2.5. Wpływ azotu na plonowanie i cechy jakościowe buraka cukrowego**

Burak cukrowy potrzebuje znacznych ilości azotu do zbudowania odpowiedniego plonu o pożądanej zawartości sacharozy (Chatterjee i in., 2018; Barłóg i in., 2013; Grzebisz



i in., 2010). Z uwagi na ten fakt, kluczowym jest wybór odpowiedniej, optymalnej dawki azotu, która wpłynie pozytywnie na plonowanie roślin, nie przyczyniając się jednocześnie do obniżenia cech jakościowych - redukcji zawartości sacharozy i wzrostu zawartości melasotworów (Grzebisz, 2019, 2021; Gehl, Boring, 2011; Grzebisz i in., 2010). Nadmierne, ale także niedostateczne nawożenie azotem, może prowadzić do utraty plonu lub pogorszenia jakości korzeni buraka cukrowego (de Souza Braz i in., 2021; Barzegari i in., 2017; Barłóg i in., 2013). Rozważając zapotrzebowanie buraka cukrowego na azot, wielu autorów wskazuje, że burak cukrowy potrzebuje go najwięcej w fazie intensywnego wzrostu liści, co w naszych warunkach występuje najczęściej od początku czerwca, czyli od zwarcia rzędów, do połowy lipca (Grzebisz, 2020). Natomiast najmniejsze zapotrzebowanie na azot w burakach występuje w okresie intensywnej akumulacji cukru w korzeniach, więc dostępność azotu w glebie powinna być niższa, aby zapobiec kumulowaniu się niepożądanych związków azotu, które utrudniają ekstrakcję cukru (Varga, i in., 2022; Alami i in., 2021; Grzebisz, 2019). Zalecenia dotyczące nawożenia azotem dla buraków cukrowych są różne w zależności od przeprowadzonych analiz gleby, jednak wielu autorów Barłóg i in. (2013) oraz Pačuta i in. (2021) i Rašovský i in. (2022) podaje, że buraki wymagają najczęściej od 80 do 120 kg N·ha<sup>-1</sup>.

Badacze Malnou i in. (2006) podają, że burak cukrowy potrzebuje 120 kg N·ha<sup>-1</sup>, aby wykształcić 85% rozet liściowych, dlatego bardzo ważne jest zaopatrzenie rośliny w wystarczającą ilość N, aby rozeta liściowa mogła lepiej wykorzystać energię słoneczną niezbędną do budowania ostatecznego plonu. Badania pokazują, że zbyt późne zastosowanie azotu przyczynia się do redukcji wartości jakościowych buraka, zwłaszcza zawartości cukru (Vargai in., 2021). Problem związany z jakością technologiczną korzeni jest jednym z kluczowych elementów ze względu na plon cukru i wymagania stawiane przez przemysł cukrowniczy. Przy niskim poziomie plonowania buraków cukrowych w Polsce, w porównaniu do innych krajów Europy, wciąż podstawowe znaczenie w ocenie parametrów plonowania buraków cukrowych ma plon korzeni i zawartość w nich sacharozy. Wymogi stawiane przez przemysł cukrowniczy, zwłaszcza po zniesieniu limitów, powodują, iż istotna jest również zawartość związków melasotwórczych - azotu  $\alpha$ -aminowego, kationów potasu i sodu, czyli związków które utrudniają proces pozyskania technologicznego plonu cukru (Tarkalson i in., 2016; Klotz, Finger, 2004). Według Wang i in. (2021) nadmierna ilość azotu w glebie poprawia wzrost wegetatywny buraka cukrowego, ale jednocześnie hamuje transport związków organicznych z organów wegetatywnych do korzenia, w ten sposób wpływając na zmniejszenie się końcowego plonu korzeni, zawartości cukru i jakości buraków. Celem uprawy buraka cukrowego jest więc nie tylko uzyskanie najwyższego plonu korzeni, ale przede wszystkim

dążenie do uzyskania technologicznego plonu cukru na najwyższym poziomie (Michalska-Klimczak, Wyszyński 2010; Jacimovic i in., 2008; Kristek, 2008; Franzen, 2004).

Czynnikiem, który najsilniej wpływa zarówno na plon korzeni, jak i technologiczny plon cukru jest nawożenie azotem, dlatego kluczowe jest by w uprawie buraka cukrowego wybrać nie tylko odpowiedni nawóz azotowy, ale także formę azotu, dawkę i termin jej zastosowania. Według Varga i in. (2021) dawka azotu w uprawie buraków cukrowych ma istotny wpływ na wzrost i ukorzenianie się roślin, a także na plon i jego jakość. Nawożenie azotem w większości gleb Chorwacji wynosi 140–160 kg·ha<sup>-1</sup> N, natomiast w Niemczech i większości krajów Unii Europejskiej zadowalające plony osiąga się przy zastosowaniu dawki 120 kg·ha<sup>-1</sup> N lub nawet mniejszej - 80 kg·ha<sup>-1</sup> N. Nadmierne nawożenie azotem powoduje intensywniejszy rozwój liści, a dojrzewanie korzeni buraka jest wolniejsze. Dodatkowo utrata cukru i zawartość cukru inwertowanego wzrastają głównie ze względu na wyższą zawartość szkodliwych związków azotu w korzeniach (Varga, Lončarić, 2020).

W badaniach przeprowadzonych przez Michalska-Klimczak i Wyszyński (2010) zastosowanie saletry amonowej w dawce 60 kg N·ha<sup>-1</sup> zwiększyło plon korzeni o 11,8 t·ha<sup>-1</sup>, wyższy przyrost plonu korzeni odnotowano jednak przy dawce 120 kg N·ha<sup>-1</sup> o 15,1 t·ha<sup>-1</sup> w porównaniu z roślinami nienawożonymi. Dawka zastosowanego nawozu wpłynęła również na zawartość sacharozy w korzeniach. Zastosowanie dawki 60 kg N·ha<sup>-1</sup>, w porównaniu z roślinami nienawożonymi, pozytywnie wpłynęło na zawartość sacharozy, odnotowano wzrost tego parametru o 0,4 %. Zwiększenie dawki do 120 kg N·ha<sup>-1</sup> przyczyniło się do spadku zawartości sacharozy o 0,5 % w porównaniu z dawką 60 kg N·ha<sup>-1</sup>. W każdym roku prowadzonych badań autorzy zauważyli wzrost zawartości cukru pod wpływem dawki 60 kg N·ha<sup>-1</sup> w porównaniu z roślinami nienawożonymi i jej spadek po zastosowaniu dawki 120 kg N·ha<sup>-1</sup>. Nawożenie azotem przyczyniło się również do zwiększenia zawartości azotu α-aminowego, zwłaszcza zwiększenie dawki z 0 do 60, a następnie do 120 kg N·ha<sup>-1</sup>. Po zastosowaniu dawki 60 kg N·ha<sup>-1</sup> odnotowano przyrost azotu α-aminowego o 15,5% w porównaniu z roślinami nienawożonymi, zastosowanie dawki 120 kg N·ha<sup>-1</sup> także zwiększyło jego zawartość o 23,2% w porównaniu z zastosowaniem dawki 60 kg N·ha<sup>-1</sup>. Dodatkowo odnotowano spadek zawartości kationów sodu i potasu pod wpływem dawki 60 kg N·ha<sup>-1</sup>, w porównaniu z kontrolą, natomiast zastosowanie dawki 120 kg N·ha<sup>-1</sup> przyczyniło się do wzrostu zawartości tych melasotworów. Nawożenie azotem zwiększało także plon cukru przy porównaniu obu dawek nawożenia azotem z kontrolą. Dodatkowo technologiczny plon cukru po zastosowaniu dawki 120 kg N·ha<sup>-1</sup> był zdecydowanie mniejszy w porównaniu do dawki 60 kg N·ha<sup>-1</sup>. Według autorów zastosowanie dawki 120 kg N·ha<sup>-1</sup> pozytywnie wpłynęło

na plon korzeni, lecz obniżało ich jakość technologiczną. Last i in. (1983) zwracają uwagę, że zwiększenie nawożenia azotem powyżej 200 kg N·ha<sup>-1</sup> nie wpływa na zwiększenie plonu cukru, a maksymalny plon cukru w ciągu sześciu lat badań osiągnano po zastosowaniu dawki 125 kg N·ha<sup>-1</sup> lub mniej. W badaniach przeprowadzonych przez Idris i in. (2021) do nawożenia buraków cukrowych użyto mocznika. Stosowano następujące dawki nawożenia azotem - 40, 80 i 120 kg N·ha<sup>-1</sup>. Według badaczy stosowanie azotu ma pozytywny wpływ na zwiększanie średnicy korzeni buraków cukrowych. Zastosowanie dawki 120 kg N·ha<sup>-1</sup> spowodowało wzrost średnicy korzenia w porównaniu do dawki 80 kg N·ha<sup>-1</sup>, które wynosiły odpowiednio 97,96 mm i 91,89 mm, a przy dawce 40 kg N·ha<sup>-1</sup> średnica korzenia była najmniejsza i wynosiła 85,89 mm.

W badaniach Jacimovic i in. (2008) stosując kombinację różnych dawek nawozów NPK w badaniu dwuletnim wykazali, że najwyższy plon korzeni (98,86 t·ha<sup>-1</sup>) i cukru (8,91 t·ha<sup>-1</sup>) osiągnęli nawożąc buraki cukrowe 100 kg·ha<sup>-1</sup> N, 150 kg·ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i 150 kg·ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O. Natomiast w badaniach Crnobarac i Jacimovic (2010) udowodniono, że zwiększenie dawki nawozu azotowego z 50 kg·ha<sup>-1</sup> do 100 kg·ha<sup>-1</sup> N znacząco zwiększyło plon cukru o 4,25%, natomiast dalsze zwiększanie ilości nawozu azotowego do 150 kg·ha<sup>-1</sup> N spowodowało zmniejszenie plonu cukru o 5%. Doświadczenie przeprowadzone przez Stevens i in. (2011) wykazało, że zastosowanie mocznika w dawkach 78, 148 i 212 kg·ha<sup>-1</sup> w uprawie pasowej buraków cukrowych istotnie wpłynęło na plon korzeni oraz zawartość sacharozy. Plon korzeni wzrastał wraz ze wzrostem dawki nawożenia azotem i wynosił odpowiednio: 52,2, 54,9 i 58,9 t·ha<sup>-1</sup>. Zawartość sacharozy malała wraz ze wzrostem dawki nawożenia azotem powodując jednocześnie wzrost ilości melasotworów w korzeniach buraka cukrowego. Autorzy stwierdzili również, że najbardziej optymalną dawką nawożenia azotem, przy której można osiągnąć wysoki plon przy jednocześnie wysokiej zawartości sacharozy i tym samym wysokim wydatku cukru jest dawka 145 kg·ha<sup>-1</sup>. Natomiast w badaniach przeprowadzonych przez Islamgulov i in. (2019) oceniano wpływ nawożenia saletrą amonową w dawkach 40, 80, 120, 160 i 240 kg·ha<sup>-1</sup> na plonowanie oraz zawartość cukru w korzeniach buraka cukrowego. Stwierdzono, iż zwiększanie nawożenia azotem przyczynia się także do intensywniejszego wzrostu liści buraków cukrowych, masa liści wzrastała wraz ze wzrostem dawki nawożenia azotem, a największą dynamikę wzrostu liści obserwowano od pierwszej dekady lipca do drugiej dekady sierpnia. Największą masę liści odnotowano po zastosowaniu dawki 240 kg·ha<sup>-1</sup>, najmniejszą natomiast pod wpływem dawki 40 kg·ha<sup>-1</sup>, tą samą zależność odnotowano także przy plonie korzeni. Zawartość sacharozy była także kształtowana przez dawkę zastosowanego azotu, najniższą zawartością sacharozy na poziomie 16,2% charakteryzowały się rośliny

nawożone dawką  $240 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , natomiast zdecydowanie wyższą zawartość sacharozy na poziomie 17,48% osiągnęły rośliny nawożone dawką  $40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Największy plon korzeni buraka cukrowego odnotowano po zastosowaniu dawki  $240 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  ( $37,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), a najmniejszy po zastosowaniu dawki  $40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  ( $30,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Dodatkowo zwiększanie dawki nawozu azotowego przyczyniło się także do wzrostu zawartości kationów potasu i sodu oraz N- $\alpha$ -aminowego, ograniczających możliwości ekstrakcji cukru z buraków cukrowych. W przeprowadzonym doświadczeniu najbardziej optymalną dawką nawożenia azotem okazała się dawka  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Zastosowanie dawki  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  pozwoliło na osiągnięcie możliwie wysokich plonów przy jednocześnie wysokim technologicznym i biologicznym plonie cukru.

Z literatury przedmiotu wynika, że zwiększanie ilości stosowanego w uprawie buraka cukrowego nawozu azotowego może nieznacznie zwiększyć plon korzeni, ale zmniejszyć zawartość sacharozy. Nawożenie azotem ma bowiem ogromny wpływ na zwiększanie biomasy korzeni, ale zwiększona ilość azotu działa ujemnie na jakość korzeni buraka cukrowego oraz zwiększa ilość szkodliwego azotu w korzeniach buraka cukrowego i zmniejsza zawartość sacharozy podczas zbiorów, dlatego nadal występuje potrzeba dalszych doświadczeń w zakresie nawożenia azotem w uprawie buraków cukrowych (Varga i in., 2024; Varga i in., 2022; Grzebisz, 2021; Pytlarz-Kozicka, 2005; Prośba-Białczyk, 2004).

### 3. Cel i hipotezy badawcze

Głównym celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu dawki oraz formy azotu na plon i jakość technologiczną korzeni buraka cukrowego. W ramach tego celu określono:

- plon świeżej masy korzeni i liści,
- plon suchej masy korzeni,
- zawartość sacharozy oraz melasotworów (azot- $\alpha$ -aminowy, kationy potasu i sodu),
- plon biologiczny i technologiczny cukru.

Badano również dynamikę zmian określonych parametrów w wybranych fazach BBCH:

- cech morfologicznych korzeni buraka cukrowego (długość i szerokość),
- zawartości suchej masy w korzeniach i liściach buraka cukrowego,
- narastania świeżej masy korzeni i liści z pojedynczej rośliny,
- zawartości i akumulacji azotu w korzeniach,
- aktywności reduktazy azotanowej i zawartości barwników fotosyntetycznych.

#### 3.1. Hipotezy badawcze:

1. Wielkość dawki azotu będzie istotnie kształtowała ilość i jakość plonów oraz zawartość melasotworów w korzeniach buraka cukrowego.
2. Założono, że różne formy azotu mogą mieć znaczący wpływ na ilość i jakość plonów buraków cukrowych.
3. Rośliny nawożone formą amidowo-amonową osiągną większy plon korzeni o mniejszej zawartością melasotworów.
4. Optymalną dawką do osiągnięcia najlepszych parametrów jakościowych surowca, niezależnie od formy azotu będzie dawka 120 kg·ha<sup>-1</sup>.

### 4. Metodyka badań

W latach 2015-2017 przeprowadzono doświadczenie polowe w Pawłowicach, w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym, Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu nad wpływem nawożenia azotem na plonowanie oraz jakość technologiczną buraka cukrowego. W doświadczeniu polowym badano efekty działania dwóch zmiennych:

- formy azotu – azotanowo - amonowej (w pracy oznaczona skrótem D-D) oraz amidowo - amonowej (w pracy oznaczona skrótem W-D) oraz
- dawek azotu - 0, 80, 120 i 160 kg·ha<sup>-1</sup>.

Doświadczenie obejmowało 32 poletka, każde o powierzchni 30 m<sup>2</sup>. Rozstaw rzędów wynosił 50 cm, a rozstawa w rzędzie 17-19 cm, obsada wynosiła 80-100 tys. szt. na 1 ha. Między każdym poziomem nawożenia azotowego pozostawiono ścieżkę o szerokości 2 m. Przed siewem buraków wykonano szereg zabiegów uprawowych w celu zapewnienia burakom lepszych warunków wzrostu i rozwoju. W każdym roku wykonano nawożenie przedsięwne potasem w dawce 160 kg·ha<sup>-1</sup> formie soli potasowej oraz fosforem w dawce 100 kg·ha<sup>-1</sup> w formie superfosfatu potrójnego. Siew przeprowadzano w I dekadzie kwietnia siewnikiem punktowym, a przedplonem była pszenica ozima. W doświadczeniu wykorzystano odmianę Tapir (Sesvanderhave), zarejestrowaną w roku 2014 o typie normalno-cukrowym.

### **Nawożenie azotem:**

Azot zastosowano pogłównie w fazie BBCH 12-14, w formie dwóch nawozów:

- saletry amonowej - zawierającej 34% azotu, 17% w formie amonowej (N-NH<sub>4</sub>) i 17% w formie azotanowej (N-NO<sub>3</sub>).
- sulfammo 30 N Process - zawierającego 30% azotu, 25% w formie amidowej (N-NH<sub>2</sub>) i 5% w formie amonowej (N-NH<sub>4</sub>), dodatkowo nawóz ten zawierał 6% S, 5% Ca, 1% Mg.

W czasie wegetacji roślin od czerwca do września przeprowadzano analizy materiału roślinnego. W tym celu pobierano po 2 rośliny z centralnych miejsc obiektów badawczych w celu określenia biometrii korzeni - długość i szerokość (cm), świeżej masy pojedynczego korzenia oraz świeżej masy liści z pojedynczej rośliny (g), a także zawartości suchej masy w liściach i korzeniach (%) – metodą suszarkowo - wagową w temperaturze 90°C przez 4 h.

Terminy pobierania materiału roślinnego według skali BBCH:

- BBCH 25 (faza 15 liści)
- BBCH 31 (początek zakrywania międzyrzędzi, liście pokrywają 10% powierzchni gleby)
- BBCH 35 (liście zakrywają 50% powierzchni gleby)
- BBCH 41 (całkowite zakrycie międzyrzędzi przez liście)
- BBCH 49 (korzeń osiąga wielkość wymaganą do zbioru)

Zbiór buraków przeprowadzano w I dekadzie października w fazie BBCH 49. Zbioru dokonywano metodą dwuetapową wyznaczając z centralnej części każdego obiektu obszar o wielkości 4 m<sup>2</sup>. Na podstawie pobranego materiału obliczano plon korzeni oraz liści. Z każdego obiektu pobierano także po 5 buraków w celu przeprowadzenia analizy jakości technologicznej korzeni buraka na linii Venema w Cukrowni Strzelin, określając zawartość

sacharozy (%) oraz zawartość melasotworów - N- $\alpha$ -aminowy, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> (mmol·kg miazgi<sup>-1</sup>). Zawartość cukru określano polarymetrycznie, zawartość azotu alfa-aminowego określano metodą fotometrii fluorescencyjnej, a zawartość sodu i potasu określano metodą fotometrii płomieniowej.

Na podstawie otrzymanych wyników obliczono biologiczny oraz technologiczny plon cukru:

*Biologiczny plon cukru (t·ha<sup>-1</sup>) = plon korzeni (t·ha<sup>-1</sup>) x zawartość sacharozy w korzeniach (%),*

*Technologiczny plon (t·ha<sup>-1</sup>) = plon korzeni (t·ha<sup>-1</sup>) x (zawartość sacharozy (%) – straty wydajności cukru (%)).*

Wykonano również analizę chemiczną zawartości azotu w korzeniach buraka cukrowego metodą Kiejdahla (Ostrowska i in., 1991). Następnie obliczono akumulację azotu w korzeniach buraka cukrowego według wzoru:

*Akumulacja N w korzeniach (kg·ha<sup>-1</sup>) = plon suchej masy korzeni (dt·ha<sup>-1</sup>) x zawartość N w korzeniach (%)*

W latach 2016 i 2017 dodatkowo wykonano analizy laboratoryjne, które obejmowały aktywność reduktazy azotanowej (NR) oraz zawartość barwników fotosyntetycznych (chlorofil a, chlorofil b, suma chlorofili, zawartość karotenoidów) w liściach buraka cukrowego. Rośliny zbierano z pola między godziną 7 a 8 rano i natychmiast transportowano do laboratorium w celu przeprowadzenia badań. Aktywność NR oraz zawartość barwników określano w najmłodszym w pełni rozwiniętym liściu. Wszystkie badane próbki pochodziły ze środkowej części liścia, z pominięciem nerwu głównego. Aktywność reduktazy azotanowej oznaczono według metody (Jaworski, 1971). Materiał roślinny (1 g) cięto na 5 mm fragmenty i umieszczono w kolbkach ssawkowych zawierających bufor fosforanowy oraz 1% izopropanol, pH 7,5. Próby infiltrowano próżniowo przez 2 minuty, a następnie inkubowano w ciemności w temperaturze 25°C przez 1 godzinę. Ilość wytworzonych jonów azotanowych (III) mierzono spektrofotometrycznie przy długości fali 540 nm po dodaniu 1% sulfanilamidu w 100 mmol dm<sup>-3</sup> HCl i 0,01% N-naftyloetylenodiaminy.

Barwniki fotosyntetyczne ekstrahowano 80% acetonem i oznaczano spektrofotometrycznie. Absorbancje uzyskanych roztworów mierzono dla długości fal 470, 647, 663 nm. Do obliczenia stężenia chlorofili i karotenoidów zastosowano równania Lichtenthaler (1987).

#### **4.1. Statystyczne opracowanie wyników**

Uzyskane wyniki badań poddano analizie wariancji według modelu doświadczenia wielokrotnego (Ulińska, 1959) przeprowadzonego w 3 latach badań z zastosowaniem metody podbloków z dwiema zmiennymi: formami azotu (D-D, W-D) oraz dawkami azotu (0, 80, 120

i 160 kg·ha<sup>-1</sup>). Przed wykonaniem analizy wariancji przeprowadzono test jednorodności wariancji w grupach z wykorzystaniem testu Levene'a oraz testu zgodności zmiennych z rozkładem normalnym Shapiro-Wilka. Istotność różnic między średnimi oceniono za pomocą testu post hoc Tukeya przy poziomie istotności  $p < 0,05$ . Do modelowania związków zachodzących pomiędzy zmienną losową Y (zmienną objaśnianą), a predykatorem X (zmienną objaśniającą) wykorzystano analizę regresji. Przed przystąpieniem do analizy regresji wykonano macierz korelacji dla zmiennych w celu kwantyfikacji zależności pomiędzy wybranymi zmiennymi. Do analiz statystycznych wykorzystano język programowania R (R Core Team, 2024) oraz zintegrowane środowisko programistyczne RStudio IDE (RStudio Team, 2020).

W analizach statystycznych wykorzystano pakiety R: Climate (Czernecki i in., 2020), agricolae (Felipe de Mendiburu i Muhammad Yaseen, 2020) oraz AgroR (Shimizu i in., 2023).

W pracy przedstawiono wyniki analizy wariancji wraz ze wskazaniem istotnych współdziałań. Ze względu na dużą ilość wyników, współdziałania przedstawiono tylko dla najważniejszych parametrów, nie przedstawiano współdziałań, dla których różnice były statystycznie nieistotne.

## **4.2. Lokalizacja i warunki przyrodnicze**

### **4.2.1. Lokalizacja**

Doświadczenie polowe przeprowadzono w Pawłowicach, w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym, Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, położonym około 10 km w kierunku północno-wschodnim od centrum Wrocławia. Obiekty doświadczalne znajdowały się na wysokości około 121 m n.p.m., długości geograficznej wschodniej 17°02', szerokości geograficznej północnej 51°31'.

### **4.2.2. Warunki klimatyczne**

Pawłowice położone są w jednym z cieplejszych rejonów doliny Odry. Prace polowe w tym obszarze można rozpocząć II dekadzie marca i w zależności od przebiegu pogody zakończyć w listopadzie lub na początku grudnia. Sezon wegetacyjny w tym regionie trwa przez około 222–232 dni, przy średniej temperaturze w okresie wegetacji na poziomie 15,0°C, a roczna suma opadów kształtuje się na poziomie 500-600 mm.

Dane meteorologiczne pochodzą ze stacji meteorologicznej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, znajdującej się w Pawłowicach.



Warunki termiczno-wilgotnościowe stanowią jeden z ważniejszych czynników determinujących plon i jego jakość. W pierwszym roku prowadzenia badań najwyższą sumę opadów odnotowano w czerwcu i lipcu, odpowiednio 73,3 mm i 83,1 mm, wartości te były zbliżone do średniej dla wielolecia, dla tych samych miesięcy. Miesiącem z najniższą sumą opadów był sierpień, w porównaniu do średniej z wielolecia wynoszącej 69,2 mm, suma opadów w sierpniu 2015 roku wynosiła zaledwie 4 mm. W przypadku buraka cukrowego jest to okres największych przyrostów i budowania masy.

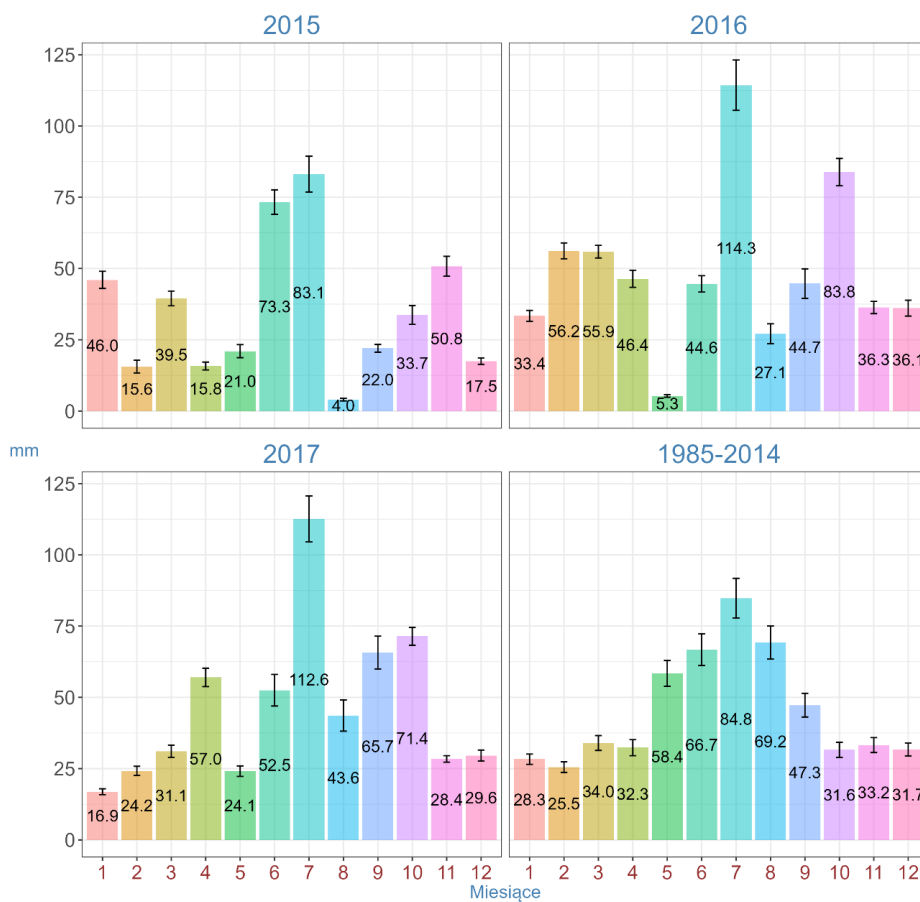
Brak wody w tym okresie może przyczynić się do spadku ilości i jakości plonu. W kwietniu, maju, wrześniu i grudniu odnotowano niższe średnie sumy opadów niż w wieloleciu. We wrześniu odnotowano, aż o 25,3 mm niższą sumę opadów w porównaniu do wielolecia. Zdecydowanie wyższą sumę opadów w odnotowano w listopadzie 2015 (50,8 mm) niż w wieloleciu (33,2 mm). W drugim roku prowadzenia badań najwyższą sumę opadów na poziomie 114,3 mm odnotowano w lipcu oraz październiku (83,8 mm). Najniższa suma opadów wystąpiła w maju (5,3 mm) i była 11-krotnie niższa niż średnia z wielolecia wynosząca 58,4 mm. W styczniu, lutym, marcu i kwietniu odnotowano wyższe sumy opadów niż średnia dla wielolecia dla tych samych miesięcy.

Zdecydowanie niższą sumę opadów odnotowano również w sierpniu na poziomie 27,1 mm, w porównaniu do wielolecia w którym suma ta wynosiła 69,2 mm. W trzecim roku prowadzenia badań najwyższą sumą opadów, w porównaniu do wielolecia, charakteryzował się lipiec – 112,6 mm. Wyższe sumy opadów w porównaniu z wieloleciem odnotowano również w kwietniu, wrześniu i październiku. Najniższą sumę opadów, w porównaniu do maja w wieloleciu (58,4 mm) odnotowano w maju – 24,1 mm (Rys. 1).

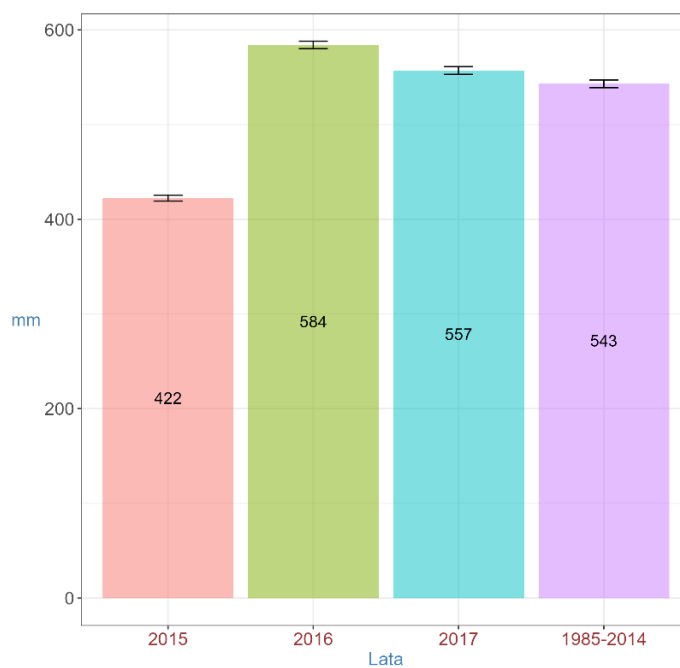
W latach prowadzenia badań 2015-2017 najniższą roczną sumę opadów na poziomie 422 mm odnotowano w roku 2015, w porównaniu do wielolecia (543 mm). W roku 2016 i 2017 odnotowano wyższą sumę opadów odpowiednio o 41 mm i 14 mm w porównaniu ze średnią wieloletnią (Rys. 2).

Suma opadów w miesiącach wegetacji buraka cukrowego kształtowała się na zróżnicowanym poziomie. Najniższą sumą opadów charakteryzował się rok 2015 na poziomie 253 mm, w porównaniu do wielolecia wartość ta była o 137 mm niższa. Rok 2016 i 2017 charakteryzował się natomiast wyższą sumą opadów w porównaniu do wielolecia, w roku 2016 odnotowano sumę opadów na poziomie 366 mm, w 2017 roku 427 mm (Rys. 3).

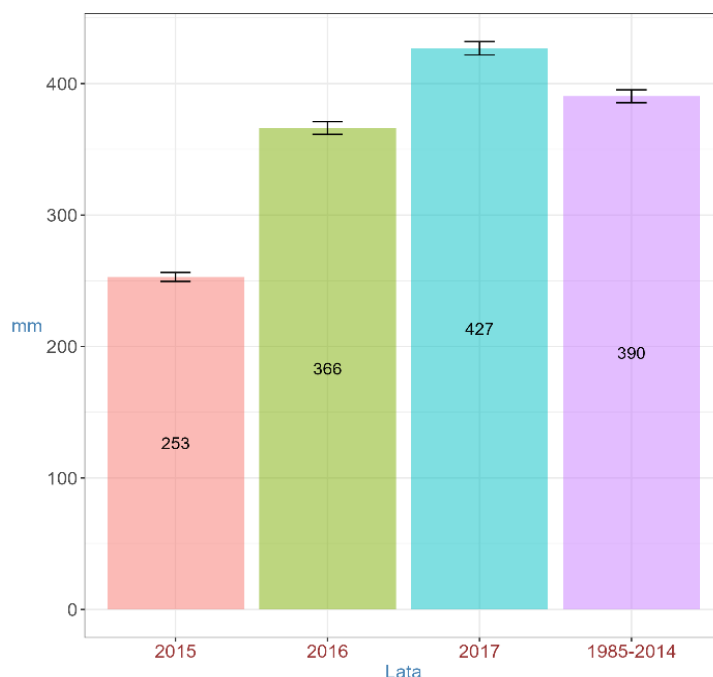
Rysunek 1. Suma miesięcznych opadów w latach badań oraz w wieloleciu



Rysunek 2. Roczna suma opadów w latach prowadzenia badań oraz w wieloleciu



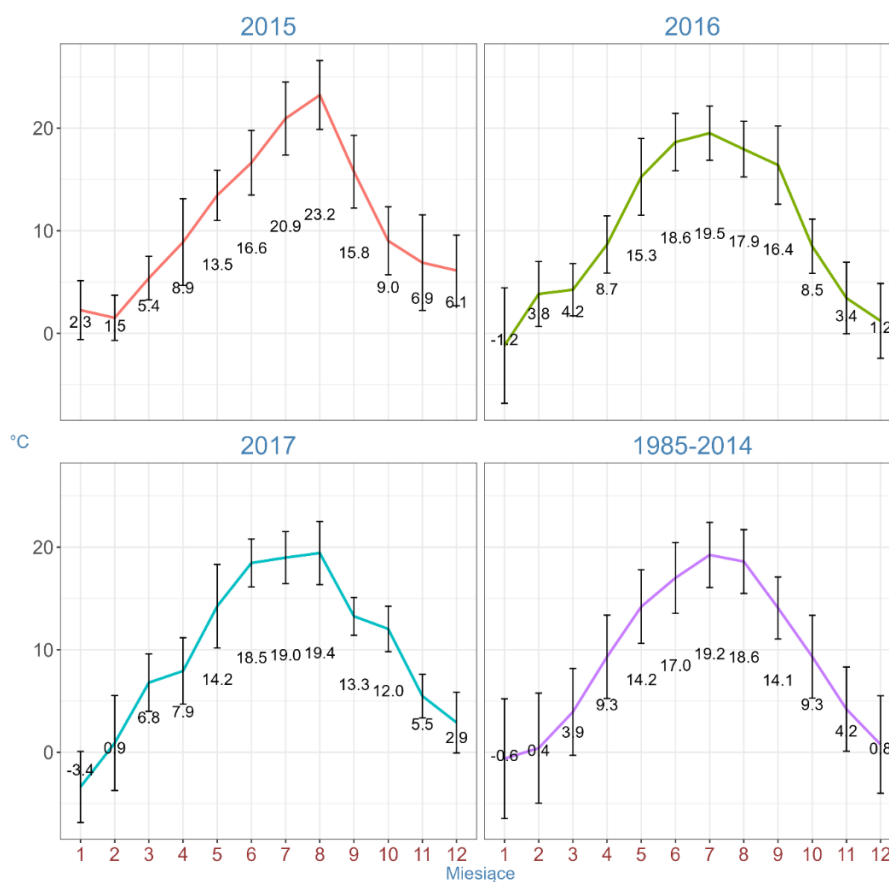
Rysunek 3. Suma opadów w miesiącach wegetacji buraka (IV-X)



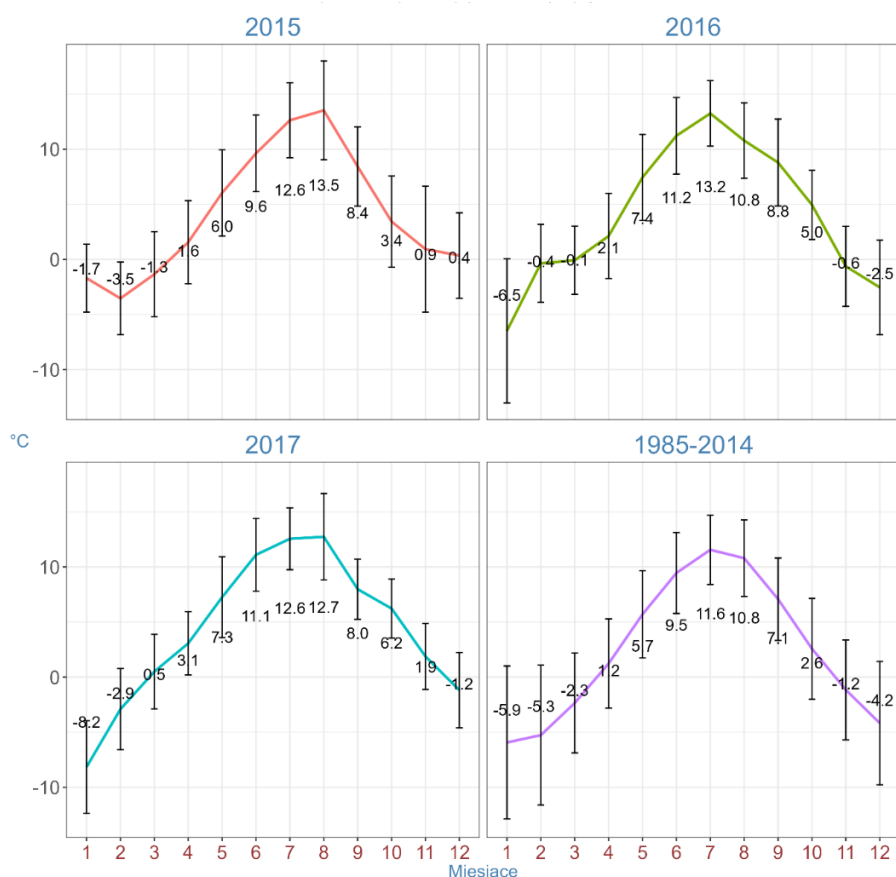
W trakcie wegetacji buraka cukrowego analizowano także temperatury powietrza oraz temperatury powietrza przy gruncie (Rys. 4-5). W roku 2015 najwyższą średnią miesięczną temperaturę powietrza odnotowano w sierpniu - 23,2°C, a także w lipcu - 20,9°C. Temperatury te były wyższe od średniej wieloletniej odpowiednio o 4,6 °C i 1,7°C. W kwietniu, maju i czerwcu średnie temperatury powietrza były niższe od średnich wieloletnich o 0,4-0,7 °C. We wrześniu odnotowano wyższą średnią temperaturę powietrza w porównaniu ze średnią wieloletnią o 1,7°C. Średnia temperatura powietrza w październiku wynosiła 9°C i była niższa od średniej wieloletniej o 0,3°C. W 2016 roku najwyższe temperatury powietrza odnotowano również w sierpniu i lipcu odpowiednio 19,5°C i 18,6°C i były one zbliżone do średnich temperatur powietrza dla wielolecia. W maju i czerwcu średnie temperatury powietrza były wyższe od średniej wieloletniej o 1,1°C i 1,6°C. W kwietniu natomiast odnotowano niższą średnią temperaturę powietrza o 0,6°C w porównaniu z wieloleciem. We wrześniu średnia temperatura powietrza wynosiła 14,1°C i była wyższa o 2,3°C od średniej dla wielolecia. W październiku średnia temperatura powietrza była natomiast niższa o 0,8°C od średniej wieloletniej. Podobnie jak w wieloleciu, w roku 2017 najwyższą średnią temperaturę powietrza odnotowano w sierpniu i lipcu - 19,4°C i 19,0°C. W czerwcu i październiku temperatury powietrza były wyższe o 1,5°C i 2,7°C od średniej wieloletniej. W kwietniu i we wrześniu temperatury powietrza były niższe od średniej wieloletniej odpowiednio o 1,4°C i 0,8°C.

W roku 2015 w kwietniu, maju i czerwcu średnie temperatury przy glebie były wyższe od średniej wieloletniej o 0,4°C, 0,3°C i 0,1°C. Najwyższą temperaturę powietrza przy gruncie odnotowano w lipcu i sierpniu- odpowiednio 12,6°C i 13,5°C i były one wyższe od średniej wieloletniej o 1,0°C i 2,7°C. We wrześniu i październiku temperatury przy gruncie były wyższe od średniej wieloletniej o 1,3°C i 0,8°C. W roku 2016 najwyższe temperatury powietrza przy gruncie na poziomie 13,2°C i 11,2°C odnotowano odpowiednio w lipcu i czerwcu. Kwiecień i maj charakteryzowały się wyższą temperaturą przy glebie w porównaniu do wielolecia o 0,9°C i 1,7°C. We wrześniu i październiku wystąpiły wyższe temperatury powietrza przy gruncie od średnich wieloletnich o 1,7°C i 2,4°C. W sierpniu natomiast odnotowano taką samą temperaturę jak dla średnich z wielolecia. W roku 2017 w kwietniu, maju i czerwcu odnotowano wyższe temperatury powietrza przy gruncie niż dla średniej wieloletniej odpowiednio o 1,9°C dla kwietnia i 1,6°C dla maja i czerwca. Średnia temperatura przy gruncie w sierpniu i lipcu wynosiła 12,6°C i 12,7°C i były wyższe od średnich dla wielolecia. We wrześniu i październiku temperatury przy gruncie były wyższe od średniej wieloletniej o 0,9°C i 3,6°C (Rys. 5).

Rysunek 4. Średnie miesięczne temperatury powietrza na wysokości 2m



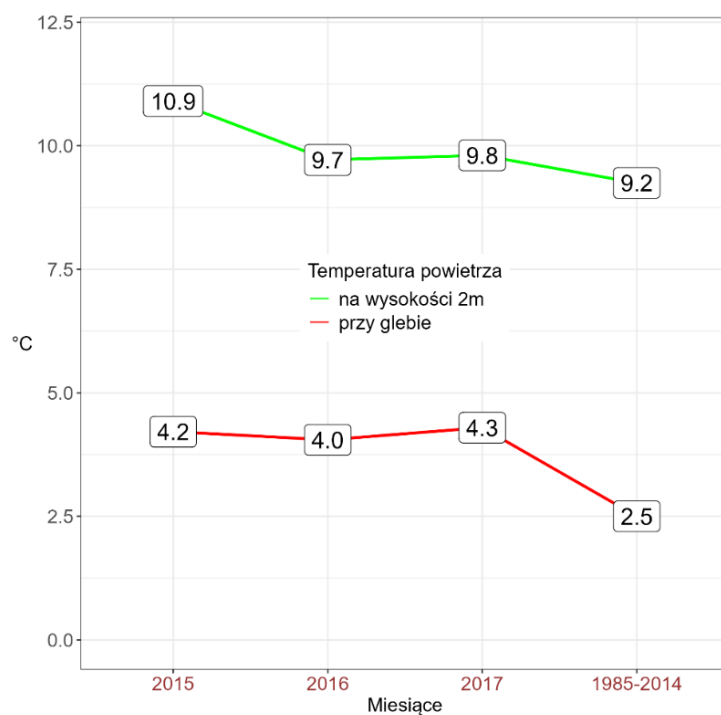
Rysunek 5. Średnie miesięczne temperatury powietrza przy glebie



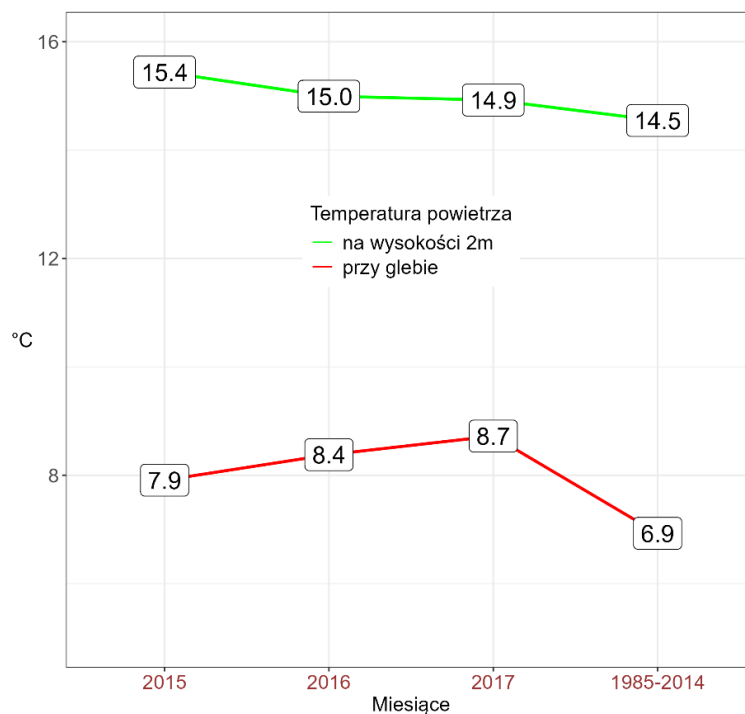
Najwyższą średnią roczną temperaturą powietrza charakteryzował się rok 2015 – 10,9°C, następnie rok 2017 – 9,8°C, kolejno 2016 – 9,7°C, w porównaniu do wielolecia – 9,2°C. Natomiast najwyższą średnią roczną temperaturą przy gruncie charakteryzował się rok 2017 - 4,3°C, następnie rok 2015-4,2°C, najniższą zaś rok 2016 - 4,0°C, jednak były to temperatury wyższe niż średnia dla wielolecia (Rys. 6).

W miesiącach wegetacji buraka cukrowego najwyższą temperaturą powietrza charakteryzował się rok 2015 – 15,4°C, w 2016 i 2017 roku temperatury powietrza były wyższe od średniej dla wielolecia i wynosiły odpowiednio 15,0°C i 14,9°C. Temperatury powietrza przy glebie w miesiącach wegetacji w latach prowadzenia badań były wyższe od średniej dla wielolecia i wynosiły odpowiednio 7,9°C w roku 2015, 8,4°C w roku 2016 i 8,7°C w roku 2017 (Rys.7).

Rysunek 6. Średnie roczne temperatury powietrza w latach badań oraz w wieloleciu



Rysunek 7. Średnie roczne temperatury powietrza w miesiącach wegetacji buraka (IV-X)

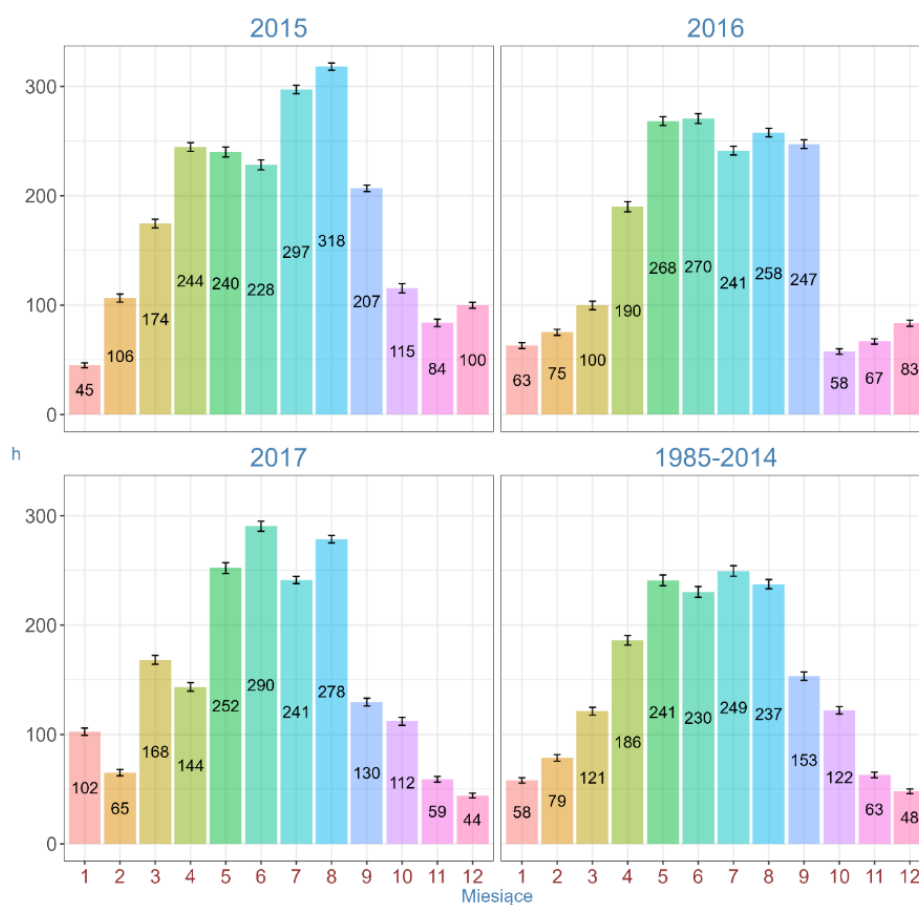


Miesięczna suma godzin nasłonecznienia w latach prowadzenia badań była zróżnicowana (Rys. 8). W roku 2015 najwięcej godzin nasłonecznienia odnotowano w lipcu i sierpniu – 287h i 318h. Od marca do czerwca oraz we wrześniu i październiku liczba godzin nasłonecznienia w roku 2015 była wyższa od średniej dla wielolecia.

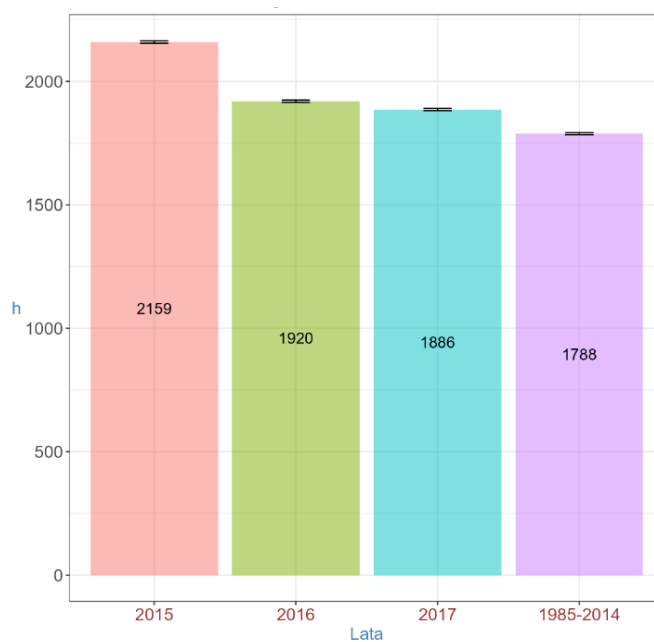
W roku 2016 w kwietniu, maju i czerwcu odnotowano większą ilość godzin nasłonecznienia, niż w tym samym okresie w wieloleciu. W lipcu odnotowano mniejszą ilość godzin nasłonecznienia - 241 h niż w wieloleciu – 249h. W sierpniu i we wrześniu w roku 2016 odnotowano więcej godzin nasłonecznienia - 258h i 247h, niż w przypadku wielolecia – 237h i 153h. W roku 2017, w porównaniu do 2015 i 2016 oraz wielolecia w styczniu odnotowano wysoką ilość godzin nasłonecznienia, aż 102 h.

W lutym i kwietniu 2017 roku odnotowano mniej godzin nasłonecznienia, niż w tych samych miesiącach w wieloleciu. W marcu odnotowano więcej godzin nasłonecznienia w porównaniu do wielolecia o 47h. W maju, czerwcu i sierpniu w roku 2017 było więcej godzin nasłonecznienia niż w wieloleciu. Niewiele mniej godzin nasłonecznienia w porównaniu do wielolecia odnotowano w lipcu. We wrześniu i październiku więcej godzin nasłonecznienia było w wieloleciu – 153h i 122h niż w roku 2017 – 130h i 112h (Rys. 8). Roczna suma godzin nasłonecznienia w latach prowadzenia badań była wyższa od średniej z wielolecia i wynosiła 2159h w roku 2015, 1920h w roku 2016 i 1886h w roku 2017 (Rys. 9).

Rysunek 8. Miesięczna suma godzin nasłonecznienia w latach badań oraz w wieloleciu



Rysunek 9. Roczna suma godzin nasłonecznienia w latach badań





### 4.2.3. Warunki glebowe

Doświadczenie zostało założone na glebie kompleksu pszennego dobrego, klasy bonitacyjnej IIIb. Gleba ta należy do grupy gleb brunatno-ziemnych wytworzonych z gliny lekkiej i średniej, pochodzenia fluwoglacialnego, typu płowego (Drozd i in., 2002). Gleba ta charakteryzuje się dobrymi właściwościami chemiczno-fizycznymi, poziom próchnicy odznacza się dobrą miąższością. Corocznie przed założeniem doświadczenia pobierano próby glebowe do analiz chemicznych, w których oznaczano: pH (metodą potencjometryczną w 1M KCl·dm<sup>-3</sup>), azot mineralny (metodą analizy przepływowej z detekcją spektrofotometryczną), fosfor i potas przyswajalny (metodą Egnera-Riehma), magnez (metodą Schachtschabela). W latach prowadzenia badań odczyn gleby był lekko kwaśny, zasobność gleby w fosfor była bardzo wysoka, a w potas i magnez wysoka (Tab. 1). Zawartość azotu mineralnego (N<sub>min</sub>) w glebie, w kolejnych sezonach wegetacyjnych (2015, 2016 i 2017) wynosiła odpowiednio 64, 70 oraz 77 kg·ha<sup>-1</sup>.

Tabela 1. pH oraz zawartość C i P, K i Mg w glebie przed rozpoczęciem doświadczenia

Termin poboru prób	pH w KCl	Corg.	Zawartość form przyswajalnych (mg·100g gleby <sup>-1</sup> )		
			Fosfor	Potas	Magnez
			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Mg
2015	6,1	0,87	19,2	17,9	8,62
2016	5,9	0,95	17,9	18,9	6,87
2017	6,0	1,01	15,2	19,6	6,41

### 4.3. Agrotechnika

Tabela 2 przedstawia zabiegi agrotechniczne wykonane na polach doświadczalnych. Siewu buraków cukrowych dokonywano corocznie w I dekadzie kwietnia, a zbioru w III dekadzie października. Przedplonem była pszenica ozima. Ochronę plantacji wykonano zgodnie z zasadami integrowanej ochrony roślin. Wszystkie zabiegi zostały przeprowadzone na podstawie wykonanych lustracji polowych, a zabieg chemiczny wykonywany był w momencie przekroczenia progu ekonomicznej szkodliwości agrofagów. Ze względu na szeroką rozstawę międzyrzędzi największym problemem w ochronie plantacji, stanowiła ochrona herbicydowa, z uwagi na ten fakt wykonywano 3 zabiegi herbicydowe tuż na początku sezonu wegetacyjnego buraka cukrowego. Ochrona fungicydowa buraka cukrowego była skierowana przede wszystkim przeciw chwościkowi buraka (*Cercosora beticola*). Nie wykonywano zabiegów insektycydowych, gdyż w żadnym roku nie zostały przekroczone progi ekonomicznej szkodliwości.

Tabela 2. Zabiegi agrotechniczne i terminy ich wykonania w latach badań

<b>Zabieg uprawowy</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
zbiór przedplonu - pszenica ozima	10.08.2014	04.08.2015	5.08.2016
zespół uprawek późniwnych	12.08.2014	05.08.2015	08.08.2016
orka	19.08.2014	17.08.2015	23.09.2016
włókwowanie	24.03.2015	23.03.2016	24.03.2017
kultywatorowanie i wałowanie	09.04.2016	08.04.2016	10.04.2017
nawożenie PK	10.04.2015	11.04.2016	11.04.2017
zespół uprawek przedsięwnych	10.04.2015	11.04.2016	11.04.2017
siew doświadczenia	10.04.2015	11.04.2016	11.04.2017
zabieg herbicydowy BetanalMaxxPro 209 OD 1,25 l·ha <sup>-1</sup> + Goltix 700 SC 1 l·ha <sup>-1</sup>	24.04.2015	21.04.2016	24.04.2017
nawożenie pogłówne azotem	07.05.2015	09.05.2016	08.05.2017
zabieg herbicydowy BetanalMaxxPro 209 OD 1,25 l·ha <sup>-1</sup> + Goltix 700 SC 1 l·ha <sup>-1</sup>	08.05.2015	10.05.2016	9.05.2017
zabieg herbicydowy BetanalMaxxPro 209 OD 1,25 l·ha <sup>-1</sup> + Goltix 700 SC 1 l·ha <sup>-1</sup>	22.05.2015	20.05.2016	23.05.2017
zabieg fungicydowy przeciwko chwościkowi buraka Duet t Ultra 497 SC w dawce 0,6 l·ha <sup>-1</sup>	24.07.2015	27.07.2016	25.07.2017
dwuetapowy zbiór buraków	19-20.10.2015	18-19.10.2016	16-17.10.2017

## 5. Wyniki i dyskusja

### 5.1. Plon świeżej masy korzeni buraka cukrowego

W tabeli 3 przedstawiono analizę wariancji dla plonu korzeni. Stwierdzono istotność oddziaływania zarówno badanych zmiennych jak i ich współdziałania w latach badań.

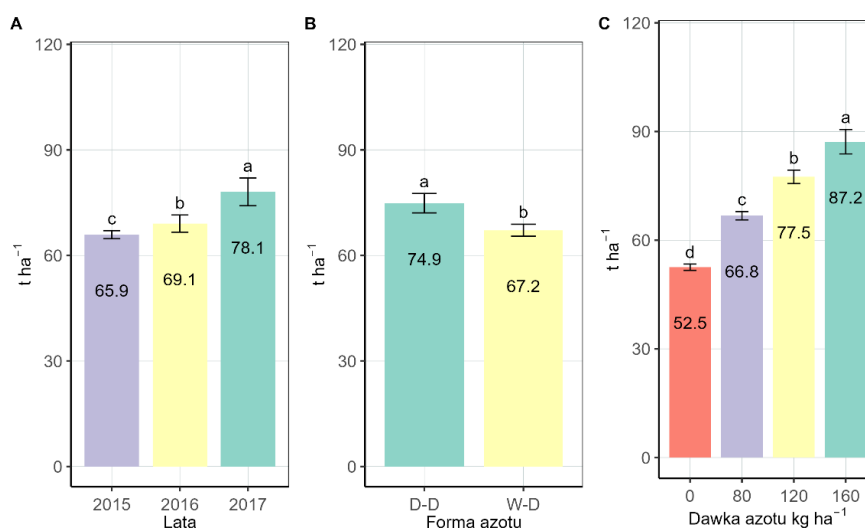
Tabela 3. Analiza wariancji dla plonu korzeni buraka cukrowego

Analiza wariancji	Stopnie swobody	Sumy kwadratów odchyłeń	Średnie kwadraty odchyłeń	Statystyka testowa F	Pr (F)	Istotność
Bloki	3	24,7	8,2	1,12	0,35004	
Forma azotu	1	1422,2	1422,2	113	0,00178	**
Nieściskość (błąd) I	3	37,8	12,6			
Dawka azotu	3	15927,4	5309,1	1127	0,00000	***
Forma azotu x Dawka azotu	3	727,2	242,4	51,5	0,00000	***
Nieściskość (błąd) II	18	84,8	4,7			
Lata	2	2547,8	1273,9	173	0,00000	***
Lata x Forma azotu	2	512,3	256,2	34,8	0,00000	***
Lata x Dawka azotu	6	3338,6	556,4	75,6	0,00000	***
Lata x Forma azotu x Dawka azotu	6	266,4	44,4	6,03	0,00009	***
Nieściskość (błąd) III	48	353,3	7,4			

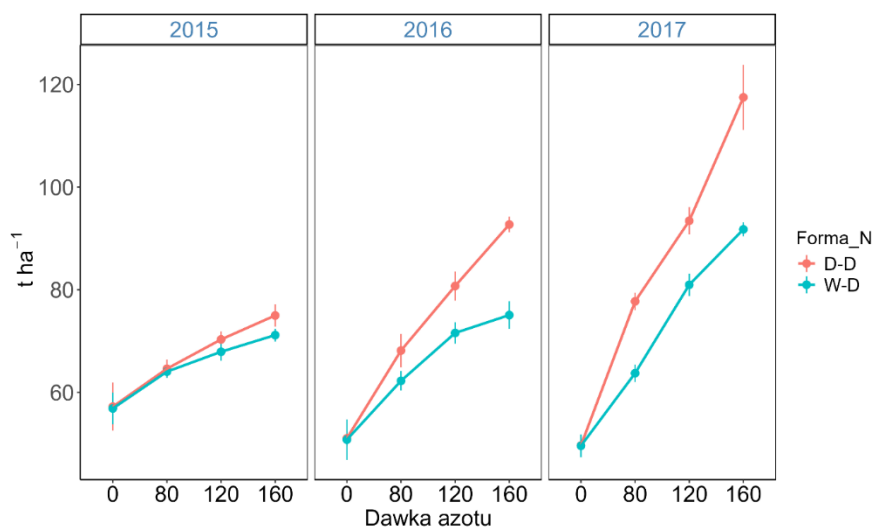
Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05

Efekty czynników głównych (forma i dawka azotu oraz lata) wpływających na plon korzeni buraka cukrowego przedstawiono na rysunkach 10 i 11.

Rysunek 10. Plon korzeni w zależności od roku badań, formy oraz dawki N



Rysunek 11. Graficzne przedstawienie wpływu badanych czynników na plon korzeni



W badaniach własnych największy wpływ na plonowanie buraka cukrowego miały warunki pogodowe w latach badań, a także nawożenie azotem. Podobną zależność uzyskali Freckleton i in. (1999) wskazując, że w klimacie umiarkowanym istotnym czynnikiem wpływającym na plony buraków cukrowych jest ilość opadów w sezonie wegetacyjnym oraz nawożenie azotem. Także według Kristek i in. (2008) oraz Barłóg i in. (2010, 2013) wykorzystanie potencjału plonotwórczego buraków cukrowych było uzależnione, od współdziałania dwóch kluczowych czynników, czyli warunków pogodowych oraz zrównoważonego nawożenia mineralnego, głównie azotem. Według Potarzyckiego i Lewickiej (2002) najważniejszym czynnikiem kształtującym plon buraków cukrowych są warunki pogodowe panujące w okresie wegetacji buraków. W badaniach Varga i in. (2024) najwyższy plon korzeni buraka cukrowego uzyskano stosując azot przedsiewnie i pogłównie ( $105,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), w roku z większymi opadami deszczu, natomiast najniższy plon korzeni ( $39,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) uzyskano w roku suchym.

W badaniach własnych stwierdzono, że plony korzeni różniły się istotnie w latach prowadzenia badań, najmniejszy średni plon ( $65,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) uzyskano w pierwszym roku prowadzenia badań. W kolejnych latach, plon korzeni był na poziomie  $69,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  w roku 2016, a w roku 2017 wynosił  $78,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Rys. 10-A). Na plon korzeni wpływ miała również forma zastosowanego azotu, większy plon korzeni na poziomie  $74,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  odnotowano po zastosowaniu formy azotanowo - amonowej (D-D), w porównaniu do formy amidowo - amonowej (W-D), plon korzeni był większy o  $7,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Rys. 10-B). Ismail (2005) wskazuje, że zwiększanie dawki nawożenia azotem istotnie wpływa na przyrost plonu korzeni, jednak

w badaniach tych nie wykazano wpływu zastosowanych nawozów – saletry amonowej i mocznika na plon korzeni.

Plon korzeni w badaniach własnych był również istotnie modyfikowany pod wpływem dawek azotu (Rys.10-C). Wszystkie zastosowane dawki azotu istotnie zwiększały plon korzeni w stosunku do obiektu kontrolnego. Plon korzeni wzrastał wraz ze zwiększaniem nawożenia azotem, w porównaniu do obiektu kontrolnego większy plon korzeni o 14,3 t·ha<sup>-1</sup> odnotowano dla dawki 80 kg·ha<sup>-1</sup>, następnie o 25 t·ha<sup>-1</sup> dla dawki 120 kg·ha<sup>-1</sup> i o 34,7 t·ha<sup>-1</sup> dla dawki 160 kg·ha<sup>-1</sup>. Podobne wyniki otrzymali również (Varga i in., 2024; Pulkrábek i in., 2021; Varga i in., 202; Żarski i in., 2020; Ali Abdallah Ali Mekdad i Shaaban, 2020; Afshar i in., 2019; Märlander, 1990). W badaniach Malnou i in. (2006) pod wpływem zastosowania saletry amonowej w dawce 160 kg·ha<sup>-1</sup> plon korzeni był najwyższy i wyniósł 71,5 kg·ha<sup>-1</sup>. Pogłodziński i in. (2021) wskazują, iż plon korzeni jest istotnie modyfikowany pod wpływem warunków pogodowych oraz dawki azotu (0, 40, 80, 120, 160 i 200 kg·ha<sup>-1</sup>) w doświadczeniu z użyciem saletry amonowej zastosowanej w dawkach dzielonych przedsięwzię i pogłównie. W badaniu tym w roku 2015 i 2016 plon korzeni wzrastał wraz ze wzrostem dawki nawożenia azotem, jednak dla roku 2015 różnica była statystycznie nieistotna.

Także w badaniach Hasanen i in. (2013) zastosowanie saletry amonowej w dawkach 150, 250 i 350 kg·ha<sup>-1</sup> przyczyniło się do wzrostu plonu korzeni, a najwyższy plon uzyskano pod wpływem dawki 350 kg·ha<sup>-1</sup>. W badaniach przeprowadzonych przez Leilah i Khan (2021) zwiększanie dawek nawożenia azotem (165, 220 i 275 kg·ha<sup>-1</sup>) w formie mocznika przyczyniło się do wzrostu plonu korzeni buraków cukrowych. Na wzrost plonu korzeni pod wpływem nawożenia wskazuje także Sinicki (2016) gdzie zastosowano następujące dawki nawożenia azotem: 0, 60, 120, 180, 240 i 300 kg·ha<sup>-1</sup>. Największy plon korzeni odnotowano pod wpływem dawki 300 kg·ha<sup>-1</sup> – 93 t·ha<sup>-1</sup>. Również w badaniach Barzegari i in. (2017) zastosowanie dawek nawożenia azotem 0, 80, 160 i 240 kg·ha<sup>-1</sup> łącznie z nawadnianiem wpłynęło korzystnie na plon korzeni buraka cukrowego, który wzrastał wraz ze wzrostem dawki azotu, lecz zastosowanie najwyższej dawki – 240 kg·ha<sup>-1</sup> nie miało statystycznie udowodnionego wpływu na zwiększenie plonu korzeni, a więc najbardziej optymalną dawką okazała się dawka 160 kg·ha<sup>-1</sup>. W badaniach przeprowadzonych przez Chatterjee i in. (2018) w latach 2015-2016 najwyższy plon korzeni odnotowano pod wpływem dawki 146 kg·ha<sup>-1</sup> w roku 2015, a w roku 2016 pod wpływem dawki 112 kg·ha<sup>-1</sup>, dalsze zwiększanie dawek azotu do 179 kg·ha<sup>-1</sup> i 213 kg·ha<sup>-1</sup> przyczyniało się natomiast do spadku plonu korzeni, ale tylko w roku 2016.

Także w badaniach Azzazy (2004) przy zwiększaniu dawki nawożenia azotem z 60 kg·ha<sup>-1</sup> do 75 kg·ha<sup>-1</sup> i 90 kg·ha<sup>-1</sup> odnotowano istotny wzrost plonu korzeni, a największy plon

odnotowano przy najwyższej dawce azotu. Według badań przeprowadzonych przez Tsialtas i Maslaris (2005) w warunkach śródziemnomorskich Grecji, najwyższe plony korzeni uzyskuje się pod wpływem nawożenia azotem nie przekraczającym dawki  $200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . W badaniach przeprowadzonych przez Islamgulov i in. (2019) zastosowano nawożenie azotem w dawkach 40, 80, 120, 160 i  $240 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Plon korzeni wzrastał wraz ze wzrostem dawki nawożenia azotem, najmniejszy był przy dawce  $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , a najwyższy przy dawce  $240 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Badania przeprowadzone przez Nemeat Alla i in. (2002) wskazują, iż zastosowanie dawek 40, 65 i  $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  przyczyniło się do wzrostu plonu korzeni, a najwyższe wartości odnotowano pod wpływem dawki  $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , podobne tendencje odnotowali również Sarhan i in. (2012) i Mahmoud i in. (2012).

Inną tendencję odnotował natomiast Borówczak i in. (2006). W badaniach autorzy wskazują, iż plony korzeni wzrastały w miarę zwiększania dawki azotu do  $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  i wyniosły  $61,02 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Wzrost plonu na tej dawce, w porównaniu do kontroli, wyniósł  $4,26 \text{ t/ha}$ . Natomiast zwiększanie dawek azotu do 100 i  $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  nie wpłynęło korzystnie na przyrost plonu korzeni w porównaniu do dawki  $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

W badaniach przeprowadzonych przez Pytlarz-Kozicka (2005) natomiast zwiększenie dawki azotu z  $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  na  $180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  również nie zwiększyło plonu korzeni buraka cukrowego. W badaniach przeprowadzonych przez Su i in. (2024) zwiększenie nawożenia azotem ze  $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  na  $225 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  także nie wpłynęło na wzrost plonu korzeni, wskazując, iż nadmierne stosowanie azotu nie ma uzasadnienia zarówno w kontekście przyrodniczym jak i ekonomicznym.

W badaniach własnych współdziałanie badanych czynników w latach badań przedstawiono na rysunkach 11-14. Plon korzeni był istotnie modyfikowany pod wpływem współdziałania dawki i formy nawozu w każdym roku prowadzenia badań (Rys. 12-14).

W latach 2015-2017, niezależnie od zastosowanej formy azotu, plon korzeni istotnie zwiększał się wraz ze wzrostem dawki azotu w porównaniu do obiektu nienawożonego. Istotnie wyższe przyrosty plonu korzeni odnotowano po zastosowaniu formy D-D.

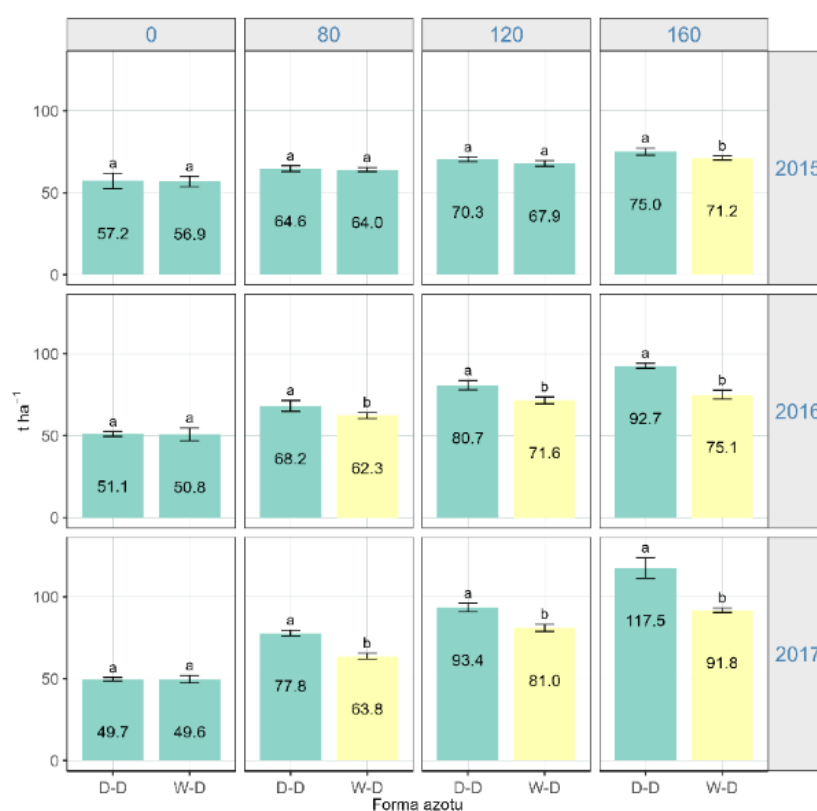
W roku 2015 nie odnotowano istotnych różnic pomiędzy zastosowanymi formami azotu (D-D i W-D) w dawkach 0, 80 i  $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Plon korzeni był natomiast istotnie wyższy pod wpływem formy D-D w dawce  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , różnica między obiema formami azotu wynosiła  $3,8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

W roku 2016 nie odnotowano istotnych różnic we współdziałaniu formy i dawki azotu, jedynie dla obiektu kontrolnego, pozostałe współdziałania były istotne. Dla dawek 80, 120

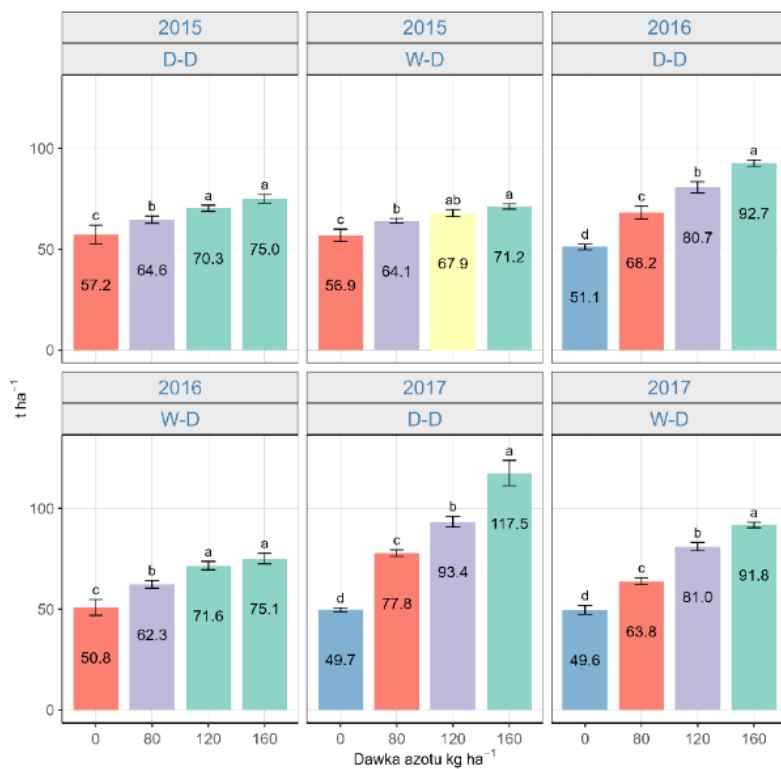
i  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , większe przyrosty plonu korzeni odnotowano po zastosowaniu formy D-D w porównaniu do formy W-D, odpowiednio o  $5,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ,  $9,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  i  $17,6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

W roku 2017 wykazano istotność współdziałania formy azotu i dawek 80, 120 i  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , nie wykazano istotności dla obiektu kontrolnego. Podobnie jak w poprzednim roku większe przyrosty plonu korzeni odnotowano pod wpływem formy D-D w porównaniu do formy W-D, pod wpływem dawki  $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  o  $14 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , pod wpływem dawki  $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  o  $12,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  i pod wpływem dawki  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  o  $25,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

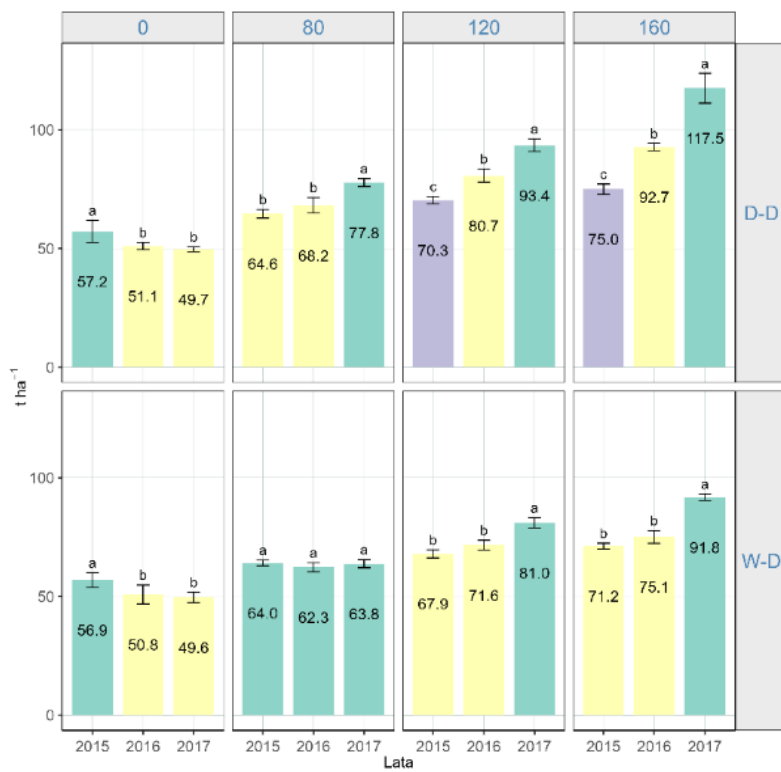
Rysunek 12. Wpływ współdziałania formy i dawki azotu na plon korzeni buraka



Rysunek 13. Wpływ współdziałania dawki i formy N w latach badań na plon korzeni



Rysunek 14. Wpływ współdziałania lat i dawki azotu na plon korzeni





## 5.2. Plon suchej masy korzeni buraka cukrowego

W badaniach własnych oceniano również plon suchej masy korzeni buraka cukrowego w trakcie zbioru (BBCH 49). W tabeli 4 przedstawiono analizę wariancji dla plonu suchej masy korzeni, na którą istotny wpływ miały wszystkie badane czynniki doświadczenia.

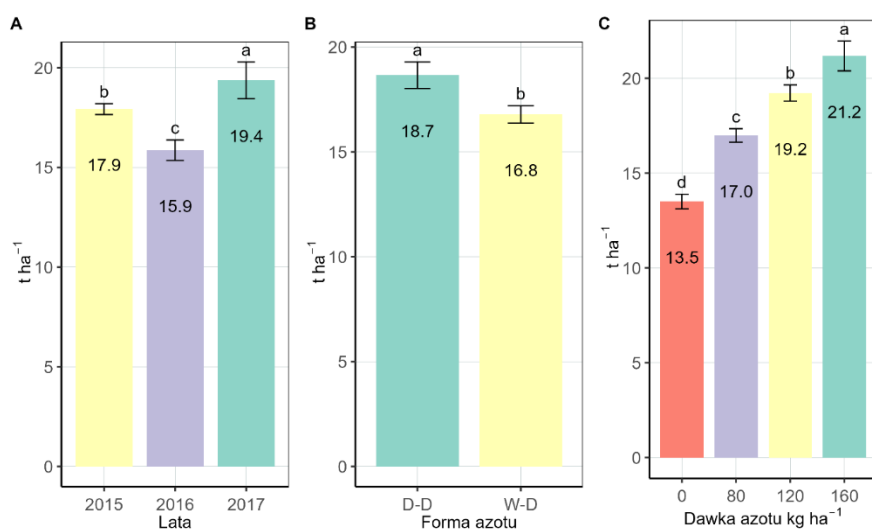
Tabela 4. Analiza wariancji dla plonu suchej masy korzeni

Analiza wariancji (rodzaje zmienności)	Stopnie swobody	Sumy kwadratów odchyleń	Średnie kwadraty odchyleń	Statystyka testowa F	Pr (F)	Istotność
Bloki	3	0.3	0.1	0.16	0.92158	
Forma azotu	1	83.7	83.7	123	0.00156	**
Nieściskość (błąd) I	3	2.0	0.7			
Dawka azotu	3	781.5	260.5	782	0.00000	***
Forma azotu x Dawka azotu	3	46.4	15.5	46.5	0.00000	***
Nieściskość (błąd) II	18	6.0	0.3			
Lata	2	199.2	99.6	168	0.00000	***
Lata x Forma azotu	2	28.2	14.1	23.9	0.00000	***
Lata x Dawka azotu	6	182.4	30.4	51.4	0.00000	***
Lata x Forma azotu x Dawka azotu	6	17.7	2.9	4.98	0.00049	***
Nieściskość (błąd) III	48	28.4	0.6			

Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05

Plon suchej masy korzeni buraków cukrowych był istotnie modyfikowany pod wpływem warunków pogodowych w latach prowadzenia badań (Rys. 15-A). Najkorzystniejszym rokiem dla gromadzenia plonu suchej masy korzeni okazał się rok 2017 – 19,4 t·ha<sup>-1</sup>, najmniej korzystny natomiast roku 2016 – 15,9 t·ha<sup>-1</sup>. Większy plon suchej masy korzeni buraka cukrowego odnotowano po zastosowaniu formy D-D o 1,9 t·ha<sup>-1</sup>, w porównaniu do formy W-D (Rys. 15-B). Największy plon suchej masy korzeni na poziomie 21,2 t·ha<sup>-1</sup> odnotowano po zastosowaniu dawki 160 kg·ha<sup>-1</sup>, najmniejszy natomiast dla kontroli (Rys. 15-C). W badaniach przeprowadzonych przez Pytlarz-Kozicką (2005) plon suchej masy korzeni także zwiększał się wraz ze wzrostem dawki azotu z 90 kg·ha<sup>-1</sup> na 180 kg·ha<sup>-1</sup>.

Rysunek 15. Plon suchej masy korzeni w zależności od lat badań, formy oraz dawki N



### 5.3. Plon liści buraka cukrowego

W tabeli 5 przedstawiono analizę wariancji dla plonu liści. Stwierdzono istotność oddziaływania zarówno badanych zmiennych jak i ich współdziałania w latach prowadzenia badań.

Tabela 5. Analiza wariancji dla plonów liści buraka cukrowego

Analiza wariancji	Stopnie swobody	Sumy kwadratów odchyień	Średnie kwadraty odchyień	Statystyka testowa F	Pr (F)	Istotność
Bloki	3	15,0	5,0	1,45	0,23861	
Forma azotu	1	7,2	7,2	5	0,1068	r.n.
Nieściskość (błąd) I	3	4,1	1,4			
Dawka azotu	3	3123,6	1041,2	497	0,00000	***
Forma azotu x Dawka azotu	3	7,3	2,4	1,2	0,35113	r.n.
Nieściskość (błąd) II	18	37,7	2,1			
Lata	2	1133,2	566,6	164	0,00000	***
Lata x Forma azotu	2	125,8	62,9	18,3	0,00000	***
Lata x Dawka azotu	6	214,5	35,8	10,4	0,00000	***
Lata x Forma azotu x Dawka azotu	6	17,6	2,9	0,85	0,53850	r.n.
Nieściskość (błąd) III	48	165,4	3,4			

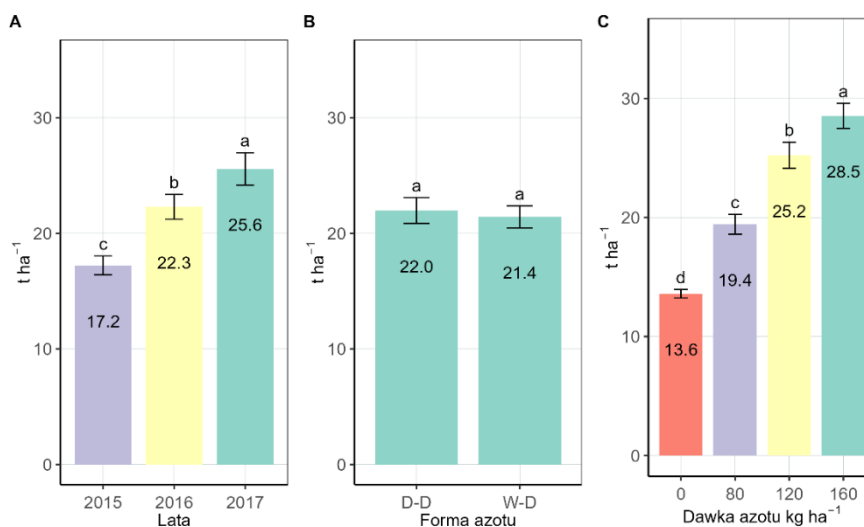
Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05

Warunki pogodowe w latach badań oraz wielkość dawki azotu istotnie wpływały na plon liści (Rys. 16–A). Najkorzystniejsze warunki klimatyczne dla plonu liści odnotowano w roku 2017, najmniej korzystne natomiast w roku 2015. Podobną zależność w swoich badaniach zaobserwowali również Szmigiel i in. (2014) w uprawie buraka pastewnego.

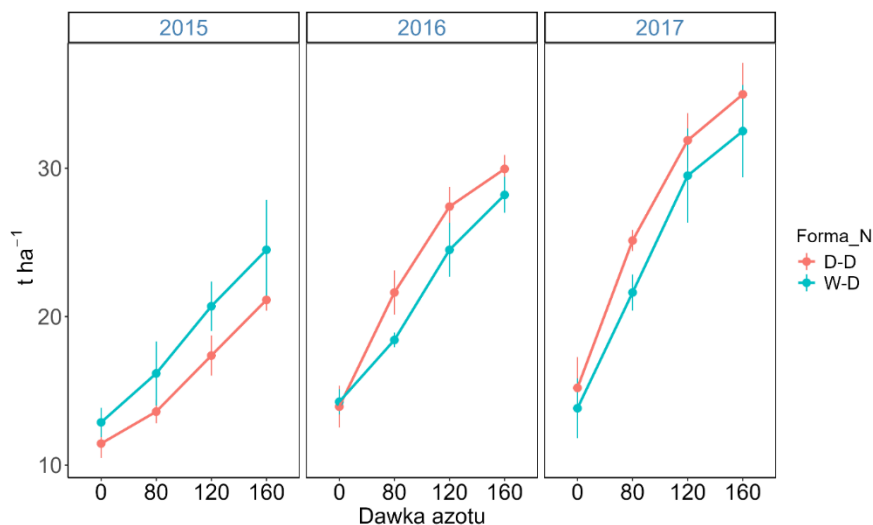
W badaniach własnych forma zastosowanego azotu nie miała wpływu na plon liści (Rys. 16-B). Wzrastające dawki azotu przyczyniły się natomiast do zwiększenia plonu liści zarówno w porównaniu do obiektu kontrolnego, jak i poszczególnych dawek względem siebie. Na plon liści najkorzystniej oddziaływała dawka 160 kg·ha<sup>-1</sup>, pod wpływem której plon liści był większy o 14,9 t·ha<sup>-1</sup> w porównaniu do obiektu kontrolnego, o 9,1 t·ha<sup>-1</sup> w porównaniu do dawki 80 kg·ha<sup>-1</sup> i o 3,3 t·ha<sup>-1</sup> w porównaniu do dawki 120 kg·ha<sup>-1</sup> (Rys. 16-C).

W badaniach przeprowadzonych przez Pytlarz-Kozicką (2005) zwiększenie dawki azotu z 90 kg·ha<sup>-1</sup> na 180 kg·ha<sup>-1</sup> zwiększyło plon liści z 47,0 t·ha<sup>-1</sup> na 53,5 t·ha<sup>-1</sup>. Podobną zależność w swoich doświadczeniach odnotowali również Domska i in. (2006). Także w badaniach Zimny i in. (2000) zwiększanie dawek nawożenia azotem ze 100 kg·ha<sup>-1</sup> do 140 kg·ha<sup>-1</sup> i 180 kg·ha<sup>-1</sup> przyczyniło się do znacznego wzrostu plonu liści buraka cukrowego. W badaniach Szmigiel i in. (2014) w uprawie buraka pastewnego wzrastające dawki azotu (0, 80, 120 i 160 kg·ha<sup>-1</sup>) również przyczynił się do wzrostu plonu liści, największy plon odnotowano pod wpływem dawki 120 kg·ha<sup>-1</sup>, nieznacznie mniejszy pod wpływem dawki 160 kg·ha<sup>-1</sup>, pomiędzy tymi dawkami nie było jednak różnicy statystycznej.

Rysunek 16. Plon liści w zależności od lat badań, formy oraz dawki azotu



Rysunek 17. Graficzne przedstawienie wpływu badanych czynników na plon liści



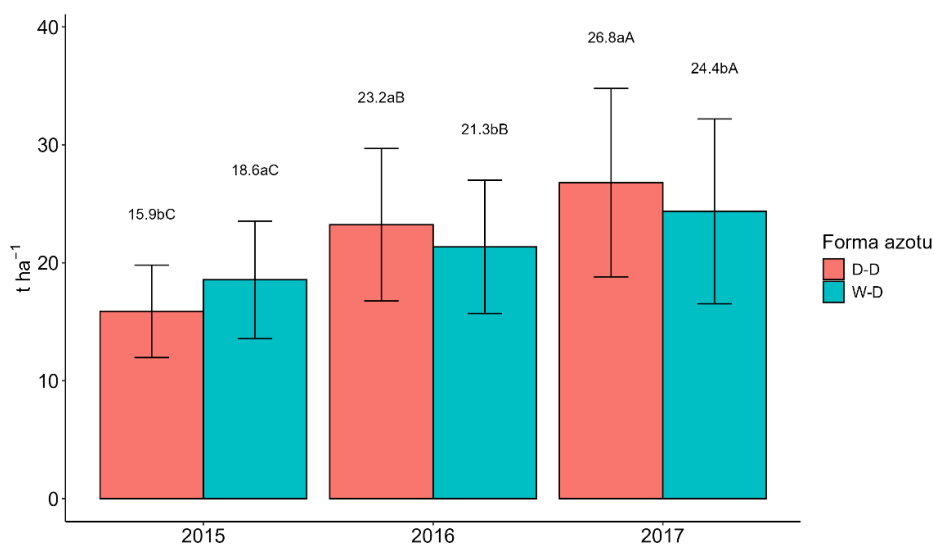
W wyniku przeprowadzonej analizy wariancji stwierdzono istotne interakcje jedynie dla współdziałania lat i formy azotu oraz lat i wielkości dawek azotu (Tab. 6). W badaniach wykazano współdziałanie przebiegu pogody w poszczególnych latach badań z formą zastosowanego azotu dla plonu liści. W roku 2015 istotnie większy plon liści odnotowano pod wpływem zastosowania formy W-D, w 2016 i 2017 natomiast bardziej korzystna okazała się forma D-D. Zarówno pod wpływem zastosowania formy D-D, jak i W-D istotnie większy przyrost plonu liści odnotowano w roku 2017 oraz 2016, porównując do roku 2015, w którym plony liści były najmniejsze (Tab. 6; Rys. 18).

Tabela 6. Współdziałanie formy azotu w latach badań na plon liści buraka ( $t \cdot ha^{-1}$ )

Forma/Lata	2015	2016
D-D	15.9 bC	23.2 aB
W-D	18.6 aC	21.3 bB

*Średnie oznaczone tą samą małą literą w kolumnie i tą samą wielką literą w wierszu nie różnią się między sobą ( $p < 0,05$ ).*

Rysunek 18. Graficzne przedstawienie współdziałania formy N w latach badań dla plonu liści



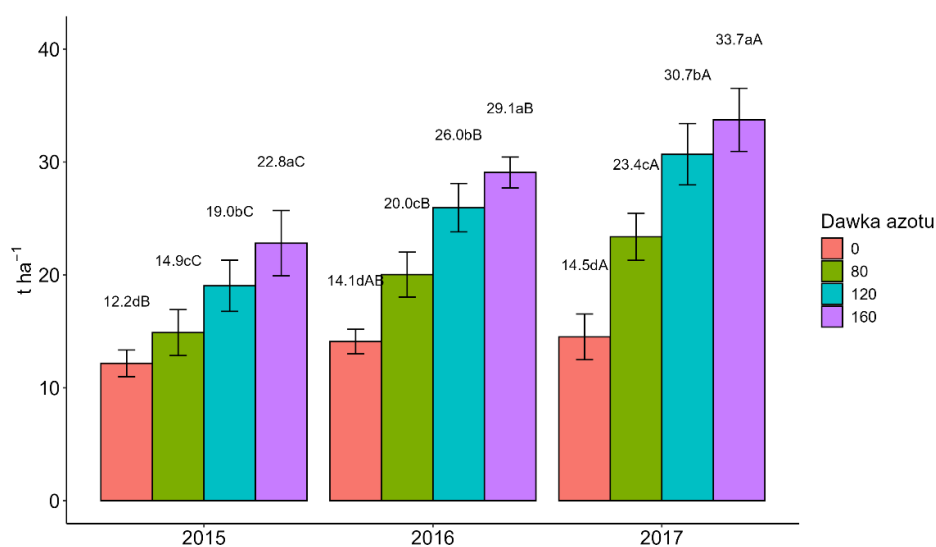
W badaniach własnych wykazano również współdziałanie przebiegu pogody w poszczególnych latach badań z dawką zastosowanego azotu dla plonu liści (Tab. 7). W każdym roku prowadzenia badań plon liści był istotnie kształtowany przez zwiększanie dawek nawożenia azotem. Największy plon liści uzyskano stosując dawkę  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , wynoszącym  $22,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  w roku 2015,  $29,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  w roku 2016 i  $33,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  w roku 2017. Najkorzystniejsze warunki pogodowe dla plonu liści odnotowano w roku 2017, w porównaniu do dwóch pozostałych lat badań (Tab. 7; Rys. 19).

Tabela 7. Współdziałanie dawki azotu w latach badań na plon liści ( $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ )

Dawka N/Lata	2015	2016	2017
0	12.2 dB	14.1 dAB	14.5 dA
80	14.9 cC	20.0 cB	23.4 cA
120	19.0 bC	26.0 bB	30.7 bA
160	22.8 aC	29.1 aB	33.7 aA

*Średnie oznaczone tą samą małą literą w kolumnie i tą samą wielką literą w wierszu nie różnią się między sobą ( $p < 0,05$ ).*

Rysunek 19. Graficzne przedstawienie współdziałania dawki N w latach badań dla plonu liści



#### 5.4. Jakość technologiczna korzeni buraka cukrowego

W tabeli 8 przedstawiono zmienność zawartości sacharozy i melasotworów pod wpływem badanych czynników. Stwierdzono istotność oddziaływania zarówno badanych zmiennych jak i ich współdziałania w latach prowadzenia badań.

Tabela 8. Zawartość sacharozy oraz melasotworów w korzeniach buraka cukrowego

Efekty czynników głównych i ich współdziałanie		Zawartość sacharozy (%)	Zawartość N- $\alpha$ -aminowy (mmol·kg <sup>-1</sup> )	Zawartość K <sup>+</sup> (mmol·kg <sup>-1</sup> )	Zawartość Na <sup>+</sup> (mmol·kg <sup>-1</sup> )
Lata	2015	19,7 a	19,6 a	43,5 b	6,3 a
	2016	17,3 c	18,9 a	44,9 b	6,0 a
	2017	18,3 b	19,0 a	48,3 a	3,0 b
Forma	D-D	18,6 a	20,0 a	46,1 a	4,7 b
	W-D	18,2 a	18,3 b	45,1 a	5,5 a
Dawka	0	18,7 a	12,8 d	45,5 a	5,1 a
	80	18,6 ab	17,7 c	46,0 a	5,2 a
	120	18,3 bc	21,3 b	46,2 a	5,1 a
	160	18,1 c	24,8 a	44,7 a	5,0 a
Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	*	r.n.	r.n.
Lata x Forma azotu		r.n.	r.n.	r.n.	***
Lata x Dawka azotu		r.n.	**	**	r.n.
Lata x Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Istotność: 0 ‘\*\*\*’ 0.001 ‘\*\*’ 0.01 ‘\*’ 0.05, r.n. - różnica nieistotna

Zawartość sacharozy była istotnie kształtowana pod wpływem warunków pogodowych w latach prowadzenia badań oraz dawki azotu (Tab. 8). Według Potarzyckiego i Lewickiej (2002) jakość technologiczna korzeni buraka cukrowego jest istotnie kształtowana przez warunki pogodowe panujące w okresie wegetacji buraków. W badaniach własnych największą zawartość sacharozy na poziomie 19,7 % odnotowano w roku 2015, najmniejszą natomiast w roku 2016 – 17,3%. Na zawartość sacharozy istotnie wpływały zastosowane dawki azotu. Największą zawartością sacharozy charakteryzowały się korzenie roślin nienawożonych azotem (18,7%), wraz ze wzrostem dawki azotu zmniejszała się ilość sacharozy w korzeniach, pod wpływem dawki 160 kg·ha<sup>-1</sup> zawartość sacharozy spadła o 0,6% w porównaniu do roślin nienawożonych i o 0,3% w porównaniu do dawki 80 kg·ha<sup>-1</sup>. Również w literaturze przedmiotu wielu autorów podkreśla zależność spadku ilości sacharozy w korzeniach pod wpływem wzrastających dawek nawożenia azotem (Varga, i in., 2024; Varga i in., 2021; Pulkrábek i in., 2021; Leilah i Khan, 2021; Ali Abdallah Ali Mekdad i Shaaban, 2020; Van Eerd i in., 2012; Michalska-Klimczak i Wyszyński, 2010; Ismail, 2005; Pytlarz-Kozicka, 2005; Prośba-Białczyk, 2004).

Podobną zależność zaobserwowano również w badaniach przeprowadzonych przez Poglodziński i in. (2021) zawartość sacharozy była istotnie kształtowana przez warunki pogodowe w latach badań oraz dawki azotu. Większą zawartość sacharozy odnotowali w roku 2015 w porównaniu do roku 2016, a zastosowanie dawek azotu: 40, 80, 120, 160 i 200 kg·ha<sup>-1</sup> zmniejszało zawartość sacharozy w korzeniach w porównaniu do roślin nienawożonych. Największą zawartością sacharozy na poziomie 19% odznaczały się rośliny na obiekcie kontrolnym. Również Sinicki (2016) gdyż zawartość sacharozy w korzeniach była największa w obiektach nienawożonych azotem, natomiast dawki 60, 120, 180, 240 i 300 kg·ha<sup>-1</sup> zmniejszały zawartość sacharozy w korzeniach.

W badaniach Ferweez i in. (2011) największą zawartość sacharozy na poziomie 14,7 do 15,6% odnotowano pod wpływem najniższej dawki azotu (80 kg·ha<sup>-1</sup>), najmniejszą zawartość tego parametru na poziomie 12,65 – 13,25% odnotowano natomiast pod wpływem największej stosowanej dawki azotu (120 kg·ha<sup>-1</sup>). Autorzy Nemeat Alla i in. (2002) i El-Kader i Agron (2011) wskazują, iż zwiększanie nawożenia azotem powyżej 90 kg·ha<sup>-1</sup> przyczynia się do istotnego zmniejszenia zawartości sacharozy w korzeniach. W badaniach Islamgulov i in. (2019), największą zawartość sacharozy otrzymano pod wpływem dawki 120 kg·ha<sup>-1</sup>, natomiast dawki 160 i 240 kg·ha<sup>-1</sup> zmniejszały zawartość sacharozy w korzeniach. Badania Azzazy (2004) wskazują, iż zwiększenie nawożenia azotem z 75 na 90 kg·ha<sup>-1</sup> wpływa na zmniejszenie zawartości sacharozy w korzeniach. W badaniach Sarhan i in. (2012) zawartość

sacharozy była największa po zastosowaniu dawki  $60 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a zwiększenie dawki do  $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  przyczyniło się do spadku zawartości sacharozy w korzeniach. Podobną zależność w swoich badaniach uzyskali również Mahmoud i in. (2012), gdzie największą zawartość sacharozy odnotowano pod wpływem dawki  $60 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a dawki  $80$  i  $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  zmniejszyły zawartość sacharozy w korzeniach. Badania przeprowadzone przez Hasanen i in. (2013) zawartość sacharozy była również istotnie kształtowana przez dawki nawożenia azotem. Najmniejszą zawartość tego parametru odnotowano pod wpływem dawki  $350 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , w porównaniu do obiektu nienawożonego oraz dawek  $250$  i  $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

W badaniach własnych nie odnotowano wpływu formy azotu na zawartość sacharozy (Tab. 8), natomiast Ismail (2005) wskazują, iż zastosowanie mocznika zwiększa zawartość sacharozy w porównaniu do saletry amonowej.

W badaniach własnych zawartość N- $\alpha$ -aminowego w korzeniach buraka cukrowego była istotnie modyfikowana pod wpływem formy oraz dawki azotu (Tab. 8). Istotnie mniej tego melasotworu odnotowano pod wpływem zastosowania formy W-D ( $18,3 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Natomiast w badaniach przeprowadzonych przez Ismail (2005) mniejszą zawartość tego parametru odnotowano pod wpływem zastosowania saletry amonowej w porównaniu z mocznikiem. Najmniejszą ilością N- $\alpha$ -aminowego odznaczały się rośliny nienawożone azotem, parametr ten wzrastał wraz ze wzrostem dawki nawożenia azotem, największą zawartość odnotowano pod wpływem dawki  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Podobną zależność w swoich badaniach odnotowali także Varga i in. (2024), Pogłodziński i in. (2021), Abdallah i Mekdad (2015), Hasanen i in. (2013), Van Eerd i in. (2012), Ismail (2005), Pytlarz-Kozicka (2005) oraz Prośba-Białczyk, (2004). W badaniach przeprowadzonych przez Mekdad i Rady (2016) po zwiększeniu dawki z  $200$  na  $350 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  zawartość N- $\alpha$ -aminowego również istotnie się zwiększyła o 27%.

W badaniach własnych zawartość kationów potasu była istotnie modyfikowana pod wpływem warunków termiczno-wilgotnościowych w latach badań (Tab. 8). Największą kumulację kationów potasu w korzeniach buraków cukrowych odnotowano w roku 2017, najmniejszą natomiast w roku 2015. Na zawartość kationów potasu nie wpłynęła natomiast forma i dawka azotu. W badaniach przeprowadzonych przez Pytlarz-Kozicką (2005) zawartość kationów potasu wzrasta wraz ze zwiększaniem dawki azotu. Także w badaniach przeprowadzonych przez Mekdad i Rady (2016) zwiększenie dawki azotu z  $200$  na  $350 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  spowodowało przyrost zawartości kationów potasu.

W przypadku zawartości kationów sodu w korzeniach buraków cukrowych w badaniach własnych wpływ miały warunki pogodowe w latach badań oraz forma azotu, nie



odnotowano natomiast wpływu dawki azotu na zawartość kationów sodu (Tab. 8). Kumulacji tego melasotworu w korzeniach sprzyjał rok 2015, najmniejszą wartość odnotowano natomiast w roku 2017. Forma azotu D-D wpłynęła korzystnie na zmniejszenie się ilości kationów sodu o  $0,8 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  w porównaniu do formy W-D (Tab. 8). Inaczej niż w badaniach własnych Islamgulov i in. (2019) odnotowali, iż dawka nawozu azotowego miała wpływ na zawartość sodu w korzeniach buraka cukrowego. Największą zawartość sodu stwierdzono w pod wpływem dawki  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a najmniejsza pod wpływem dawki  $40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

W badaniach własnych wykazano współdziałanie przebiegu pogody w poszczególnych latach badań z dawką azotu dla N- $\alpha$ -aminowego i kationów potasu (Tab. 9 i 11). W każdym roku prowadzenia badań zawartość N- $\alpha$ -aminowego wzrastała wraz ze wzrostem dawki azotu. Najmniejszą zawartością N- $\alpha$ -aminowego charakteryzowały się rośliny w obiektach kontrolnych w porównaniu do dawek  $80$ ,  $120$  i  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , zawartość tego melasotworu kształtowała się na poziomie  $11,7 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  w roku 2015,  $12,9 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  w roku 2016 i  $13,8 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  w roku 2017. Istotnie więcej N- $\alpha$ -aminowego odnotowano w roku 2015 w porównaniu do roku 2017 pod wpływem dawki  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a także w obiekcie kontrolnym w roku 2017 w porównaniu do 2015. Zawartość kationów potasu była istotnie kształtowana przez dawkę azotu, ale tylko w roku 2015. Najmniejszą zawartość tego parametru odnotowano pod wpływem dawki  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , w porównaniu do obiektu kontrolnego i dawki  $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

Zawartość N- $\alpha$ -aminowego była również istotnie kształtowana pod wpływem interakcji dawki i formy azotu (Tab. 10). Więcej N- $\alpha$ -aminowego odnotowano pod wpływem formy D-D w porównaniu do formy W-D, a jego zawartość przy obu formach azotu zwiększała się wraz ze wzrostem dawki nawożenia azotem (Tab. 10).

Odnutowano również współdziałanie dawki azotu w latach badań na zawartość kationów potasu (Tab.11). Pod wpływem dawki azotu  $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , mniejszą zawartość kationów potasu odnotowano w roku 2016 w porównaniu do roku 2017, pod wpływem dawki azotu  $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  natomiast mniejszą zawartość kationów potasu odnotowano w roku 2015, ale w porównaniu do roku 2017, pod wpływem dawki azotu  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  natomiast istotnie mniejszą zawartość kationów potasu odnotowano w roku 2015, w porównaniu do roku 2016 i 2017 (Tab.11).

W przypadku kationów sodu istotnie mniej tego melasotworu odnotowano pod wpływem formy D-D w roku 2015. Pod wpływem formy D-D najmniejszą zawartością kationów sodu odnotowano w roku 2017 w porównaniu do roku 2015 i 2016. Podobną zależność zaobserwowano pod wpływem formy W-D, najmniejszą zawartość kationów sodu

odnotowano w roku 2017, w porównaniu do 2016 i 2015, istotnie mniej kationów sodu odnotowano także w roku 2016 w porównaniu do roku 2015 (Tab. 12).

Tabela 9. Współdziałanie dawki azotu w latach badań na zawartość N- $\alpha$ -aminowego ( $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Dawka N\Lata	2015	2016	2017
0	11,7 dB	12,9 dAB	13,8 dA
80	18,2 cA	16,6 cA	18,1 cA
120	22,2 bA	20,8 bA	20,9 bA
160	26,2 aA	25,0 aAB	23,2 aB

*Średnie oznaczone tą samą małą literą w kolumnie i tą samą wielką literą w wierszu nie różnią się między sobą ( $p < 0,05$ )*

Tabela 10. Współdziałanie formy azotu i dawki azotu na zawartość N- $\alpha$ -aminowego ( $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Forma N/Dawka N	0	80	120	160
D-D	13,0 aD	18,4 aC	22,7 aB	25,8 aA
W-D	12,6 aD	16,9 bC	19,9 bB	23,9 bA

*Średnie oznaczone tą samą małą literą w kolumnie i tą samą wielką literą w wierszu nie różnią się między sobą ( $p < 0,05$ )*

Tabela 11. Współdziałanie dawki azotu w latach badań na zawartość kationów potasu ( $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Dawka N\Lata	2015	2016	2017
0	45,6 aA	44,4 aA	46,4 aA
80	46,9 aAB	42,7 aB	48,4 aA
120	43,1 abB	46,0 aAB	49,5 aA
160	38,4 bB	46,7 aA	49,0 aA

*Średnie oznaczone tą samą małą literą w kolumnie i tą samą wielką literą w wierszu nie różnią się między sobą ( $p < 0,05$ )*

Tabela 12. Współdziałanie dawki azotu w latach badań na zawartość kationów sodu ( $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Forma N\Lata	2015	2016	2017
D-D	5,34 bA	5,81 aA	2,97 aB
W-D	7,21 aA	6,17 aB	3,12 aC

*Średnie oznaczone tą samą małą literą w kolumnie i tą samą wielką literą w wierszu nie różnią się między sobą ( $p < 0,05$ )*

## 5.5. Biologiczny plon cukru

W tabeli 13 przedstawiono zmienność biologicznego plonu cukru pod wpływem badanych czynników. Stwierdzono istotność oddziaływania formy i dawki azotu oraz lat prowadzenia badań, a także współdziałań lat z dawką i lat z formą.

Tabela 13. Analiza wariancji dla biologicznego plonu cukru

Analiza wariancji (rodzaje zmienności)	Stopnie swobody	Sumy kwadratów odchyłeń	Średnie kwadraty odchyłeń	Statystyka testowa F	Pr (F)	Istotność
Bloki	3	0.8	0.3	0.18	0.91037	
Forma azotu	1	14.3	14.3	29	0.01227	*
Nieściskość (błąd) I	3	1.5	0.5			
Dawka azotu	3	648.9	216.3	210	0.00000	***
Forma azotu x Dawka azotu	3	6.7	2.2	2.2	0.12617	r.n.
Nieściskość (błąd) II	18	18.6	1.0			
Lata	2	90.1	45.1	32	0.00000	***
Lata x Forma azotu	2	19.4	9.7	6.9	0.00230	**
Lata x Dawka azotu	6	91.5	15.3	10.9	0.00000	***
Lata x Forma azotu x Dawka azotu	6	16.1	2.7	1.91	0.09798	r.n.
Nieściskość (błąd) III	48	67.4	1.4			

Istotność: 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05

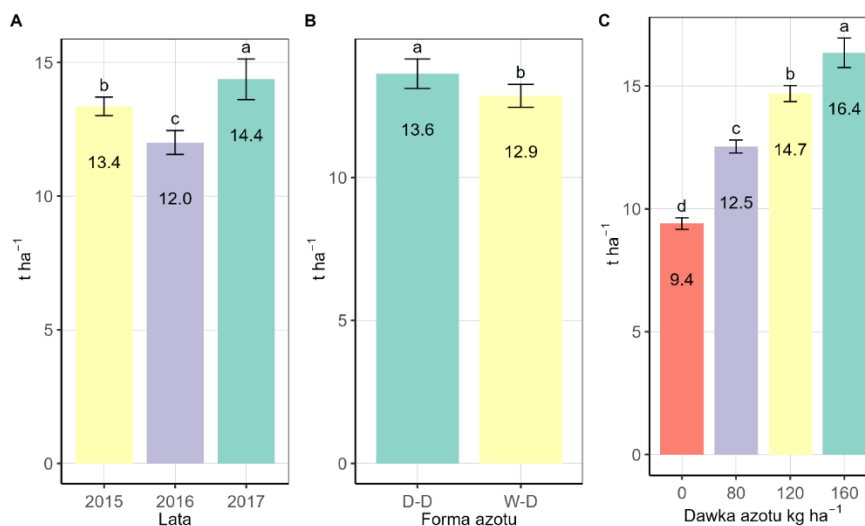
Najkorzystniejsze warunki pogodowe dla biologicznego plonu cukru wystąpiły w roku 2017, najmniej korzystne natomiast w roku 2016. Zastosowanie formy D-D spowodowało wzrost tego parametru o 0,7 t·ha<sup>-1</sup> w porównaniu do formy W-D (Rys. 20). Biologiczny plon cukru wzrastał wraz ze wzrostem dawki azotu, w porównaniu do obiektu nienawożonego. Zastosowane dawki 80, 120 i 160 kg·ha<sup>-1</sup> spowodowały wzrost biologicznego plonu cukru odpowiednio o 3,1 t·ha<sup>-1</sup>, 5,3 t·ha<sup>-1</sup> i 7,0 t·ha<sup>-1</sup> (Rys. 20).

W badaniach przeprowadzonych przez Borówczak i in. (2006) największy plon biologiczny cukru na poziomie 11,2 t·ha<sup>-1</sup> osiągnięto przy nawożeniu dawką 50 kg·ha<sup>-1</sup>. Zastosowanie dawek 100 i 150 kg·ha<sup>-1</sup> zmniejszyło plon cukru w porównaniu do dawki 50 kg·ha<sup>-1</sup>, co jednak nie zostało potwierdzone statystycznie.

Natomiast w badaniach przeprowadzonych przez Prośba-Białczyk (2004) nawożenie azotem wykonano wiosną, dawki 60 i 120 kg·ha<sup>-1</sup> stosowano w całości przed siewem. Dawkę 180 kg·ha<sup>-1</sup> dzielono na dwie części – 120 kg·ha<sup>-1</sup> stosowano przed siewem, a pozostałe 60 kg·ha<sup>-1</sup> w fazie 4–6 liści buraka cukrowego. Oceniano wpływ dawek azotu (0, 60, 120 i 180 kg·ha<sup>-1</sup>) na biologiczny plon cukru, który podobnie jak w badaniach własnych wzrastał wraz

ze wzrostem dawki nawożenia azotem i wynosił odpowiednio dla dawek 8,5 t·ha<sup>-1</sup>, 9,7 t·ha<sup>-1</sup>, 10,6 t·ha<sup>-1</sup> i 10,9 t·ha<sup>-1</sup>.

Rysunek 20. Biologiczny plon cukru w zależności od lat badań, formy oraz dawki N



W przeprowadzonych badaniach wykazano współdziałanie lat prowadzenia badań z dawką i formą azotu (Tab. 14-15). W roku 2016 i 2017 istotny przyrost biologicznego plonu cukru odnotowano pod wpływem formy D-D, w porównaniu do formy W-D. Dla formy D-D największy przyrost biologicznego plonu cukru odnotowano w roku 2017, w porównaniu do dwóch pozostałych lat badań. Dla formy W-D najwyższy przyrost plonu cukru również odnotowano w 2017, ale w porównaniu do roku 2016. W roku 2017 w porównaniu do dwóch pozostałych lat badań największy przyrost biologicznego plonu cukru odnotowano pod wpływem zastosowania dawek 120 i 160 kg·ha<sup>-1</sup>.

Tabela 14. Współdziałanie formy N w latach badań dla biologicznego plonu cukru (t·ha<sup>-1</sup>)

Forma N/Lata	2015	2016	2017
D-D	13,2 aB	12,5 aB	15,3 aA
W-D	13,6 aA	11,5 bB	13,5 bA

Średnie oznaczone tą samą małą literą w kolumnie i tą samą wielką literą w wierszu nie różnią się między sobą ( $p < 0,05$ )

Tabela 15. Współdziałanie dawki N w latach badań dla biologicznego plonu cukru (t·ha<sup>-1</sup>)

Dawka N/Lata	2015	2016	2017
0	10,67 cA	8,50 cB	9,03 dB
80	13,02 bA	11,90 bA	12,68 cA
120	14,36 abB	13,37 abB	16,33 bA
160	15,37 aB	14,24 aB	19,44 aA

Średnie oznaczone tą samą małą literą w kolumnie i tą samą wielką literą w wierszu nie różnią się między sobą ( $p < 0,05$ )

## 5.6. Technologiczny plon cukru

W tabeli 16 przedstawiono analizę wariancji dla technologicznego plonu cukru. Stwierdzono istotność oddziaływania zarówno badanych zmiennych jak i ich współdziałania w latach prowadzenia badań.

Tabela 16. Analiza wariancji dla technologicznego plonu cukru

Analiza wariancji (rodzaje zmienności)	Stopnie swobody	Sumy kwadratów odchyłeń	Średnie kwadraty odchyłeń	Statystyka testowa F	Pr (F)	Istotność
Bloki	3	0.5	0.2	0.12	0.94635	
Forma azotu	1	12.3	12.3	34	0.01003	*
Nieściskość (błąd) I	3	1.1	0.4			
Dawka azotu	3	500.3	166.8	206	0.00000	***
Forma azotu x Dawka azotu	3	3.8	1.3	1.6	0.23346	r.n.
Nieściskość (błąd) II	18	14.6	0.8			
Lata	2	73.3	36.6	30	0.00000	***
Lata x Forma azotu	2	14.1	7.1	5.8	0.00567	**
Lata x Dawka azotu	6	70.1	11.7	9.5	0.00000	***
Lata x Forma azotu x Dawka azotu	6	13.8	2.3	1.88	0.10307	r.n.
Nieściskość (błąd) III	48	58.8	1.2			

Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05

Technologiczny plon cukru był istotnie modyfikowany przez warunki termiczno-wilgotnościowe w latach prowadzenia badań (Rys. 21). Najkorzystniejsze warunki wystąpiły w roku 2017, w którym technologiczny plon cukru wyniósł 12,6 t·ha<sup>-1</sup>, najmniej korzystne warunki wystąpiły natomiast w roku 2016, w którym odnotowano spadek technologicznego plonu cukru o 2,1 t·ha<sup>-1</sup> w porównaniu do roku 2017 i o 1,1 t·ha<sup>-1</sup> w porównaniu do roku 2016.

W badaniach przeprowadzonych przez Pogłodziński i in. (2021) w roku 2015 osiągnięto większy technologiczny plon cukru aniżeli w roku 2016, co potwierdzają też badania własne. Wzrost technologicznego plonu cukru odnotowano również pod wpływem zastosowania formy azotu D-D (Rys. 21). Natomiast w badaniach Ismail (2005) zastosowanie mocznika zwiększyło technologiczny plon cukru w porównaniu do saletry amonowej. Ten sam autor wskazuje również, że zwiększenie dawki azotu z 69 na 115 kg·ha<sup>-1</sup> zmniejszyło technologiczny plon cukru.

Istotny wzrost technologicznego plonu cukru w badaniach własnych odnotowano również pod wpływem zastosowanych dawek azotu, im wyższa dawka azotu tym większy przyrost technologicznego plonu cukru. Przyrosty te wynosiły 2,7 t·ha<sup>-1</sup>, 4,6 t·ha<sup>-1</sup> i 6,1 t·ha<sup>-1</sup>

odpowiednio dla dawek 80, 120 i 160 kg·ha<sup>-1</sup>, w porównaniu do obiektów nienawożonych (Rys.21). Podobne wyniki otrzymał Malnou i in. (2006), gdzie pod wpływem zastosowania saletry amonowej technologiczny plon cukru również wzrastał wraz ze wzrostem dawki, a największe wartości odnotowano pod wpływem dawki 160 kg·ha<sup>-1</sup>. W doświadczeniu Sinicki (2016) zastosowano dawki nawożenia azotem 0, 60, 120, 180, 240 i 300 kg·ha<sup>-1</sup>, technologiczny plon cukru zwiększał się wraz ze wzrostem dawki azotu, największy przyrost odnotowano pod wpływem dawki 240 i 300 kg·ha<sup>-1</sup>. Podobne wyniki uzyskała również Prośba-Białczyk (2004).

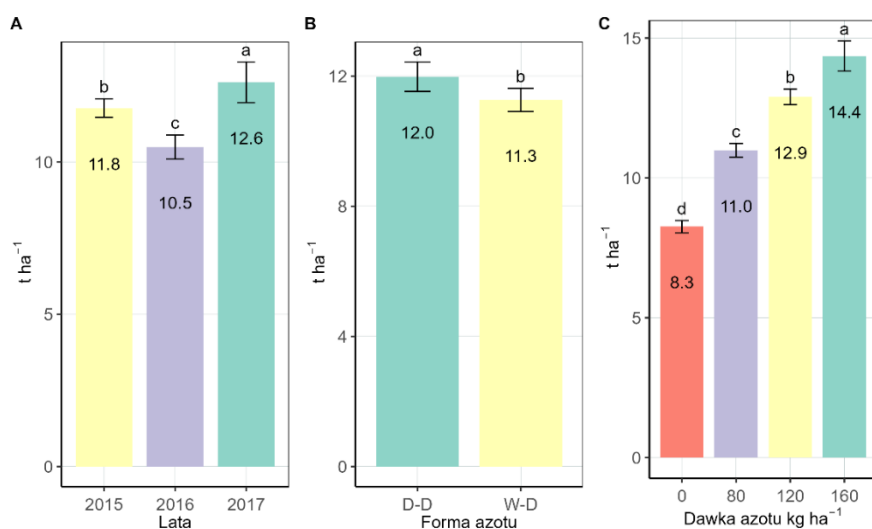
Według badań przeprowadzonych przez Tsialtas i Maslaris (2005) w warunkach śródziemnomorskich Grecji, największy technologiczny plon cukru uzyskuje się pod wpływem nawożenia azotem nie przekraczającym dawki azotu 200 kg·ha<sup>-1</sup>. Inną tendencję odnotowali natomiast Borówczak i in. (2006), w badaniach autorzy wskazują, iż największy technologiczny plon cukru na poziomie 9,87 t·ha<sup>-1</sup>, uzyskano pod wpływem nawożenia dawką 50 kg·ha<sup>-1</sup>. Zastosowanie dawek 100 i 150 kg·ha<sup>-1</sup> zmniejszyło plony cukru w porównaniu do dawki 50 kg·ha<sup>-1</sup>, co jednak nie zostało potwierdzone statystycznie.

Natomiast badania Azzazy (2004) wskazują, iż zwiększenie nawożenia azotem z 75 na 90 kg·ha<sup>-1</sup> wpływa korzystnie na przyrost technologicznego plonu cukru. Natomiast w badaniach Pytlarz-Kozicka (2005) zwiększenie dawki azotu z 90 na 180 kg·ha<sup>-1</sup> nie wpłynęło na zwiększenie technologicznego plonu cukru, podobną zależność odnotowali również Pogłodziński i in. (2021).

W badaniach przeprowadzonych przez Leilah i Khan (2021) zastosowanie mocznika w dawkach 165, 220 i 275 kg·ha<sup>-1</sup> przyczyniło się także do wzrostu technologicznego plonu cukru. W badaniach Mekdad i Rady (2016) zastosowanie saletry amonowej w dawkach 200 i 350 kg·ha<sup>-1</sup> zwiększyło plon cukru z 12,6 t·ha<sup>-1</sup> na 15,4 t·ha<sup>-1</sup>. W badaniach Abdallah i Mekdad (2015) zwiększenie nawożenia azotem ze 100 do 140 kg·ha<sup>-1</sup> również przyczyniło się do wzrostu plonu cukru.

W badaniach przeprowadzonych przez Michalska-Klimczak i Wyszyński (2010) pod wpływem nawożenia azotem w dawce 120 kg·ha<sup>-1</sup> w porównaniu do dawki 60 kg·ha<sup>-1</sup> odnotowano istotny spadek sacharozy w korzeniach i wzrost zawartości melasotworów, co w konsekwencji przyczyniło się do spadku technologicznego plonu cukru.

Rysunek 21. Technologiczny plon cukru w zależności od lat badań, formy oraz dawki N



Wykazano również współdziałanie formy azotu w latach badań (Tab. 18). Istotnie większy plon technologiczny cukru uzyskano w roku 2016 pod wpływem formy D-D, o 0,8 t·ha<sup>-1</sup>, a w roku 2017 o 1,6 t·ha<sup>-1</sup>, w porównaniu do formy W-D. Pod wpływem formy D-D uzyskano w roku 2017- 13,4 t·ha<sup>-1</sup>, w 2016 – 10,9 t·ha<sup>-1</sup>, i 2015 - 11,6 t·ha<sup>-1</sup>. Pod wpływem formy W-D największy technologiczny plon cukru odnotowano w roku 2015 i 2017, a istotnie mniejszy w 2016. Odnotowano również współdziałanie dawki N w latach prowadzenia badań (Tab. 19). Najkorzystniejszymi warunkami termiczno-wilgotnościowymi dla technologicznego plonu cukru odznaczał się rok 2017, gdzie pod wpływem zastosowanych dawek azotu plon istotnie wzrastał wraz ze wzrostem dawek nawożenia azotem, mniej korzystne warunki panowały natomiast w roku 2016, mimo, iż również odnotowano wzrost ilości plonu cukru, był on zdecydowanie mniejszy niż w przypadku roku 2017.

Tabela 17. Współdziałanie formy N w latach badań dla technologicznego plonu cukru (t·ha<sup>-1</sup>)

Forma N/ Lata	2015	2016	2017
D-D	11,6 aB	10,9 aB	13,4 aA
W-D	11,9 aA	10,1 bB	11,8 bA

Średnie oznaczone tą samą małą literą w kolumnie i tą samą wielką literą w wierszu nie różnią się między sobą ( $p < 0,05$ )

Tabela 18. Współdziałanie dawki N w latach badań dla technologicznego plonu cukru (t·ha<sup>-1</sup>)

Dawka N/ Lata	2015	2016	2017
0	9,44 cA	7,39 cB	7,95 dB
80	11,44 bA	10,38 bA	11,15 cA
120	12,66 abB	11,76 aB	14,28 bA
160	13,55 aB	12,43 aB	17,09 aA

Średnie oznaczone tą samą małą literą w kolumnie i tą samą wielką literą w wierszu nie różnią się między sobą ( $p < 0,05$ )

## 5.7. Cechy morfologiczne korzeni buraka cukrowego

Cechy morfologiczne korzeni (szerokość i długość) były istotnie kształtowane przez warunki pogodowe w latach prowadzenia badań, formę oraz dawkę azotu (Tab. 19). Odnotowano również współdziałanie lat i formy azotu oraz lat i dawki azotu na kształtowanie się cech morfologicznych buraka cukrowego (Tab. 19).

W tabeli 19 przedstawiono analizę wariancji dla cech morfologicznych, przedstawiono również dynamikę zmian szerokości i długości korzenia w poszczególnych fazach rozwojowych BBCH, w zależności od lat, formy oraz dawki azotu (Rys. 22-23).

Szerokość korzeni buraka cukrowego była istotnie kształtowana przez warunki pogodowe w latach prowadzenia badań, dla faz rozwojowych BBCH 25 i 31 oraz 41. Najwyższe przyrosty szerokości korzeni w fazie BBCH 25 odnotowano w roku 2017, w fazie BBCH 31 i 41 w roku 2015, w porównaniu do dwóch pozostałych lat. Na przyrost szerokości korzenia w fazach BBCH 25, 31 i 35 korzystniej oddziaływała forma W-D. Pod wpływem zwiększania zastosowanych dawek nawożenia azotem odnotowano przyrost szerokości korzeni, największą szerokość korzenia odnotowywano pod wpływem dawki  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  w porównaniu do kontroli, jak i dawki  $80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  w fazach BBCH 25, 35 i 41 (Tab. 19). Podobną zależność stwierdzili także w swojej pracy Ferweez i in. (2011).

W badaniach własnych na długość korzeni wpływ miały warunki pogodowe w latach badań oraz dawka azotu, nie odnotowano natomiast wpływu formy azotu na badany parametr (Tab.19). Istotnie dłuższymi korzeniami odznaczały się rośliny w roku 2015 dla faz rozwojowych BBCH 25, 31 i 35, a dla fazy BBCH 41 w roku 2016. Największe przyrosty długości korzeni stwierdzono w obiektach kontrolnych, bez nawożenia azotem, najmniejszą długość korzeni w poszczególnych fazach rozwojowych odnotowano natomiast pod wpływem zastosowania dawki  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . W badaniach przeprowadzonych przez Azzazy (2004) zwiększenie nawożenia azotem z 60 do 75 i 90  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  przyczyniło się do wzrostu długości i szerokości korzeni buraka cukrowego. Podobne wyniki otrzymał także Sarhan i in. (2012).

W badaniach przeprowadzonych przez Ferweez i in. (2011) zastosowanie mocznika w dawkach 80, 100 i 120  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  oraz dolistnego nawożenia borem wpłynęło pozytywnie na wzrost długości korzeni buraka cukrowego. Porównując najmniejszą i największą dawkę azotu wzrost długości korzenia wynosił od 3,89 cm do 4,46 cm. Również w badaniach Hasanen i in. (2013) pod wpływem nawożenia organicznego oraz różnych dawek azotu (0, 150, 250, 350  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) długość korzenia zwiększała się wraz ze wzrostem nawożenia azotem we wszystkich fazach rozwojowych buraka cukrowego. Ismail (2005) wykazał, iż na długość korzenia istotny wpływ ma forma zastosowanego azotu, istotnie wyższe przyrosty tego parametru otrzymano



po zastosowaniu saletry amonowej w porównaniu do mocznika, zwłaszcza przy wzrastających dawkach tych nawozów, czego nie potwierdzono w badaniach własnych.

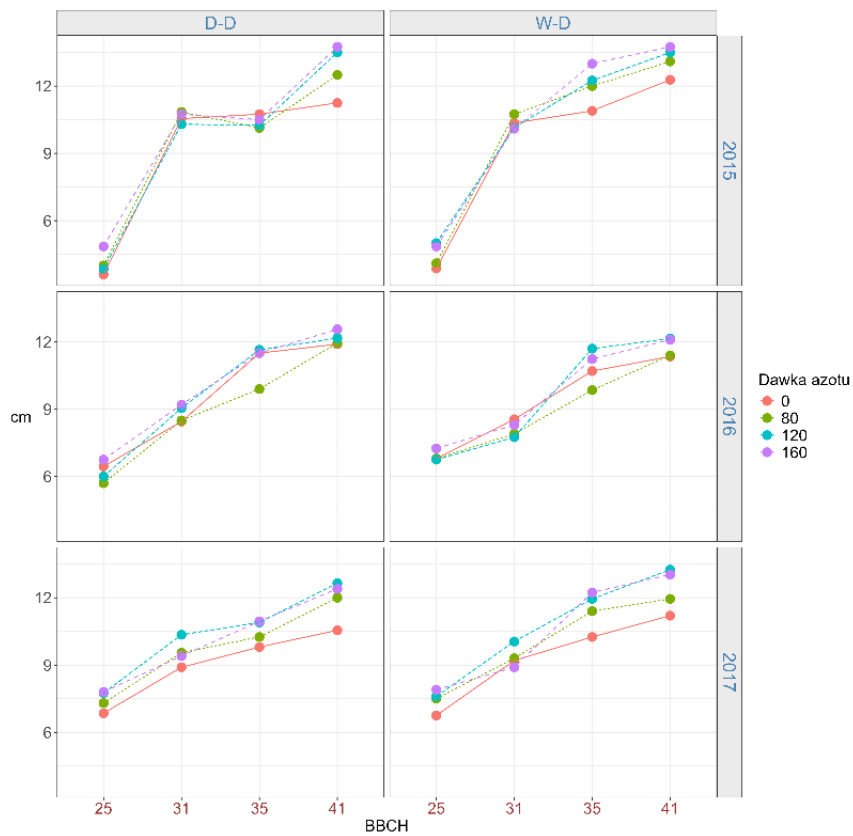
Leilah i Khan (2021) zastosowali mocznik w dawkach 165, 220 i 275 kg·ha<sup>-1</sup>, co przyczyniło się także do wzrostu długości korzeni buraków cukrowych. Również w badaniach Mekdad i Rady (2016) zwiększenie dawki azotu z 200 do 350 kg·ha<sup>-1</sup> w postaci saletry amonowej zastosowanej pogłównie przyczyniło się do zwiększenia długości korzeni buraka cukrowego o 3,38 cm. W badaniach Abdallah i Mekdad (2015) zwiększenie nawożenia azotem ze 100 do 140 kg·ha<sup>-1</sup> również zwiększyło długość korzeni buraków cukrowych o 1,88 cm.

Tabela 19. Szerokość i długość korzeni buraków cukrowych

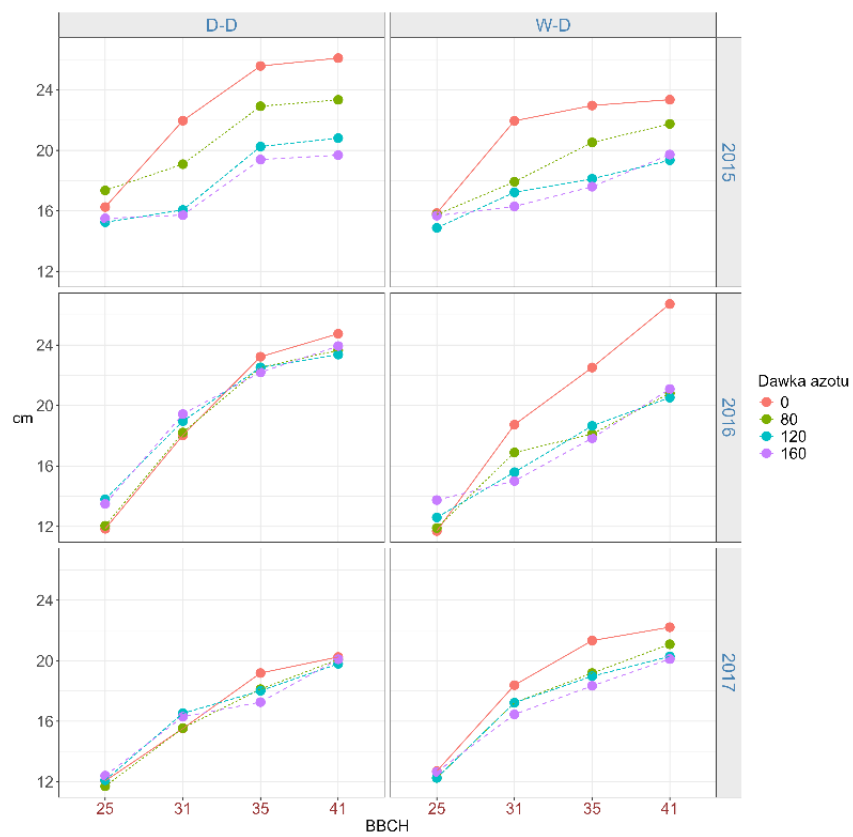
Efekty czynników głównych i ich współdziałanie		Szerokość korzenia (cm)				Długość korzenia (cm)			
		Faza BBCH				Faza BBCH			
		25	31	35	41	25	31	35	41
Lata	2015	4,3 c	10,5 a	11,2 a	13,0 a	15,8 a	18,3 a	20,9 a	21,8 b
	2016	6,6 b	8,5 c	11,0 a	11,9 b	12,6 b	17,6 a	20,9 a	23,1 a
	2017	7,4 a	9,5 b	11,0 a	12,1 b	12,3 b	16,6 b	18,8 b	20,5 c
Forma	D-D	5,9 b	9,7 a	10,7 b	12,3 a	13,6 a	17,6 a	20,9 a	22,2 a
	W-D	6,3 a	9,3 b	11,5 a	12,4 a	13,5 a	17,4 a	19,5 b	21,4 a
Dawka	0	5,7 c	9,3 a	10,6 b	11,4 c	13,4 a	19,1 a	22,5 a	23,9 a
	80	5,9 bc	9,5 a	10,6 b	12,2 b	13,5 a	17,5 b	20,2 b	21,8 b
	120	6,2 b	9,6 a	11,4 ab	12,9 a	13,5 a	16,9 b	19,4 b	20,7 b
	160	6,6 a	9,4 a	11,6 a	12,9 a	13,9 a	16,5 b	18,8 b	20,8 b
Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
Lata x Forma azotu		***	r.n.	**	r.n.	r.n.	***	***	**
Lata x Dawka azotu		***	**	r.n.	r.n.	r.n.	***	r.n.	**
Lata x Forma azotu x Dawka azotu		**	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	*

Istotność: 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05, r.n. - różnica nieistotna

Rysunek 22. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian szerokości korzenia buraka



Rysunek 23. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian długości korzeni buraka



## 5.8. Sucha masa liści i korzeni buraka cukrowego

Zawartości suchej masy w liściach i korzeniach były istotnie kształtowane przez warunki pogodowe w latach prowadzenia badań oraz dawkę azotu (Tab. 20). Odnotowano również współdziałanie lat i formy azotu oraz lat i dawki azotu na kształtowanie się zawartości suchej masy w liściach i korzeniach. W tabeli 20 przedstawiono analizę wariancji dla suchej masy liści i korzeni, przedstawiono również dynamikę zmian zawartości suchej masy w poszczególnych fazach rozwojowych BBCH, w zależności od lat, formy oraz dawki azotu (Rys. 24-25).

Na zawartość suchej masy w liściach istotny wpływ miały warunki pogodowe w latach prowadzenia badań oraz dawka azotu (Tab. 20). W fazach BBCH 31, 35 i 41 największe przyrosty zawartości suchej masy odnotowano w roku 2015, w fazie BBCH 25 natomiast w roku 2016, porównując do dwóch pozostałych lat badań. We wszystkich fazach rozwojowych najwięcej suchej masy w liściach odnotowano pod wpływem zastosowania dawki  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , w porównaniu do pozostałych dawek i obiektu kontrolnego. Najmniejszą kumulację badanego parametru odnotowano w obiektach kontrolnych.

Podobną zależność zaobserwowali w swoich badaniach Szmigiel i in. (2014) w uprawie buraka pastewnego sucha masa liści była istotnie modyfikowana przez warunki pogodowe w latach badań, wpływ miała także dawka azotu, ale różnice nie były statystycznie istotne.

W badaniach własnych zawartość suchej masy w korzeniach była istotnie kształtowana przez warunki pogodowe w latach badań oraz dawkę azotu (Tab. 20). We wszystkich fazach rozwojowych największe gromadzenie suchej masy w korzeniach wystąpiło w roku 2015, w porównaniu do roku 2016 i 2017. W fazach BBCH 25, 31 i 35 największą zawartość suchej masy w korzeniach odnotowano pod wpływem dawki azotu  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , w porównaniu do obiektu kontrolnego i dwóch pozostałych dawek, natomiast w fazie BBCH 49 największą zawartością suchej masy w korzeniach odznaczały się rośliny nienawożone, a najmniejszą rośliny nawożone dawką  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Zbliżone wyniki otrzymała Prośba-Białczyk (2004), gdyż w czteroletnim doświadczeniu zawartość suchej masy w korzeniach była również istotnie modyfikowana przez warunki pogodowe w latach badań, a także nawożenie azotem. W badaniach tych zawartość suchej masy w fazie BBCH 49 również malała wraz ze wzrostem dawki nawożenia azotem, najwyższą procentową zawartość suchej masy odnotowano w obiekcie bez nawożenia azotem, a najmniejsza pod wpływem dawki  $180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Również w badaniach przeprowadzonych przez Su i in. (2024) zastosowanie dawek azotu na poziomie 75, 150 i  $225 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  spowodowało przyrost zawartości suchej masy w korzeniach i liściach. Natomiast

w badaniach przeprowadzonych przez Kurus (2006) nie zaobserwowano wpływu zastosowanych dawek nawożenia azotem na zawartość suchej masy w korzeniach w fazie BBCH 49, autorka wskazuje natomiast, że jedynie warunki sezonowe modyfikowały tę cechę, korzenie i liście buraków cukrowych odznaczały się największą zawartością suchej masy w roku, w którym odnotowano wyższą temperaturę i niższą ilość opadów niż przeciętnie w wieloleciu. Wskazaną zależność zaobserwowano także w badaniach własnych.

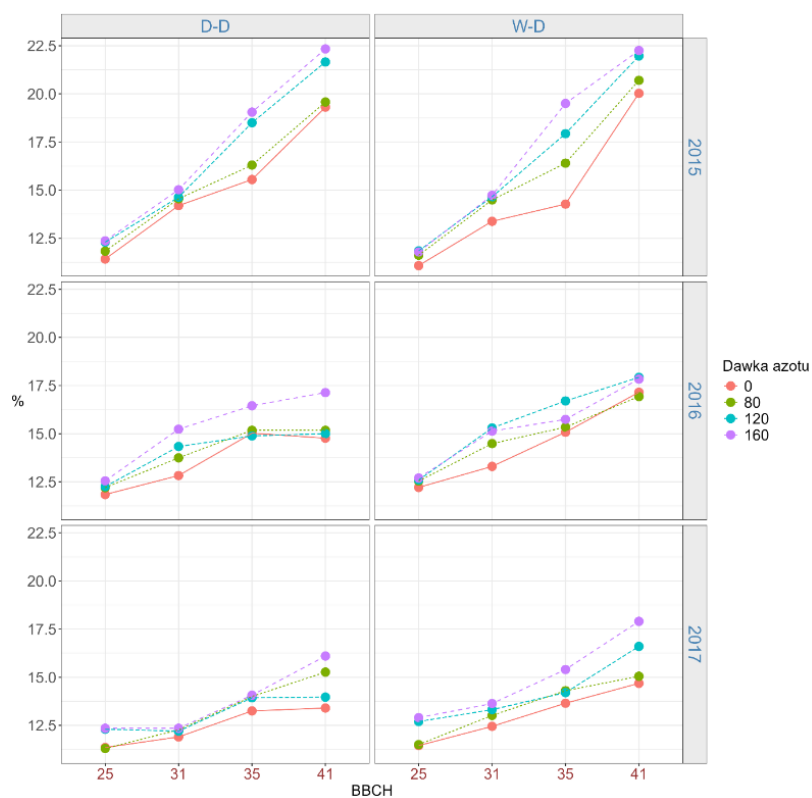
Podobną zależność zaobserwowali Szmigiel i in. (2014) w uprawie buraka pastewnego zastosowane dawki azotu wpływały na wzrost zawartości suchej masy w korzeniach jednak różnice te nie były istotne statystycznie, natomiast warunki pogodowe w latach badań istotnie modyfikowały zawartość suchej masy. Buraczyńska (2005) udowodniła, że nawożenie mineralne istotnie obniża, a organiczne zwiększa zawartość suchej masy w korzeniach i liściach buraka.

Tabela 20. Zawartość suchej masy w liściach i korzeniach buraka cukrowego

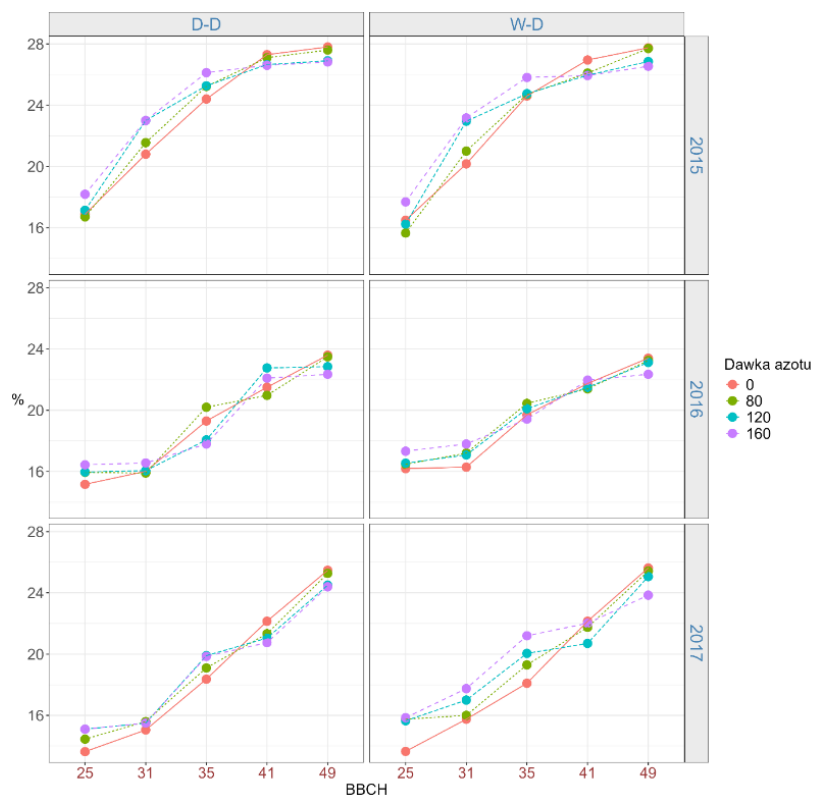
Efekty czynników głównych ich współdziałanie		Sucha masa liści (%)				Sucha masa korzeni (%)				
		Faza BBCH				Faza BBCH				
		25	31	35	41	25	31	35	41	49
Lata	2015	11,8 b	14,5 a	17,2 a	21,0 a	16,9 a	22,0 a	25,1 a	26,6 a	27,2 a
	2016	12,4 a	14,3 a	15,5 b	16,5 b	16,3 b	16,6 b	19,4 b	21,7 b	23,1 c
	2017	12,0 ab	12,6 b	14,1 c	15,4 c	14,9 c	16,0 c	19,5 b	21,5 b	25,0 b
Forma	D-D	12,0 a	13,6 a	15,5 a	17,0 a	15,9 a	17,9 a	21,1 a	23,4 a	25,1 a
	W-D	12,1 a	14,0 a	15,7 a	18,3 a	16,1 a	18,5 a	21,5 a	23,2 a	25,1 a
Dawka	0	11,6 c	13,0 c	14,5 d	16,6 c	15,3 c	17,3 b	20,7 b	23,6 a	25,6 a
	80	11,8 bc	13,8 b	15,3 c	17,1 c	15,8 bc	17,9 b	21,5 a	23,1 a	25,5 a
	120	12,3 ab	14,1 ab	16,0 b	17,9 b	16,1 ab	18,6 a	21,4ab	23,1 a	24,9 b
	160	12,4 a	14,3 a	16,7 a	18,9 a	16,8 a	19,0 a	21,7 a	23,2 a	24,4 c
Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
Lata x Forma azotu		*	***	r.n.	r.n.	***	**	*	r.n.	r.n.
Lata x Dawka azotu		r.n.	*	***	r.n.	*	**	***	*	*
Lata x Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1, r.n. - różnica nieistotna

Rysunek 24. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian suchej masy w liściach buraka



Rysunek 25. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian suchej masy w korzeniach buraka



## 5.9. Świeża masa liści i korzeni z pojedynczej rośliny

Świeża masa liści i korzeni z pojedynczej rośliny były istotnie kształtowane przez warunki pogodowe w latach prowadzenia badań, formę oraz dawkę nawożenia azotem (Tab.21). Stwierdzono również współdziałanie lat i formy azotu, lat i dawki azotu, formy i dawki azotu oraz lat prowadzenia badań z formą i dawką azotu. W tabeli 21 przedstawiono analizę wariancji dla świeżej masy liści i korzeni, przedstawiono również dynamikę zmian świeżej masy liści i korzeni w poszczególnych fazach rozwojowych BBCH, w zależności od lat, formy oraz dawki azotu (Rys. 26-27).

Świeża masa liści była istotnie kształtowana w latach prowadzenia badań (Tab.21). W fazie BBCH 25 i 31 największą masę liści odnotowano w roku 2015, a w fazach BBCH 35 i 41 w roku 2017. Forma azotu miała również istotny wpływ na badany parametr. W fazie BBCH 25 korzystniejsza okazała się forma W-D, w fazie BBCH 31 i 35 forma D-D, natomiast w fazie BBCH 41 nie odnotowano istotnego wpływu formy azotu na świeżą masę liści. Pod wpływem dawki azotu, w fazie BBCH 25 największy przyrost świeżej masy liści odnotowano pod wpływem dawki  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , natomiast w fazach BBCH 31, 35 i 41 największy przyrost wystąpił pod wpływem dawki  $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Tab.21).

Świeża masa korzeni była także istotnie kształtowana przez warunki termiczno-wilgotnościowe w latach prowadzenia badań (Tab. 21). Istotne wzrosty badanego parametru odnotowano w fazach BBCH 25 i 31 w roku 2015 oraz w fazie BBCH 35 w roku 2017 i w fazie BBCH 41 w roku 2016. Forma azotu miała istotny wpływ na świeżą masę korzeni w fazach rozwojowych BBCH 31 i 41. W fazie BBCH 31 pod wpływem formy D-D zaobserwowano wzrost świeżej masy korzenia o 120 g w porównaniu do formy W-D. W fazie BBCH 41 natomiast istotny wzrost świeżej masy korzenia odnotowano pod wpływem zastosowania formy W-D. Największe przyrosty świeżej masy korzeni stwierdzono pod wpływem dawki  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  we wszystkich fazach rozwojowych buraka cukrowego.

Podobną zależność odnotowali Hasanen i in. (2013), którzy badali przyrost świeżej masy korzeni w różnych fazach rozwojowych buraka cukrowego pod wpływem dawek nawożenia azotem 0, 150, 250,  $350 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Udowodniono, iż świeża masa korzeni wzrastała wraz ze wzrostem nawożenia azotem w porównaniu do obiektu nienawożonego w każdej z faz rozwojowych buraka cukrowego. W badaniach przeprowadzonych przez Sarhan i in. (2012) świeża masa korzeni również była istotnie kształtowana pod wpływem nawożenia azotem, istotnie większe przyrosty tego parametru zaobserwowano nawożąc wzrastającymi dawkami N od  $40$  do  $80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Podobne wyniki otrzymali Mahmoud i in. (2012) stosując dawki 60, 80 i 100 kg·ha<sup>-1</sup>, świeża masa korzeni wzrastała wraz ze wzrostem nawożenia azotem i również największą masę odnotowano pod wpływem najwyższej dawki azotu. Ismail (2005) zaobserwował, że zwiększenie dawki azotu z 69 do 115 kg·ha<sup>-1</sup> wpłynęło na wzrost świeżej masy korzeni. W badaniach przeprowadzonych przez Leilah i Khan (2021) zastosowanie mocznika w dawkach 165, 220 i 275 kg·ha<sup>-1</sup> przyczyniło się także do przyrostu świeżej masy korzeni buraków cukrowych.

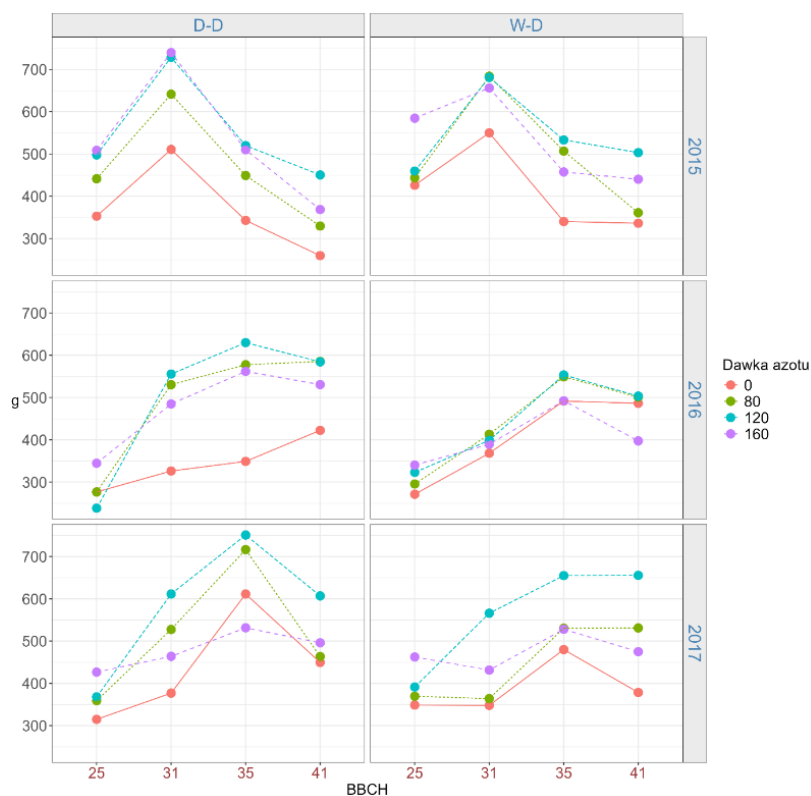
W badaniach Abdallah i Mekdad (2015) zwiększenie nawożenia azotem ze 100 do 140 kg·ha<sup>-1</sup> również przyczyniło się do wzrostu świeżej masy korzeni o 170g. Przyrosty masy korzenia pod wpływem wzrastających dawek azotu - 0, 60, 120 i 180 kg·ha<sup>-1</sup> odnotowała również w swoich badaniach Prośba-Białczyk (2004) i Michalska-Klimczak i Wyszyński (2010).

Tabela 21. Świeża masa liści z pojedynczej rośliny i świeża masa pojedynczego korzenia

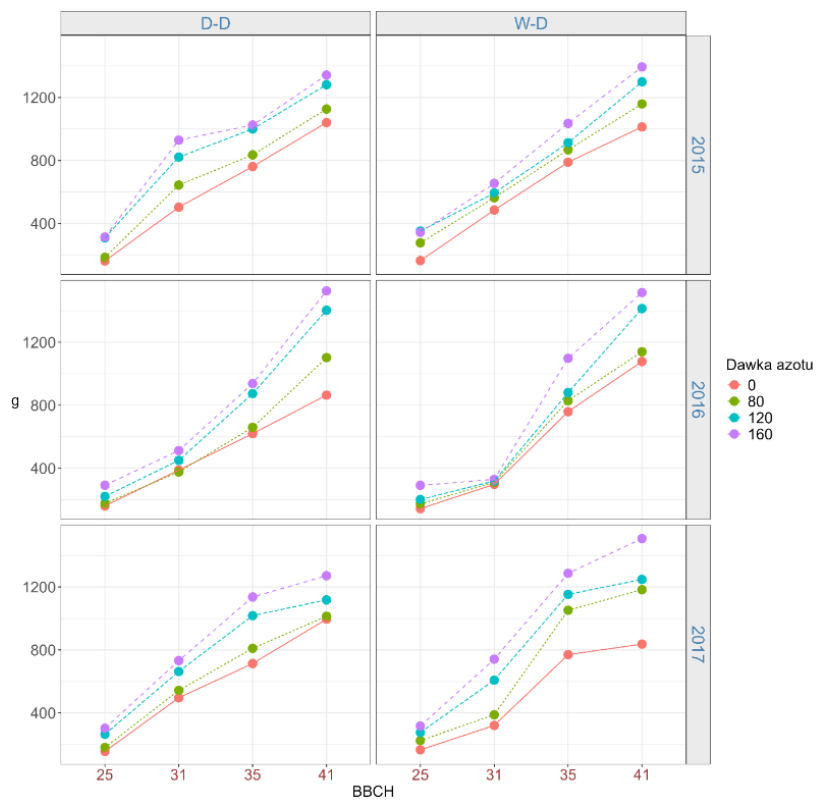
Efekty czynników głównych i ich współdziałanie		Świeża masa liści z pojedynczej rośliny (g)				Świeża masa pojedynczego korzenia (g)			
		Faza BBCH				Faza BBCH			
		25	31	35	41	25	31	35	41
Lata	2015	464 a	649 a	458 c	381 b	263 a	649 a	903 b	1207 b
	2016	296 c	433 b	526 b	501 a	207 c	373 c	832 c	1255 a
	2017	380 b	461 b	600 a	507 a	236 b	562 b	993 a	1147 c
Forma	D-D	367 b	542 a	546 a	462 a	227 a	588 a	866 a	1174 b
	W-D	393 a	488 b	510 b	464 a	244 a	468 b	953 a	1232 a
Dawka	0	332 d	413 c	436 c	389 c	158 d	415 d	756 d	972 d
	80	364 c	527 b	555 b	462 b	203 c	471 c	842 c	1121 c
	120	380 b	590 a	607 a	551 a	271 b	576 b	973 b	1294 b
	160	445 a	528 b	514 b	451 b	310 a	650 a	1087 a	1426 a
Forma azotu x Dawka azotu		***	*	r.n.	r.n.	*	r.n.	*	*
Lata x Forma azotu		***	r.n.	***	**	***	r.n.	r.n.	**
Lata x Dawka azotu		***	*	*	**	***	***	r.n.	***
Lata x Forma azotu x Dawka azotu		***	*	***	*	*	***	r.n.	***

Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05, r.n. - różnica nieistotna

Rysunek 26. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian świeżej masy liści z pojedynczej rośliny



Rysunek 27. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian świeżej masy pojedynczego korzenia

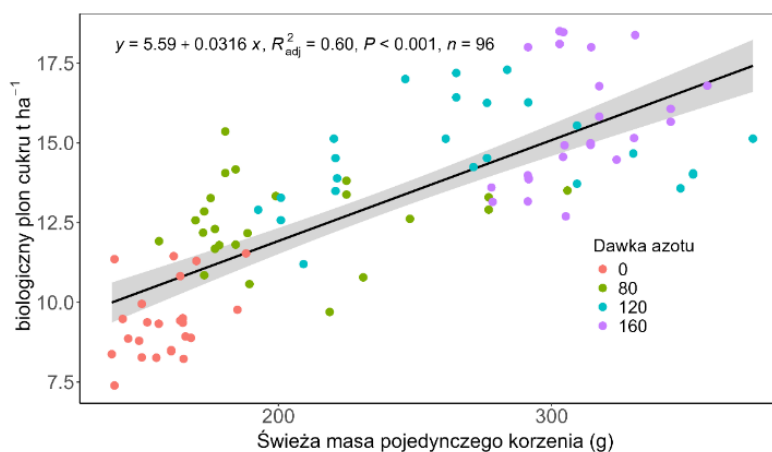




## 5.10. Świeża masa pojedynczego korzenia a plon biologiczny cukru

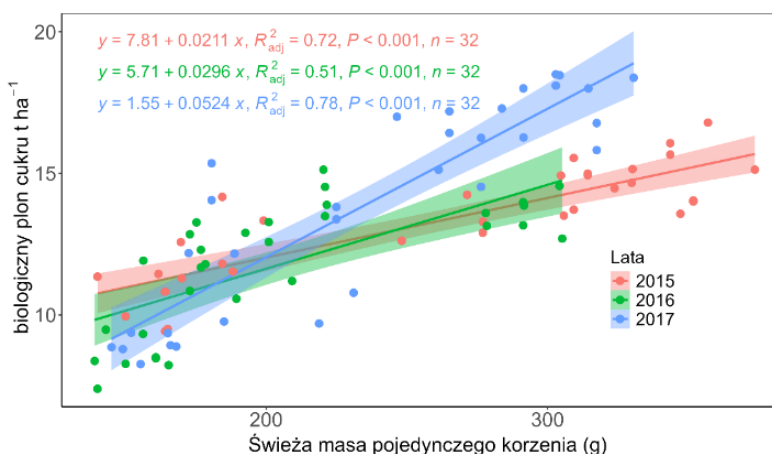
Świeża masa pojedynczego korzenia we wszystkich badanych fazach BBCH istotnie wyjaśniała zmienność plonu biologicznego cukru. Obliczone równanie regresji (Rys. 28) dla modelu w układzie 3-letniego doświadczenia z dwiema zmiennymi (dawką i formą azotu,  $n=96$ ) wskazuje, że świeża masa pojedynczego korzenia określona w fazie BBCH 25 w 60% wyjaśnia zmienność plonu biologicznego cukru.

Rysunek 28. Zależność pomiędzy św. m. pojedynczego korzenia a plonem biologicznym cukru



Porównując lata badań (Rys. 29) stwierdzono największy współczynnik determinacji dla omawianych zależności w 2017 roku ( $R^2 = 0,78$ ), a najmniejszy w 2016 roku ( $R^2 = 0,51$ ).

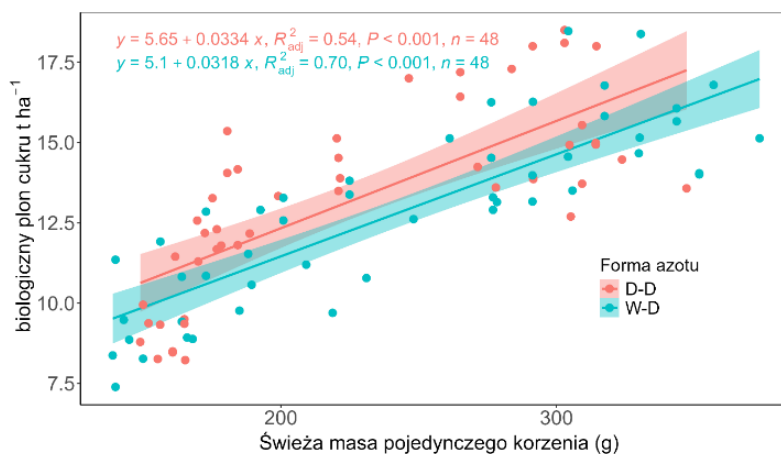
Rysunek 29. Świeża masa pojedynczego korzenia a biologiczny plon cukru w latach badań



Zarówno przy zastosowaniu formy azotu D-D jak i W-D określono dodatnią zależność pomiędzy świeżą masą pojedynczego korzenia a plonem biologicznym cukru w korzeniach

(Rys. 30). Pod wpływem zastosowania formy W-D azotu odnotowano silniejszy związek liniowy niż po zastosowaniu formy azotu D-D.

Rysunek 30. Świeża masa pojedynczego korzenia a biologiczny plon cukru dla form N



### 5.11. Zawartość azotu w korzeniach

Zawartość azotu w korzeniach buraka cukrowego była istotnie kształtowana przez warunki pogodowe w latach prowadzenia badań oraz dawkę azotu (Tab.22). W tabeli 22 przedstawiono analizę wariancji dla zawartości azotu w korzeniach, przedstawiono również dynamikę zmian zawartości azotu w korzeniach w poszczególnych fazach rozwojowych BBCH, w zależności od lat, formy oraz dawki azotu (Rys. 31).

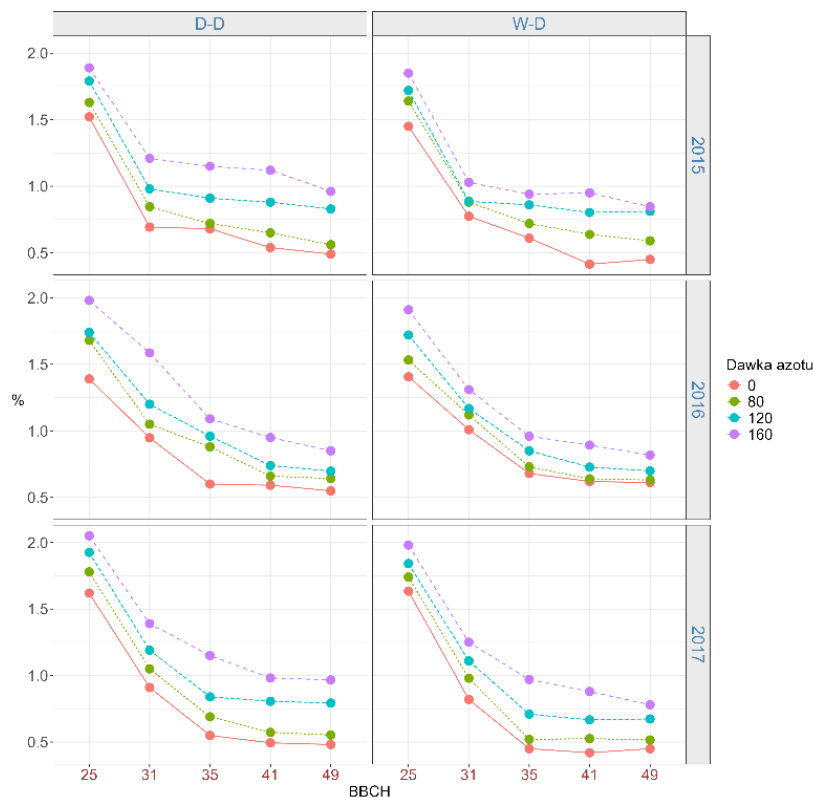
Zawartość azotu w korzeniach była istotnie kształtowana przez warunki pogodowe w latach prowadzenia badań (Tab. 22). Największą zawartością azotu cechowały się rośliny w roku 2017, w fazie BBCH 25 i 31, a także w roku 2016 w fazie BBCH 35, a w roku 2015 w fazie BBCH 41. W latach prowadzenia badań nie stwierdzono natomiast wpływu warunków pogodowych na zawartość azotu w korzeniach podczas zbioru, czyli w fazie BBCH 49. Forma azotu nie miała wpływu na zawartość azotu w korzeniach we wszystkich fazach rozwojowych buraka cukrowego. Pod wpływem dawki azotu  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  we wszystkich fazach rozwojowych odnotowano istotny przyrost zawartości azotu w korzeniach, w porównaniu do roślin nienawożonych, a także dawki  $80$  i  $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Tab. 22). Również w badaniach przeprowadzonych przez Kurus (2006) zwiększenie dawki azotu z  $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  na  $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  wpłynęło na istotny przyrost zawartości azotu w korzeniach. Natomiast w badaniach przeprowadzonych przez Zimny i Kuc (2005) zwiększanie dawek nawożenia azotem na poziomie  $50, 100, 150$  i  $200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  przyczyniło się do obniżenia średniej ilości azotu w korzeniach.

Tabela 22. Zawartość azotu w korzeniach (% s.m.)

Efekty czynników głównych i ich współdziałanie		BBCH 25	BBCH 31	BBCH 35	BBCH 41	BBCH 49
Lata	2015	1,69 b	0,91 b	0,82 ab	0,75 a	0,69 a
	2016	1,67 b	1,17 a	0,84 a	0,73 a	0,69 a
	2017	1,82 a	1,09 a	0,73 b	0,67 a	0,65 a
Forma	D-D	1,75 a	1,09 a	0,85 a	0,75 a	0,70 a
	W-D	1,70 a	1,03 a	0,75 a	0,68 a	0,66 a
Dawka	0	1,50 c	0,86 c	0,59 c	0,51 c	0,51 d
	80	1,67 bc	0,99 b	0,71 bc	0,61 bc	0,58 c
	120	1,79 ab	1,09 b	0,85 b	0,77 b	0,75 b
	160	1,64 a	1,30 a	1,04 a	0,96 a	0,87 a
Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
Lata x Forma azotu		r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
Lata x Dawka azotu		r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
Lata x Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1, r.n. - różnica nieistotna

Rysunek 31. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian zawartości N w korzeniach



## 5.12. Akumulacja azotu w korzeniach buraków cukrowych

W tabeli 23 przedstawiono analizę wariancji dla akumulacji azotu w korzeniach buraka cukrowego. Stwierdzono istotność oddziaływania zarówno badanych zmiennych jak i ich współdziałania w latach prowadzenia badań.

Tabela 23. Analiza wariancji dla akumulacji N w korzeniach buraka ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )

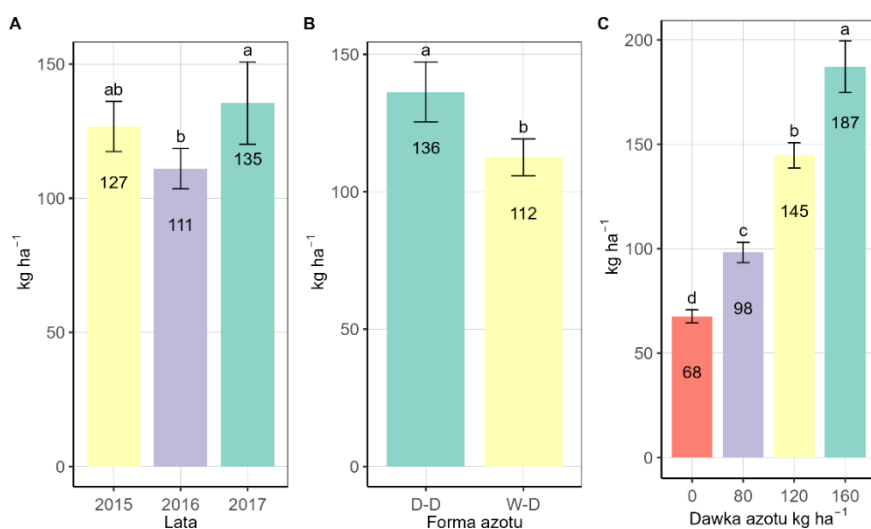
Analiza wariancji (rodzaje zmienności)	Stopnie swobody	Sumy kwadratów odchyień	Średnie kwadraty odchyień	Statystyka testowa F	Pr (F)	Istotność
Bloki	2	480.6	240.3	0.468	0.62997	
Forma azotu	1	10219	10219	58,6	0.01665	*
Nieścistość (błąd) I	2	348.9	174.4			
Dawka azotu	3	148710	49570	422	0.00000	***
Forma azotu x Dawka azotu	3	9519.5	3173.2	27.0	0.00001	***
Nieścistość (błąd) II	12	1409	117.4			
Lata	2	7365.0	3682.5	7.18	0.00265	**
Lata x Forma azotu	2	4778.8	2389.4	4.66	0.01673	*
Lata x Dawka azotu	6	14 130	2355.1	4.59	0.00181	**
Lata x Forma azotu x Dawka azotu	6	3383.4	563.9	1.10	0.38382	r.n.
Nieścistość (błąd) III	32	16403.6	512.6			

Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05, r.n. - różnica nieistotna

Akumulacja azotu w korzeniach buraka cukrowego była istotnie modyfikowana przez warunki pogodowe w latach prowadzenia badań. Najwięcej azotu zakumulowały korzenie w roku 2017, najmniej natomiast w roku 2016 (Rys. 32-A).

Pod wpływem formy D-D korzenie pobrały  $136 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a pod wpływem formy W-D  $112 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Rys. 32-B). Akumulacja azotu w korzeniach wzrastała wraz ze wzrostem dawki azotu. Najwięcej azotu zakumulowały rośliny nawożone dawką azotu  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , najmniej natomiast rośliny nienawożone (Rys. 32-C). Podobną zależność zaobserwowano także w badaniach przeprowadzonych przez Van Eerd i in. (2012) gdzie stosując zwiększające się dawki azotu w postaci saletry amonowej zwiększało się pobranie azotu przez korzenie.

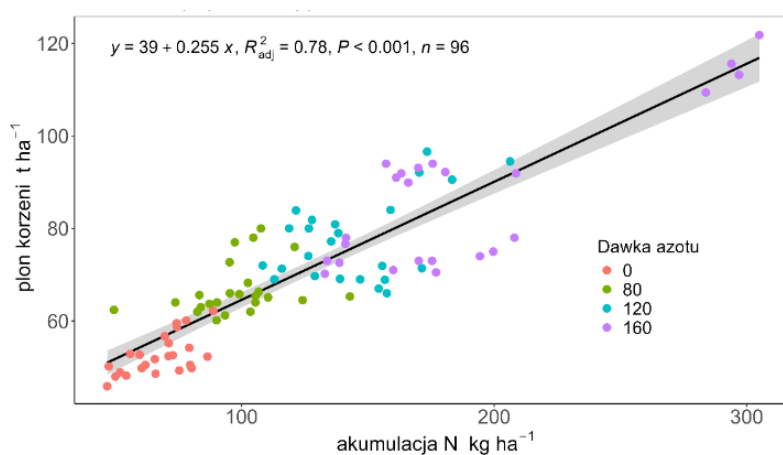
Rysunek 32. Efekty główne dla akumulacji azotu w korzeniach buraka



### 5.12.1. Akumulacja N w korzeniach a plon korzeni buraka

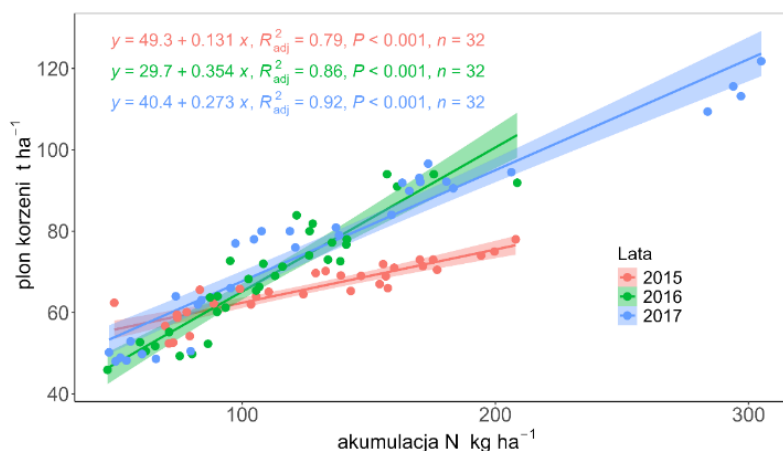
Akumulacja azotu w korzeniach istotnie wpływała na wielkość plonu korzeni buraka cukrowego (Rys. 33). Obliczone równanie regresji dla modelu w układzie 3-letniego doświadczenia z dwoma zmiennymi (dawką i formą azotu, n=96) wskazuje, że akumulacja azotu w 78% wyjaśnia zmienność plonów korzeni buraka cukrowego.

Rysunek 33. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a plonem św. m. korzeni buraka



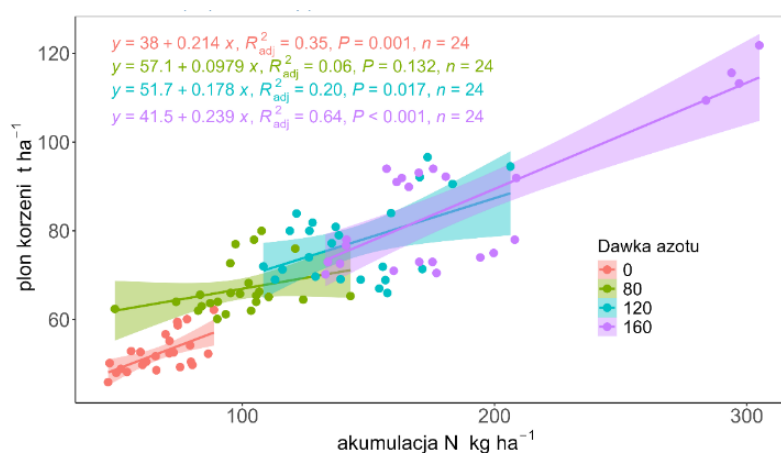
Porównując lata badań (Rys. 34) stwierdzono największy współczynnik determinacji dla omawianych zależności w 2017 roku ( $R^2 = 0,92$ ), a najmniejszy w 2015 roku ( $R^2 = 0,79$ ).

Rysunek 34. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a plonem korzeni w latach badań



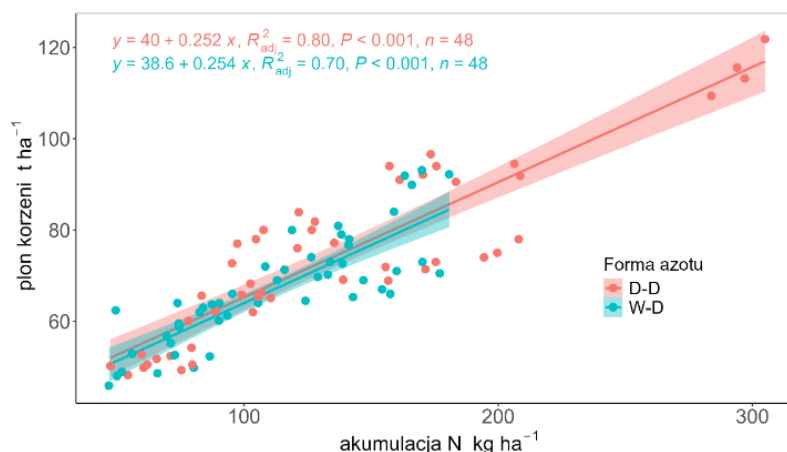
Dla dawki azotu 120 i 160  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  stwierdzono istotny wpływ akumulacji azotu w korzeniach na ich plon, natomiast przy dawce azotu 80  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  nie stwierdzono takiej znaczącej zależności (Rys. 35).

Rysunek 35. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a plonem korzeni dla dawek azotu



Zarówno przy zastosowaniu formy azotu D-D jak i W-D określono znaczący wpływ akumulacji azotu na plon korzeni buraka (Rys. 36). Przy zastosowaniu nawożenia azotem w formie D-D uwidacznia się jednak silniejszy efekt oddziaływania akumulacji azotu na plon korzeni buraka.

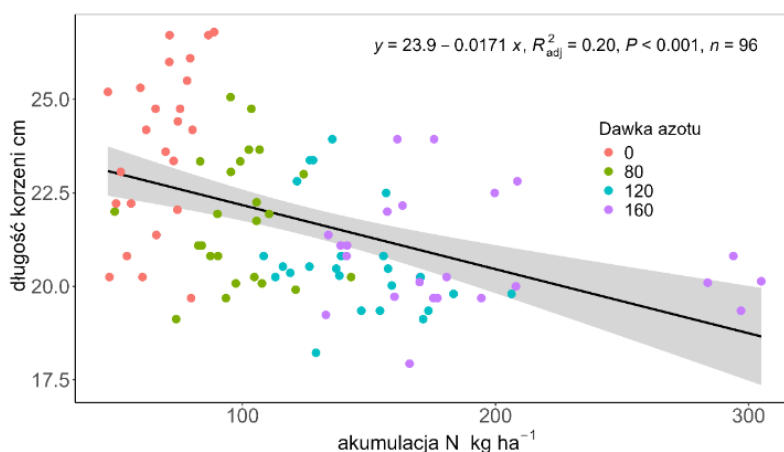
Rysunek 36. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a plonem korzeni św. m. dla form N



### 5.12.2 Akumulowanie N w korzeniach a długość korzeni

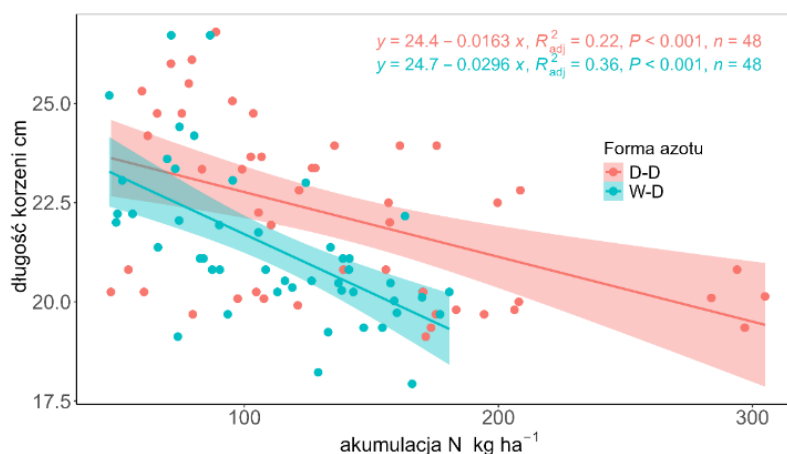
Zwiększenie pobrania azotu w korzeniach istotnie wpływało na skrócenie długości korzeni buraka cukrowego we wszystkich badanych fazach BBCH. Obliczone równanie regresji dla modelu w układzie 3-letniego doświadczenia z dwoma zmiennymi (dawką i formą azotu,  $n=96$ ) wskazuje, że akumulacja azotu w 20% wyjaśnia zmienność długości korzeni buraka cukrowego w fazie BBCH 41 (Rys. 37).

Rysunek 37. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a długością korzeni



Zarówno przy zastosowaniu formy azotu D-D jak i W-D stwierdzono znaczący wpływ akumulacji azotu na skrócenie długości korzeni buraka (Rys. 38). Przy zastosowaniu nawożenia azotem w formie W-D uwidacznia się jednak silniejszy efekt oddziaływania akumulacji azotu na zmniejszenie długości korzeni.

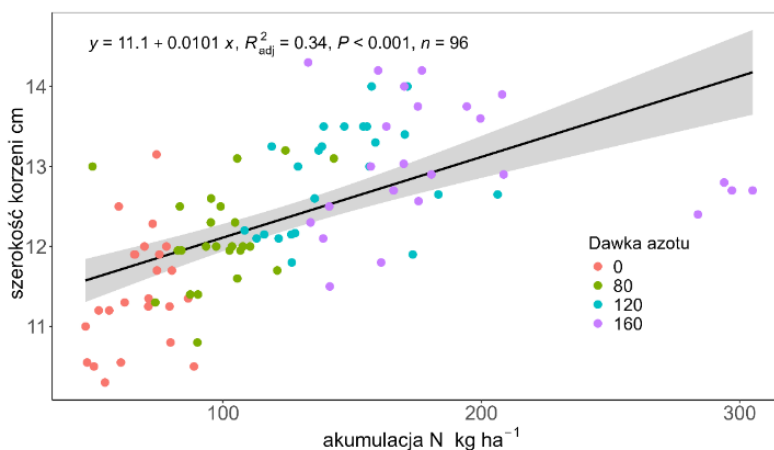
Rysunek 38. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a długością korzeni dla form N



### 5.12.3 Akumulowanie N w korzeniach a szerokość korzeni

Zwiększenie pobrania azotu przez korzenie istotnie wpływało na zwiększenie szerokości korzeni buraka cukrowego we wszystkich badanych fazach BBCH. Obliczone równanie regresji dla modelu w układzie 3-letniego doświadczenia z dwoma zmiennymi (dawką i formą azotu,  $n=96$ ) wskazuje, że akumulacja azotu w 34% wyjaśnia zmienność szerokości korzeni buraka cukrowego w fazie BBCH 41 (Rys. 39).

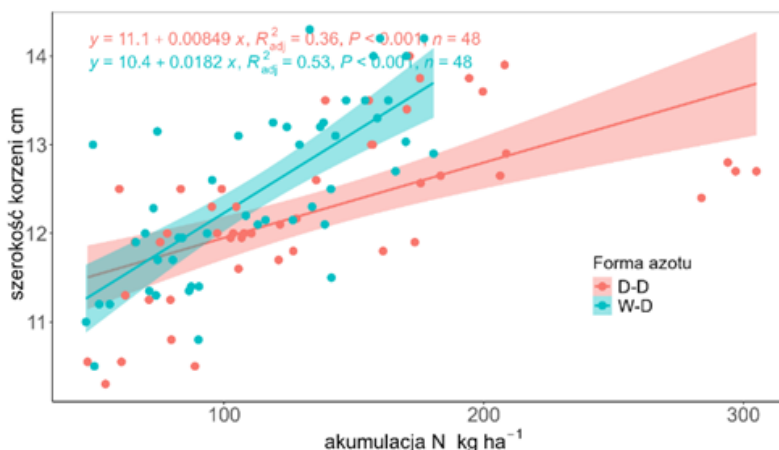
Rysunek 39. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a szerokością korzeni



Zarówno przy zastosowaniu formy azotu D-D jak i W-D określono znaczący wpływ akumulacji azotu na zwiększenie szerokości korzeni buraka (Rys. 40). Przy zastosowaniu nawożenia azotem w formie W-D uwidacznia się jednak silniejszy efekt oddziaływania akumulacji azotu na zwiększenie szerokości korzeni (BBCH 41).



Rysunek 40. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a szerokością korzeni dla form azotu



### 5.13 Reduktaza azotanowa (NR)

Reduktaza azotanowa (EC 1.7.1.1 - 3; NR, ang. nitrate reductase) jest kluczowym enzymem metabolizmu azotowego roślin, dzięki któremu możliwa jest asymilacja jonów azotanowych. NR katalizuje reakcję redukcji azotanów do azotynów, które przy udziale kolejnych enzymów redukowane są do jonów amonowych ostatecznie wbudowywanych w związki organiczne. Wszystkie te przemiany (łącznie z pobieraniem z gleby związków azotowych) powiązane są z procesem fotosyntezy, który zapewnia energię i związki węglowe (Buchanan i in., 2015). Reduktaza azotanowa istotnie wpływa na pobieranie i wykorzystanie azotu przez rośliny oraz utrzymanie właściwego stosunku C:N w tkankach (Reda i in., 2000). Pomimo, że reduktaza azotanowa jest jednym z najczęściej badanych enzymów metabolizmu azotowego roślin to wciąż istnieje wiele niejasności i kontrowersji dotyczących jego funkcjonowania i roli w roślinach. W przeważającej większości badania prowadzone są na roślinach rosnących w kulturach hydroponicznych i zazwyczaj w jednym określonym stadium rozwojowym. Mało jest badań aktywności enzymu w warunkach bardziej naturalnych (Chen i Huang 2020, Chen in. 2004; Sacała i in. 2012).

Badania własne przeprowadzono w warunkach naturalnych z zastosowaniem nawozów azotowych stosowanych w rolnictwie. Aktywność enzymu określano w liściach buraka cukrowego cztery razy w trakcie sezonu wegetacyjnego po zastosowaniu różnych form D-D i W-D w czterech różnych dawkach. W badaniach własnych stwierdzono duże różnice aktywności enzymu w latach prowadzenia badań (Tab. 24). W roku 2016 była ona od 1,7 do 3 razy wyższa w porównaniu do aktywności w roku 2017. Warto nadmienić, że zdecydowanie wyższa aktywność NR w liściach roślin uprawianych w roku 2016 nie

skutkowała wzrostem zawartości azotu- $\alpha$ -aminowego w korzeniach buraka (Tab. 8). W trzech kolejnych latach prowadzenia eksperymentu wielkość tego parametru utrzymywała się na podobnym poziomie, przy czym mniejsze ilości związków aminowych były gromadzone gdy stosowano formę W-D. W trakcie sezonu wegetacyjnego aktywność enzymu utrzymywała się na stosunkowo wysokim poziomie, wykazywała jednak dużą zmienność. Największą aktywność odnotowano w fazie BBCH 25 charakteryzującej się intensywnym wzrostem roślin, zaś w późniejszych fazach aktywność była mniejsza. Duże wahania aktywności NR wynikały zapewne z dużej wrażliwości enzymu na czynniki środowiskowe takie jak temperatura, natężenie światła, dostępność wody oraz jej zawartość w roślinie. Należy zaznaczyć, że w roślinach enzym ten podlega wielokierunkowej kontroli przez czynniki zewnętrzne i wewnętrzne, co warunkuje korzystny przebieg przemian azotowych oraz sprawne włączanie nieorganicznej formy azotu w związki organiczne (Campbell, 1999; Reda i in., 2000; Buchanan i in., 2015). Doświadczenia Sacała i in. (2012) przeprowadzone na dwóch odmianach buraka cukrowego również wykazały znaczną zmienność aktywności enzymu w różnych fazach rozwojowych roślin.

Analizując wpływ różnych form azotu na aktywność enzymu stwierdzono, że niezależnie od zastosowanej formy lub nawet braku nawożenia azotem, jego aktywność w trakcie całego sezonu wegetacyjnego utrzymywała się na stosunkowo wysokim poziomie (Tab. 24). Zastosowanie formy W-D przyczyniało się do wzrostem aktywności NR w dwóch pierwszych fazach (BBCH 25, BBCH 31). W fazie BBCH 41 trend ten uległ odwróceniu. Zróżnicowane nawożenie, w kontekście dawek azotu, również istotnie statystycznie wpłynęło na aktywność enzymu. W początkowej fazie wzrostu buraka cukrowego (BBCH 25) najwyższą aktywność enzymu odnotowano w liściach roślin nawożonych dawką azotu  $80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , dla pozostałych dawek różnice nie były istotne statystycznie.

W kolejnych fazach wzrostu roślin zmienność była większa i z wyjątkiem fazy BBCH 35 największą aktywnością charakteryzowały się rośliny nienawożone. W większości roślin reduktaza azotanowa jest enzymem indukowanym przez substrat, pojawia się, gdy są dostępne azotany. Do indukcji reduktazy azotanowej wystarczające są bardzo niskie stężenia azotanów. Przy dużej podaży azotanów są one akumulowane w wakuolach komórek roślinnych. Obecność jonów amonowych oraz metabolitów azotowych może hamować aktywność enzymu. Przyjmując, że aktywność NR odzwierciedla stan pobierania i wykorzystanie azotu azotanowego przez rośliny, obserwowany spadek aktywności enzymu po zastosowaniu nawożenia azotowego wskazuje, że jony amonowe stanowiły ważne źródło azotu dla roślin nawożonych badanymi nawozami. Jak wcześniej wspomiano wyjątkiem była pierwsza

badana faza (BBCH 25), w której najwyższą aktywność enzymu odnotowano dla dawki azotu 80 kg N ha<sup>-1</sup>. (Chen i Huang, 2020) stwierdzili wzrost aktywności reduktazy azotanowej w liściach kukurydzy wraz ze wzrostem dawki azotu, niezależnie od jego formy (azotanowa, monowa, mocznik). Natomiast (Balotf i in., 2016) wykazali, że aktywność NR zależy zarówno od ilości dostępnego azotu jak i jego formy. Największa aktywność enzymu odnotowali w obecności azotanu potasu, mniejszą w obecności azotanu amonowego, a najniższą w obecności chlorku amonu. (Chen i in., 2004) badając rzepak, kapustę pekińską i szpinak rosnące w kulturach glebowych w obecności wzrastających dawek azotanów stwierdzili, że istnieje pewne progowe stężenie azotanów powyżej którego nie obserwuje się dalszego wzrostu aktywności enzymu.

W doświadczeniu przeprowadzonym na różnych genotypach buraka cukrowego (Petrović i Kastori, 1990) wykazali, że zwiększenie stężenia azotanów w pożywce powoduje wzrost aktywności reduktazy azotanowej, ale reakcja badanych odmian nie była jednakowa. Podsumowując, nie stwierdzono wyraźnych zależności pomiędzy aktywnością NR a badanymi parametrami wzrostowymi i technologicznymi buraka cukrowego. Obserwowana w warunkach naturalnych duża zmienność aktywności reduktazy azotanowej wynikać może z konieczności dostosowania metabolizmu komórkowego do złożonych i dynamicznych warunków środowiska. Zmiany te pokazują, że rośliny niezwykle skutecznie zarządzają dostępnymi formami azotu.

Tabela 24. Aktywność reduktazy azotanowej (nmol (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) g<sup>-1</sup> św. m. godz. <sup>-1</sup>)

Efekty czynników głównych i ich współdziałanie		Faza BBCH			
		25	31	35	41
Lata	2016	918 a	374 a	509 a	407 a
	2017	302 b	222 b	154 b	240 b
Forma	D-D	599 b	262 b	336 a	342 a
	W-D	621 a	333 a	330 a	304 b
Dawka	0	584 b	393 a	342 a	378 a
	80	665 a	311 b	333 ab	302 c
	120	592 b	247 c	310 b	274 d
	160	600 b	239 c	346 a	339 b
Forma azotu x Dawka azotu		***	***	r.n.	**
Lata x Forma azotu		r.n.	***	***	***
Lata x Dawka azotu		**	***	***	***
Lata x Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	***	*	*

Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05, r.n. - różnica nieistotna

#### 5.14 Barwniki fotosyntetyczne

Głównymi barwnikami fotosyntetycznymi roślin są chlorofile (chlorofil *a* oraz chlorofil *b*), obok których występują karotenoidy określone jako barwniki pomocnicze. Umożliwiają one skuteczną absorpcję światła, a karotenoidy pełnią również funkcje ochronne i antyoksydacyjne. W doświadczeniach agronomicznych bardzo często zawartość chlorofilu traktowana jest jako wskaźnik stanu zdrowia roślin oraz zaopatrzenia w azot. Badania własne wykazały, że zawartość barwników fotosyntetycznych w liściach buraka cukrowego była istotnie zróżnicowana w poszczególnych latach badań oraz pod wpływem różnych dawek nawożenia azotowego (Tab. 25-26). Również inni autorzy obserwowali zmienność z roku na rok zawartości chlorofilu w liściach buraka cukrowego (Rochalska, 2005; Wang i in., 2021b) oraz zgodny z oczekiwaniem wzrost jego stężenia wraz ze wzrastającym nawożeniem azotowym (Wang i in., 2021b; Elsayed i in., 2023).

W badaniach własnych, na ogół całkowita zawartość chlorofilu (Chl *a* + Chl *b*) w liściach roślin uprawianych w roku 2015 była większa w porównaniu z latami 2016, 2017. Wyjątek stanowiły rośliny w fazie BBCH 41. Największą zawartość barwników fotosyntetycznych (Chl *a*, Chl *b*, Chl *a* + Chl *b*, karotenoidy) odnotowano po zastosowaniu nawożenia azotowego w dawkach 120 i 160 kg·ha<sup>-1</sup>. W wielu przypadkach różnice pomiędzy wartościami uzyskanymi dla tych dawek nie były istotne statystycznie. Natomiast w porównaniu z roślinami nienawożonymi zawartość chlorofilu (Chl *a*, Chl *b*, Chl *a* + Chl *b*) była co najmniej o 20% większa, przy czym zakres zmian dla poszczególnych barwników w różnych fazach rozwojowych mieścił się w dość szerokim zakresie 120-157% zawartości w roślinach nienawożonych. Obserwowane wzrosty zawartości karotenoidów były na poziomie 14-28%.

Warto również zwrócić uwagę na zmiany zawartości barwników w trakcie sezonu wegetacyjnego w odniesieniu do badanych faz rozwojowych. W roku 2017 zawartość chlorofilu (Chl *a*, Chl *b*, Chl *a* + Chl *b*) w liściach roślin utrzymywała się na podobnym poziomie w trakcie całego sezonu wegetacyjnego, natomiast w latach 2015, 2016 fluktuacje były zdecydowanie większe. Dane literaturowe dotyczące zawartości chlorofilu w liściach buraka cukrowego w różnych fazach rozwojowych nie są jednoznaczne. (Rochalska, 2005) w swoich badaniach prowadzonych na buraku cukrowym stwierdziła, że okresie od 60 do 86 dnia po wysiewie nasion zawartość chlorofilu szybko wzrasta, potem powoli, a następnie szybko maleje. Odwrotny kierunek zmian z tendencją wzrostową w kolejnych fazach od siewki do zbioru (z maksimum na etapie zbiorów) zaobserwował (Wang i in., 2021b). Natomiast (Sacała i in., 2012) w doświadczeniu polowym przeprowadzonym na dwóch odmianach buraka

cukrowego stwierdziła, że jedna z nich utrzymywała stały poziom chlorofilu w trakcie całego sezonu wegetacyjnego, natomiast druga odznaczała się dość dużą zmiennością tego parametru. Być może brak ściśle określonego trendu w zachowywaniu się tego parametru wynika z różnic odmianowych.

Tabela 25. Zawartość barwników fotosyntetycznych w liściach buraka (mg·g<sup>-1</sup> św. m.)

Efekty czynników głównych ich współdziałanie		Chlorofil <i>a</i>				Chlorofil <i>b</i>			
		Faza BBCH				Faza BBCH			
		25	31	35	41	25	31	35	41
Lata	2015	0,917 b	1,069 a	0,924 b	0,679 b	0,461 a	0,556 a	0,474 a	0,334 a
	2016	0,848 c	1,075 a	1,047 a	0,872 a	0,307 b	0,302 b	0,322 b	0,287 b
	2017	0,973 a	0,963 b	0,972 b	0,930 a	0,256 c	0,288 b	0,294 c	0,293 b
Forma	D-D	0,934 a	1,035 a	1,000 a	0,849 a	0,348 a	0,377 a	0,371 a	0,304 a
	W-D	0,892 a	1,037 a	0,961 a	0,806 a	0,336 b	0,387 a	0,355 b	0,305 a
Dawka	0	0,784 d	0,909 c	0,860 c	0,758 c	0,262 c	0,307 c	0,321 b	0,266 c
	80	0,875 c	1,018 b	0,955 b	0,860 ab	0,318 b	0,388 b	0,368 a	0,324 ab
	120	0,945 b	1,107 a	1,041 a	0,790 bc	0,374 a	0,420 a	0,379 a	0,298 b
	160	1,046 a	1,108 a	1,067 a	0,901 a	0,412 a	0,414 ab	0,385 a	0,330 a
Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	**	r.n.	**	r.n.	**	**	**
Lata x Forma azotu		r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	*	r.n.
Lata x Dawka azotu		*	***	**	***	***	**	*	***
Lata x Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	r.n.	*	r.n.	r.n.	**	r.n.	**

Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05, r.n. - różnica nieistotna

Tabela 26. Suma chlorofilu i karotenoidów w liściach buraka cukrowego (mg·g<sup>-1</sup> św. m.)

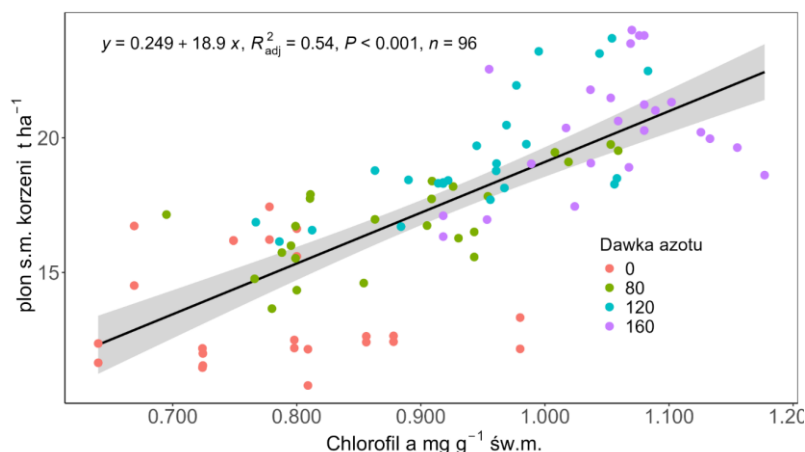
Efekty czynników głównych i ich współdziałanie		Suma chlorofilu				Karotenoidy			
		Faza BBCH				Faza BBCH			
		25	31	35	41	25	31	35	41
Lata	2015	1,379 a	1,626 a	1,398 a	1,012 b	0,276 a	0,348 a	0,320 a	0,219 b
	2016	1,156 c	1,377 b	1,369 a	1,159 a	0,236 b	0,263 b	0,244 b	0,256 a
	2017	1,229 b	1,252 c	1,266 b	1,224 a	0,239 b	0,220 c	0,220 c	0,229 b
Forma	D-D	1,282 a	1,412 a	1,371 a	1,153 a	0,253 a	0,279 a	0,269 a	0,235 a
	W-D	1,227 a	1,424 a	1,317 a	1,111 a	0,248 a	0,276 a	0,254 a	0,234 a
Dawka	0	1,046 d	1,216 c	1,181 c	1,024 b	0,228 c	0,260 b	0,231 c	0,219 c
	80	1,194 c	1,406 b	1,324 b	1,184 a	0,249 b	0,269 b	0,256 b	0,237 ab
	120	1,319 b	1,528 a	1,420 a	1,088 b	0,255 ab	0,283 ab	0,264 b	0,232 bc
	160	1,459 a	1,523 a	1,452 a	1,231 a	0,270 a	0,297 a	0,295 a	0,251 a
Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	***	r.n.	***	***	*	r.n.	*
Lata x Forma azotu		r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
Lata x Dawka azotu		***	***	**	***	**	*	***	***
Lata x Forma azotu x Dawka azotu		r.n.	*	**	r.n.	***	*	r.n.	r.n.

Istotność: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05, r.n. - różnica nieistotna

#### 5.14.1. Chlorofil *a*, a plon suchej masy korzeni

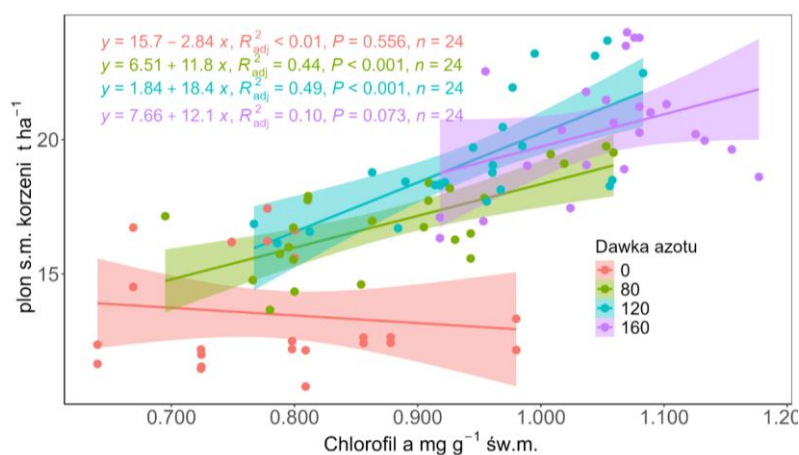
We wszystkich badanych fazach BBCH zawartość chlorofilu *a* w liściach buraka istotnie wyjaśniała zmienność plonu suchej masy korzeni buraka. Dla zobrazowania tych zależności wykonano analizę regresji dla zawartości chlorofilu *a* w fazie BBCH 25 (Rys. 41). Obliczone równanie regresji dla modelu w układzie 3-letniego doświadczenia z dwiema zmiennymi (dawką i formą azotu, n=96) wskazuje, że zawartość chlorofilu w 54% wyjaśnia zmienność plonu suchej masy korzeni buraka cukrowego.

Rysunek 41. Zależność między zawartością chlorofilu *a* w fazie BBCH 25 a plonem s.m. korzeni



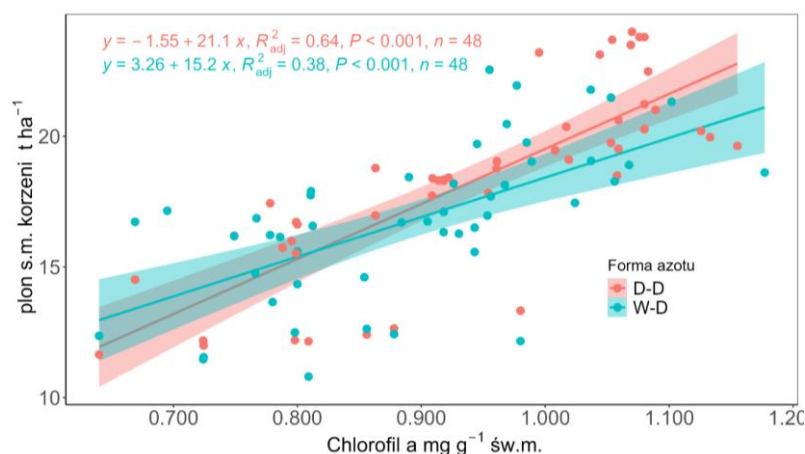
Dla dawki azotu 80 i 120 kg·ha<sup>-1</sup> stwierdzono istotną zależność pomiędzy zawartością chlorofilu *a* i plonem suchej masy korzeni w fazie BBCH 25 (Rys. 42).

Rysunek 42. Zależność między zawartością chlorofilu *a* a plonem s.m. korzeni dla dawki N



Zarówno przy zastosowaniu formy azotu D-D jak i W-D określono dodatnia zależność pomiędzy zawartością chlorofilu *a* w liściach a plonem suchej masy w korzeniach w fazie BBCH 25 (Rys. 43). Pod wpływem zastosowania formy D-D azotu odnotowano silniejszy związek liniowy niż po zastosowaniu formy wolniej działającego azotu W-D.

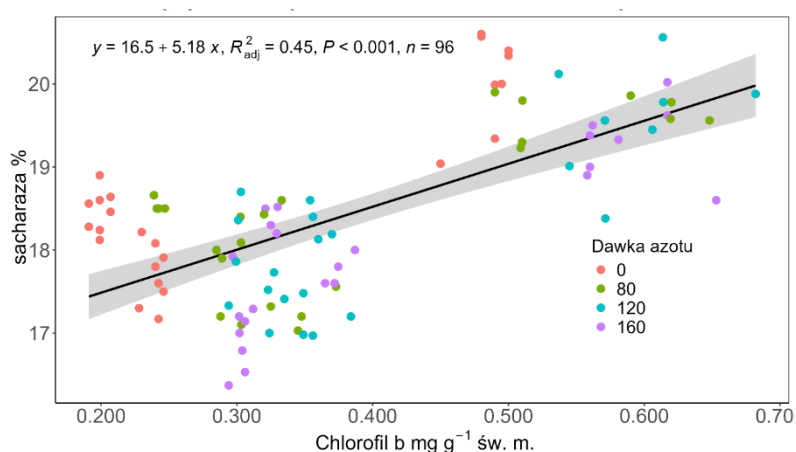
Rysunek 43. Zależność między zawartością chlorofilu *a* a plonem s.m. korzeni dla formy N



### 5.14.2 Chlorofil *b*, a zawartość sacharozy w korzeniach buraka

Zawartość chlorofilu *b* w liściach buraka we wszystkich badanych fazach BBCH istotnie wyjaśniała zawartość sacharozy w korzeniach buraka. Dla zobrazowania tych zależności wykonano analizę regresji dla zawartości chlorofilu w fazie BBCH 31 (Rys. 44). Obliczone równanie regresji dla modelu w układzie 3-letniego doświadczenia z dwoma zmiennymi (dawką i formą azotu,  $n=96$ ) wskazuje, że zawartość chlorofilu w 45% wyjaśnia zmienność ilości sacharozy w korzeniach buraka cukrowego.

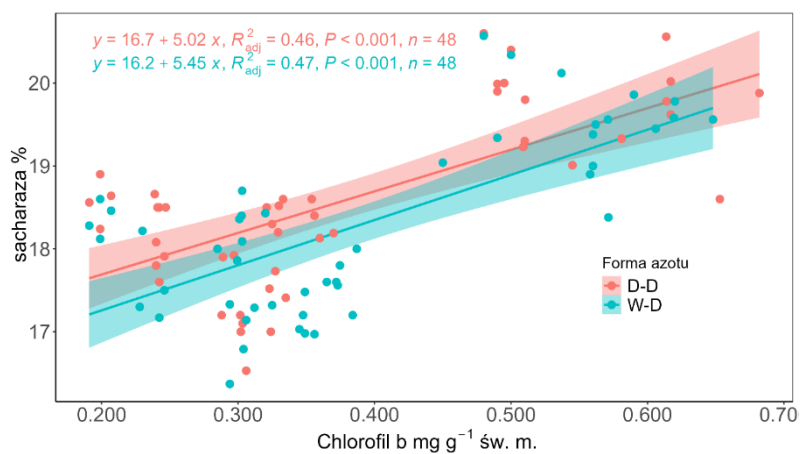
Rysunek 44. Zależność między zawartością chlorofilu *b* a sacharozą w korzeniach



Zarówno przy zastosowaniu formy azotu D-D jak i W-D określono dodatnią zależność pomiędzy zawartością chlorofilu *b* w liściach a ilością sacharozy w korzeniach w fazie BBCH 31 (Rys. 45). Wpływ form azotu na te zależności był bardzo zbliżony.



Rysunek 45. Zależność między zawartością chlorofilu *b* a sacharozą w korzeniach dla formy N



Wyznaczone zależności związane z zawartością chlorofilu *a* i *b*, mogą posłużyć do predykcji plonów suchej masy korzeni buraka oraz zawartości sacharozy.

## 6. Podsumowanie badań

W warunkach przeprowadzonego doświadczenia polowego optymalną dawką pod względem osiągnięcia największych plonów buraka (świeżej i suchej masy korzeni oraz liści) była dawka azotu  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Największy biologiczny i technologiczny plon cukru również osiągnięto przy zastosowaniu największej dawki azotu. Forma szybko działającego azotu (D-D) znacząco zwiększała plony korzeni buraka, w porównaniu do formy wolno działającego azotu (W-D). Natomiast azot w formie W-D znacząco zmniejszył zawartość azotu- $\alpha$ -aminowego, czyli melasotworu, który istotnie ogranicza ekstrakcję cukru z buraków cukrowych.

## 7. Wnioski

1. Plon świeżej i suchej masy korzeni buraka cukrowego był znacząco zróżnicowany w latach badań i istotnie zależał od dawki i formy azotu. Zastosowanie N w formie szybko działającej (D-D) istotnie zwiększyło plony korzeni w porównaniu do formy wolno działającej (W-D). Wzrastające dawki azotu istotnie zwiększały plon korzeni. Pomiędzy głównymi czynnikami doświadczenia (lata, forma i dawka azotu) stwierdzono istotne współdziałania.
2. Wzrastające dawki azotu w latach badań istotnie zwiększały plon liści, natomiast forma azotu nie różnicowała go znacząco.
3. Zawartość sacharozy w korzeniach buraka istotnie malała pod wpływem rosnących dawek azotu, jednak największy technologiczny plon cukru stwierdzono przy dawce azotu  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Forma azotu nie modyfikowała znacząco zawartości sacharozy w korzeniach, natomiast forma D-D istotnie zwiększała technologiczny plon cukru w porównaniu do formy W-D.
4. Rosnące dawki azotu istotnie zwiększały zawartość azotu- $\alpha$ -aminowego w korzeniach, natomiast forma W-D znacząco zmniejszała jego zawartość w porównaniu do formy D-D.
5. Analiza regresji wykazała, że we wszystkich badanych fazach BBCH (25, 31, 35, 41) świeża masa pojedynczego korzenia istotnie wyjaśnia zmienność biologicznego plonu cukru.

6. We wszystkich analizowanych fazach wegetacyjnych buraka zastosowane formy azotu nie miały wpływu na zawartość tego pierwiastka w korzeniach, natomiast wzrastające dawki azotu zwiększały istotnie jego zawartość. Nie stwierdzono znaczącego wpływu współdziałania badanych czynników na ten parametr.
7. Po zastosowaniu azotu w formie D-D akumulacja N w korzeniach buraka była znacząco większa, w porównaniu do formy W-D. Dawka azotu  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  zwiększyła prawie 3-krotnie akumulację tego pierwiastka w porównaniu do obiektu nienawożonego azotem.
8. Akumulacja azotu w korzeniach istotnie wpływała na wielkość plonu świeżej masy korzeni buraka cukrowego wyjaśniając 78% zmienności jego plonu.
9. We wszystkich badanych fazach BBCH zwiększenie pobrania azotu przez korzenie istotnie wpływało na zmniejszenie długości korzeni buraka, natomiast znacząco zwiększało ich szerokość.
10. Aktywność reduktazy azotanowej wykazywała dużą zmienność w latach badań oraz zależała od dawki i formy azotu. Nie stwierdzono wyraźnych zależności pomiędzy aktywnością enzymu, a badanymi parametrami wzrostowymi i technologicznymi buraka cukrowego.
11. Analiza regresji wykazała istotną zależność pomiędzy zawartością chlorofilu *a*, a plonem suchej masy korzeni oraz ilością chlorofilu *b*, a zawartością sacharozy w korzeniach.

## 8. Literatura

- Abdallah A., Mekdad A., 2015, *Sugar beet productivity as affected by nitrogen fertilizer and foliar spraying with boron*, „International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences” 4, nr 4: 181-196.
- Alami L., Terouzi W., Otmani M., Abdelkhalek O., Salmaoui S., Mbarki M., 2021, *Effect of sugar beet harvest date on its technological quality parameters by exploratory analysis*, „Journal of Food Quality” 1: 1-8.
- Antunović M., Varga I., Stipešević B., Ranogajec L., 2021, *Analýza chorvatského cukrovarnického sektoru a produkce cukrové řepy.*, „Listy Cukrovarnické a Reparské” nr 137: 383-386.
- Artyszak A., 2013, *Wydajność produkcji biogazu trzech odmian buraka cukrowego w zależności od nawożenia organicznego*, „Fragmenta Agronomica” 30, nr 4: 11-22.
- Azzazy N. B., 2004, *Yield and quality of some sugar beet varieties as affected by water quality and nitrogen fertilization*, „Egyptian Journal of Agricultural Research” 82, nr 4: 1733-1745.
- Balotf S., Kavooosi G., Kholdebarin B., 2016, *Nitrate reductase, nitrite reductase, glutamine synthetase, and glutamate synthase expression and activity in response to different nitrogen sources in nitrogen-starved wheat seedlings*, „Biotechnology and Applied Biochemistry” 63, nr 2: 220-229.
- Barlóg P., Grzebisz W., Pepliński K., Szczepaniak W., 2013, *Sugar beet response to balanced nitrogen fertilization with phosphorus and potassium part I. Dynamics of beet yield development*, „Bulgarian Journal of Agricultural Science” 19, nr 6: 1311-1318.
- Barlóg P., Grzebisz W., Feć M., Łukowiak R., 2010, *Row methods of sugar beet (Beta vulgaris, L.) fertilization with multi-component fertilizer based on urea- ammonium nitrate solution as a way to increase nitrogen efficiency*, „Journal Central European Agriculture” 11: 225-234.
- Barlóg Przemysław, 2009, *Studia nad żywieniem buraka cukrowego makroelementami ze szczególnym uwzględnieniem sodu*, „Nawozy i Nawożenie” 35: 148.
- Barlóg Przemysław, 2012, *Sodium as an element increasing nitrogen productivity - a case study on sugar beet*, „Journal of Elementology” 18: 7-22.
- Barlóg Przemysław, 2016, *Nawożenie buraka cukrowego sodem*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 4/2016: 38-40.

- Barłóg Przemysław, 2021, *Nawożenie magnezem – klucz efektywnej gospodarki azotem w buraku cukrowym*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 2/2021: 42-46.
- Barłóg Przemysław, Grzebisz W., 2004, *Plonotwórcza i diagnostyczna ocena nawożenia buraków cukrowych potasem z udziałem sodu i magnezu Część I. Plon korzeni i liści*, „Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin” 234: 73-82.
- Bartnik G., Bieganowski A., Bzowska-Bakalarz M. (red.), 2008, *Kodeks dobrych praktyk w produkcji buraków cukrowych: praca zbiorowa*, Lublin.
- Barzegari M., Sepaskhah A. R., Ahmadi S. H., 2017, *Irrigation and nitrogen managements affect nitrogen leaching and root yield of sugar beet*, „Nutrient Cycling in Agroecosystems” 108, nr 2: 211-230.
- Bilir B., Saltali K., 2023, *Effect of nitrogen and boron treatments on harvest index and nitrogen use efficiency in sugar beet*, „Tarim Bilimleri Dergisi” 29, nr 3: 881-894.
- Borówczak F., Grobelny M., Kołata M., Zieliński T., 2006, *Wpływ nawożenia azotem na plony i wartość technologiczną korzeni buraków cukrowych*, „Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering” Vol. 51, nr 3: 11-15.
- Brentrup F., Küsters J., Kuhlmann H., Lammel J., 2001, *Application of the life cycle assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilisers*, „European Journal of Agronomy” 14, nr 3: 221-233.
- Buchanan B. B., Gruissem W., Jones R. L., 2015, *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*.
- Buraczyńska D. J., 2005, *Kształtowanie się zawartości suchej masy i makroskładników w korzeniach i liściach buraka cukrowego pod wpływem nawożenia organicznego i mineralnego*, „Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio E” 60: 19-31.
- Buraczyńska D. J., Ceglarek F., 2003, *Wpływ nawożenia organicznego i mineralnego na jakość przetwórczą korzeni buraka cukrowego*, „Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio E” LVIII: 141-153.
- Campbell W. H., 1999, *Nitrate reductase structure, function and regulation: Bridging the gap between biochemistry and physiology*, „Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology” 50: 277-303.
- Chatterjee A., Subedi K., Franzen D. W., Mickelson H., Cattanach N., 2018, *Nitrogen fertilizer optimization for sugar beet in the red river valley of north Dakota and Minnesota*, „Agronomy Journal” 110, nr 4: 1554-1560.

- Chen B.-M., Wang Z.-H., Li S.-X., Wang G.-X., Song H.-X., Wang X.-N., 2004, *Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables*, „Plant Science” 3, nr 167: 635-643.
- Chen H., Huang L., 2020, *Effect of nitrogen fertilizer application rate on nitrate reductase activity in maize*, „Applied Ecology and Environmental Research” 18: 2879-2894.
- Crnobarac J., Jacimovic G., 2010, *Sugar yield and technological quality of sugar beet at different levels of nitrogen fertilization*, „Research Journal of Agricultural Science, 42 (1)”: 162-167.
- Czernecki B., Głogowski A., Nowosad J., 2020, *Climate: an R package to access free in-situ meteorological and hydrological datasets for environmental assessment*, „Sustainability” 12, nr 1: 394.
- De Souza Braz A. M., Da Costa M. L., Ramos S. J., Dall’agnol R., Fernandes A. R., 2021, *Long term application of fertilizers in eastern amazon and effect on uranium and thorium levels in soils*, „Minerals” 11, nr 9: 994.
- Domska D., Warechowska M., Wojtkowiak K., 2006, *Wpływ techniki nawożenia na plonowanie buraka cukrowego i zawartość cukru w korzeniach*, „Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych” 512, nr 1: 99-104.
- Draycott A. P., Christenson D. R., 2003, *Nutrients for sugar beet production: soil-plant relationships*.
- Dz. U. 2023, poz. 244, b.d., *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 stycznia 2023 r. w sprawie „Programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu”*, „Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej”: 1-130.
- Ebmeyer H., Hoffmann C. M., 2021, *Efficiency of nitrogen uptake and utilization in sugar beet genotypes*, „Field Crops Research” 274: 108-334.
- Eckei J., Well R., Maier M., Matson A., Dittert K., Rummel P. S., 2024, *Determining N<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub> fluxes in relation to winter wheat and sugar beet growth and development using the improved <sup>15</sup>N gas flux method on the field scale*, „Biology and Fertility of Soils”: 1-17.
- El-Kader A., Agron E. M. A., 2011, *Effect of nitrogen fertilizer rates and some growth regulators treatments on sugar beet*, „Journal of Plant Production” 2, nr 12: 1693-1702.
- Elsayed S., El-Hendawy S., Elsherbiny O., Okasha A. M., Elmetwalli A. H., Elwakeel A. E., Ibrahim H. H., 2023, *Estimating chlorophyll content, production, and quality of sugar*

- beet under various nitrogen levels using machine learning models and novel spectral indices*, „Agronomy” 13, nr 11: 2743.
- FAOSTAT, 2022, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>, (dostęp: 25 maja 2024).
- Felipe de Mendiburu, Muhammad Yaseen, 2020, *Agricolae: statistical procedures for agricultural research*.
- Ferweez H., Ibrahim M. F. M., Allan A. M., 2011, *Improving yield and quality of sugar beet using boron at different levels of nitrogen fertilizer*, „Alexandria Science Exchange Journal” 32, nr January-March: 51-57.
- Fotyma E., 2000, *Zasady nawożenia azotem z wykorzystaniem testów glebowych i roślinnych*, „Nawozy i Nawożenie” 02, nr 3a[04]: 17-37.
- Fotyma Ewa, 1996, *Zastosowanie metody Nmin do oceny środowiskowych skutków nawożenia azotem*, „Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych” 440: 440.
- Franzen D. W., 2004, *Delineating nitrogen management zones in a sugar beet rotation using remote sensing - a review*, „Journal of Sugar Beet Research” 41, nr 1: 47-60.
- Freckleton R. P., Watkinson A. R., J. Webb D., Thomas T. H., 1999, *Yield of sugar beet in relation to weather and nutrients*, „Agricultural and Forest Meteorology” 93, nr 1: 39-51.
- Fugol M., Pilarski K., 2011, *Burak cukrowy jako substrat do biogazowni\**, „Inżynieria Rolnicza” 5, nr 130: 63-71.
- Gehl R. J., Boring T. J., 2011, *In-season prediction of sugar beet yield, quality, and nitrogen status using an active sensor*, „Agronomy Journal” 103, nr 4: 1012-1018.
- Głodowska M., Gałazka A., 2018, *Intensyfikacja rolnictwa a środowisko naturalne*, „Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych” 592: 3-13.
- Gniewowska E., Maziarek A., 2015, *Prawidłowa agrotechnika buraków cukrowych*, „OODR Łosiów”: 1-58 .
- Górski D., 2014, *Nawożenie buraka azotem ostrożne, koniecznie dostosowane do potrzeb*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 2/2014: 33-35.
- Grzebisz W., 2015, *Nawożenie buraków cukrowych azotem*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 1/2015: 43-45.
- Grzebisz W., 2002, *Rola azotu w nawożeniu buraka cukrowego*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 1/2002: 19-22.
- Grzebisz W., 2011a, *Technologie nawożenia roślin uprawnych - fizjologia plonowania. Tom 1 Oleiste, okopowe i strączkowe*, „Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne Sp. z o.o.”, Poznań: 189-240.

- Grzebisz W., 2011b, *Gospodarowanie azotem na plantacji buraka cukrowego Część I Wyznaczanie dawki azotu*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 2/2011: 40-43.
- Grzebisz W., 2014, *Nawożenie buraków na starcie dać glebie moc*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 1/2014: 34-36.
- Grzebisz W., 2018, *Azot na start*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 1/2018: 36-39.
- Grzebisz W., 2019, *Azot a plon cukru - zasady nawożenia*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 1/2019: 40-42.
- Grzebisz W., 2020a, *Azot podstawą plonów buraka cukrowego - czynniki warunkujące dużą efektywność*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 1/2020: 44-46.
- Grzebisz W., 2020b, *Krytyczny okres wegetacji buraka cukrowego*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 2/2020: 49-51.
- Grzebisz W., 2021, *Zarządzanie azotem na plantacji buraka cukrowego a plony cukru*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 1/2021: 45-47.
- Grzebisz W., Graf K., Paradowski A., Praczyk T., 1996, *ABC uprawy buraków cukrowych*, wyd. Poznań: 4-16 .
- Grzebisz W., Przygocka-Cyna K., Łukowiak R., Biber M., 2010, *An evaluation of macronutrient nutritional status of sugar beets in critical stages of growth in response to foliar application of multi-micronutrient fertilizers*, „Journal of Elementology” 15: 493-507.
- GUS, 2023, *Rocznik statystyczny rolnictwa*.
- Gutmański L., 1991, *Nawożenie mineralne, Produkcja buraka cukrowego*, wyd. Warszawa: 284-287.
- Hadir S., Gaiser T., Hüging H., Athmann M., Pfarr D., Kemper R., Seidel S., 2020, *Sugar beet shoot and root phenotypic plasticity to nitrogen, phosphorus, potassium and lime omission*, „Agriculture” 11, nr 1: 21-28.
- Hasanen G. H., Elsokkary I. H., Kamel M. Z., Abd Elsamea A. M., 2013, *Influence of nitrogen and organic fertilization on growth, yield and quality of sugar beet grown in calcareous soil*, „Journal of Plant Production” 4, nr 5: 733-743.
- Hoffmann C. M., Kluge-Severin S., 2011, *Growth analysis of autumn and spring sown sugar beet*, „European Journal of Agronomy” 34, nr 1: 1-9.
- Idris B. M. E., Marajan W. A., Adam A. H. M., Masoero G., 2021, *Effect of nitrogen fertilizer and plant spacing on vegetative growth of sugar beet (Beta vulgaris)*, „Journal of Agronomy Research-4” nr 1: 6-13.



- Islamgulov D., Alimgafarov R., Ismagilov R., Bakirova A., Muhametshin A., Enikiev R. K., Nurligajnov R., 2019, *Productivity and technological features of sugar beet root crops when applying of different doses of nitrogen fertilizer under the conditions of the middle Cis-Ural region*, „Bulgarian Journal of Agricultural Science” 25: 90-97.
- Ismail A. M. A., 2005, *Effect of nitrogen sources and levels on yield and quality of sugar beet*, „Egyptian Journal of Agricultural Research” 83, nr 1: 229-239.
- Jacimovic G., Marinkoviñ B., Crnobarac J., Bogdanoviñ D., Kovaãev L., Danojeviñ D., 2008, *Influence of fertilization and nitrate-nitrogen position in soil profile on the sugar beet root yield and quality*, „Journal of Agricultural Sciences” 53: 83-90.
- Jaszczolt E., 1995, *Sposób oszczędnego nawożenia buraków cukrowych azotem*, „Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych” 421a: 163-172.
- Jaworski E. G., 1971, *Nitrate reductase assay in intact plant tissues*, „Biochemical and Biophysical Research Communications” 43, nr 6: 1274-1279.
- Jug D., Jug I., Brozović B., Vukadinović V., Bojan S., Đurđević B., 2018, *The role of conservation agriculture in mitigation and adaptation to climate change*, „Poljoprivreda” 24: 35-44.
- Kasztelan A., Jarosz-Angowska A., Nowak A., Krukowski A., 2021, *Konkurencyjna biogospodarka szansą dla zrównoważonego rozwoju krajów Unii Europejskiej*, „Instytut Naukowo-Wydawniczy, Spatium”, Radom: 23-82.
- Klotz K. L., Finger F. L., 2004, *Impact of temperature, length of storage and postharvest disease on sucrose catabolism in sugar beet*, „Postharvest Biology and Technology” 34, nr 1: 1-9.
- Koch H. J., Laufer D., Nielsen O., Wilting P., 2016, *Nitrogen requirement of fodder and sugar beet (*Beta vulgaris L.*) cultivars under high-yielding conditions of northwestern Europe*, „Archives of Agronomy and Soil Science” 62, nr 9: 1222-1235.
- Kokoszka K., 2009, *Ekologiczne problemy zrównoważonego rozwoju terenów wiejskich w Polsce*, „Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu” 11, nr 4: 139-146.
- Kopiński J., 2010, *Bilans azotu w Polsce na tle zmian intensywności produkcji rolniczej*, „Studia i Raporty IUNG – PIB” 20: 39-52.
- Kotecki A., Artyszak A., Bielski S., Budzyński W., Dubis B., Głab L., Wyszynski Z., 2020, *Uprawa roślin*, t. II, „Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu”.

- Krawczyk R., Kaczmarek S., Kierzek R., 2007, *Technologia uprawy buraka cukrowego Z zastosowaniem mikrodawek herbicydów W zrównoważonym rolnictwie*, „Fragmenta Agronomica” 3, nr 95: 252-257.
- Kristek A., Varga M., Antunović M., 2011, *Utjecaj tipa tla I gnojidbe dušikom na prinos I kvalitetu korijena šećerne repe*, „Poljoprivreda” 17: 16-22.
- Kristek S., Kristek A., Evačić M., 2008, *Influence of nitrogen fertilization on sugar beet root yield and quality*, „Cereal Research Communications” 36: 371-374.
- Kurus J., 2006, *Zawartość niektórych składników pokarmowych i mineralnych w buraku cukrowym w zależności od nawożenia azotem i sposobów odchwaszczania*, „Acta Agrophysica” 8, nr 3: 671-680.
- Kurus J., Podstawka-Chmielewska E., Kisiel K., 2004, *Dynamika mineralnych form azotu w glebie pod burakami cukrowymi uprawianymi na rędzinie*, „Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio E. Agricultura” 59, nr 2: 737-745.
- KZPBC, 2023, *Wyniki produkcyjne w Polsce - KZPBC krajowy związek plantatorów buraka cukrowego*.
- Ladha J. K., Pathak H., Krupnik T. J., Six J., van Kessel C., 2005, *Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects*, „Advances in Agronomy” 87: 85-156.
- Ladha J. K., Reddy C. K., Padre A. T., van Kessel C., 2011, *Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils*, „Journal of Environmental Quality” 40, nr 6: 1756-1766.
- Last P. J., Draycott A. P., Messemer A. B., Webb D. J., 1983, *Effects of nitrogen fertilizer and irrigation on sugar beet at Broom's Barn 1973-8*, „The Journal of Agricultural Science” 101, nr 1: 185-205.
- Leilah A. A. A., Khan N., 2021, *Interactive Effects of Gibberellic Acid and Nitrogen Fertilization on the Growth, Yield, and Quality of Sugar Beet*, „Agronomy” 11, nr 1: 137.
- Li J., Liu X., Xu L., Li W., Yao Q., Yin X., Liu D., 2023, *Low nitrogen stress-induced transcriptome changes revealed the molecular response and tolerance characteristics in maintaining the C/N balance of sugar beet (Beta vulgaris L.)*, „Frontiers in Plant Science” 14: 105-124.
- Lichtenthaler H., 1987, *Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes*, „Methods in enzymology” 148C: 350-382.

- Mahmoud E. A., Hassanin M. A., Emara I. R., 2012, *Effect of organic and mineral nitrogenous fertilizers and plant density on yield and quality of sugar beet (Beta vulgaris L.)*, „Egyptian Journal of Agronomy” 34, nr 1: 89-103.
- Majewska E., Kozłowska M., Łobacz M., 2011, *Kancerogeny chemiczne w żywności Część I*, „Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego” nr 1: 71-75.
- Malinowska-Pańczyk E., 2015, *Niebiałkowe związki azotowe*, MOST Wiedzy - portal z wiedzą dla Ciebie, wyd. WNT: 241-262 .
- Malnou C. S., Jaggard K. W., Sparkes D. L., 2006, *A canopy approach to nitrogen fertilizer recommendations for the sugar beet crop*, „European Journal of Agronomy” 25, nr 3: 254-263.
- Malnou C. S., Jaggard K. W., Sparkes D. L., 2008, *Nitrogen fertilizer and the efficiency of the sugar beet crop in late summer*, „European Journal of Agronomy” 28, nr 1: 47-56.
- Mekdad A. A. A., Rady M. M., 2016, *Response of Beta vulgaris L. to nitrogen and micronutrients in dry environment*, „Plant, Soil and Environment” 62, nr 1: 23-29.
- Melino V. J., Tester M. A., Okamoto M., 2022, *Strategies for engineering improved nitrogen use efficiency in crop plants via redistribution and recycling of organic nitrogen*, „Current Opinion in Biotechnology” 73: 263-269.
- Mercik, Stanisław, 2004, *Chemia rolna. Podstawy teoretyczne i praktyczne*, wyd. 2004, Warszawa.
- Michalska-Klimczak B., Wyszynski Z., 2010, *Plonowanie buraka cukrowego w zmiennych warunkach agrotechnicznych i siedliskowych cz. I. Plon i jakość korzeni a technologiczny plon cukru*, „Fragmenta Agronomica” 27, nr 1: 88-97.
- Moustafa Z. R., Soudi A. M. K., Mohamed K. E., 2011, *Productivity and quality of sugar beet as influenced by nitrogen fertilizer and some micronutrients*, „Egyptian Journal of Agricultural Research” 89, nr 3: 1005-1018.
- Nemeat Alla, E., Mohamed A., Zalat S., 2002, *Effect of soil and foliar application of nitrogen fertilization on sugar beet*, „Journal of Plant Production” 27, nr 3: 1343-1351.
- Ostrowska A., Gawliński S., Szczubiałka Z., 1991, *Metody analizy i oceny właściwości gleb i roślin: katalog / Apolonia Ostrowska, Stanisław Gawliński, Zdzisław Szczubiałka ; Instytut Ochrony Środowiska.*, Warszawa.
- Pačuta V., Rašovský M., Michalska-Klimczak B., Wyszynski Z., 2021, *Impact of superabsorbent polymers and variety on yield, quality and physiological parameters of the sugar beet (beta vulgaris prov. Altissima doell)*, „Plants 2021” 10, nr 4: 757.

- Petrović M., Janakiev T., Grbić M. L., Unković N., Stević T., Vukićević S., Dimkić I., 2023, *Insights into endophytic and rhizospheric bacteria of five sugar beet hybrids in terms of their diversity, plant-growth promoting, and biocontrol properties*, „Microbial ecology” 87, nr 1: 18-25.
- Petrović N., Kastori R., 1990, *Nitrate reductase in sugar beet genotypes supplied with different nitrate levels*, w: N. El Bassam, M. Dambroth, B. C. Loughman (red.), *Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition*, Dordrecht: 51-55, [https://doi.org/10.1007/978-94-009-2053-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-009-2053-8_8) (dostęp: 6 czerwca 2024).
- Pogłodziński R., Barłóg P., Grzebisz W., 2021, *Effect of nitrogen and magnesium sulfate application on sugar beet yield and quality*, „Plant, Soil and Environment” 67, nr 9: 507-513.
- Ponti T. D., Rijk B., Ittersum M. K. V., 2012, *The crop yield gap between organic and conventional agriculture*, „Agricultural Systems” 108: 1-9.
- Pospišil M., Pospišil A., Rastija M., 2000, *Effect of plant density and nitrogen rates upon the leaf area of seed sugar beet on seed yield and quality*, „European Journal of Agronomy” 12, nr 1: 69-78.
- Potarzycki J., Lewicka L., 2002, *Efektywność plonotwórcza nawozów wieloskładnikowych w uprawie buraka cukrowego*, „Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin” nr 222: 111-118.
- Prośba-Białczyk U., 2004, *Wpływ nawożenia międzyplonami ścierniskowymi i azotem na produktywność i jakość technologiczną buraka cukrowego*, „Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio E. Agricultura” 59, nr 3: 1193-1202.
- Prvulović D., Popović M., Malenčić D., Marinković B., Jaćimović G., 2010, *Effects of nitrogen fertilization on the biochemical and physiological parameters in leaves and root of sugar beet associated with Azotobacter chroococcum*, „Journal of Plant Nutrition” 33, nr 1: 15-26.
- Przeździecki Z., 1980, *Biologiczne skutki chemizacji środowiska / Zdzisław Przeździecki., Oddziaływanie Czynn timerów Współczesnego Środowiska na Organizm Człowieka*, Wydanie pierwsze. Warszawa.
- Pulkrábek J., Brinar J., Javor T., Dvořák P., Bečková L., Kuchtová P., Hubáčková J., 2021, *Experience with variable fertilization of sugar beet*, „Listy Cukrovarnické a Reparské” 137, nr 5/6: 184-193.
- Pytlarz-Kozicka M., 2005, *The effect of nitrogen fertilization and anti-fungal plant protection on sugar beet yielding*, „Plant, Soil and Environment” 51, nr 5: 232-236.

- R Core Team, 2024, *R: a language and environment for statistical computing* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.r-project.org/> (dostęp: 6 czerwca 2024).
- Rašovský M., Pačuta V., Ducsay L., Lenická D., 2022, *Quantity and quality changes in sugar beet (*beta vulgaris* provar. *Altissima* doel) induced by different sources of biostimulants*, „Plants 2022” 11, nr 17: 2222.
- Reda M., Klobus G., Buczek J., 2000, *Budowa i sposoby regulacji reduktazy azotanowej.*, „Postępy Biochemii” 46, nr 1: 99-106.
- Rengel Z., Cakmak I., White P. J., 2022, *Marschner’s Mineral Nutrition of Plants*.
- Rochalska M., 2005, *Influence of frequent magnetic field on chlorophyll content in leaves of sugar beet plants*, „Nukleonika” Vol. 50,suppl.2: 25-28.
- RStudio Team, 2020, *RStudio: Integrated development environment for RStudio*, PBC., Boston, MA, [Data set].
- Rutkowska A., 2014, *Racjonalne i efektywne nawożenie azotem*, „Studia i Raporty IUNG-PIB, Zeszyt 37(11)”: 33-46.
- Sacała E., Demczuk A., Grzyś E., Prośba-Białczyk U., Szajsner H., 2012, *Impact of pre-sowing laser irradiation of seeds on sugar beet properties*, „International Agrophysics” 26, nr 3: 295-300.
- Sainju U. M., Ghimire R., Pradhan G. P., 2020, *Nitrogen fertilization I: Impact on crop, soil, and environment*, „Nitrogen Fixation”11: 70-90.
- Sarhan H. M., Abdou M. A. E., Al-Sayed H. M., 2012, *Effect of planting systems, plant density and nitrogen fertilizer levels on productivity and quality of sugar beet*, „Journal of Plant Production” 3, nr 10: 2567-2580.
- Shimizu G., Marubayashi R., Goncalves L., 2023, *AgroR: Experimental statistics and graphics for agricultural sciences*, .
- Sinicki M., 2016, *The Effects of Different Nitrogen Rates on Root Yield and Quality of N and NZ Type Sugar Beet Varieties*, „Open Access Journal of Agricultural Research” 1, nr 1: 1-6.
- Skowrońska, Filipek, 2013, *Aktualne dominujące przyczyny oraz skutki zakwaszenia gleb użytkowanych rolniczo w Polsce*, „Acta Agrophysica 20(2)”: 283-294.
- Stevanato P., Chiodi C., Broccanello C., Concheri G., Biancardi E., Pavli O., Skaracis G., 2019, *Sustainability of the sugar beet crop*, „Sugar tech : an international journal of sugar crops & related industries” 21, nr 5: 703-716.

- Stevens W. B., Evans R. G., Jabro J. D., Iversen W. M., Stevens B., 2011, *Sugar beet productivity as influenced by fertilizer band depth and nitrogen rate in strip tillage*, „Banding Nitrogen in Strip Tillage” nr 406: 137-155.
- Stośić M., Brozović B., Vinković T., Ravnjak B., 2020, *Soil resistance and bulk density under different tillage system*, „Poljoprivreda 26” nr 1: 17-24.
- Su J., Zhou H., Wang K., Fan H., Hou Z., 2024, *Effects of Nitrogen Fertilizer Management on Dry Matter Accumulation and Yield of Drip-Irrigated Sugar Beet in Arid Areas*, „Agronomy” 14, nr 5: 1010.
- Sulewski P., Was A., Kloczko-Gajewska A., Kobus P., Jurek K., Gołaś M., 2020, *Ekoefektywność towarowych gospodarstw rolnych w Polsce*, „ Wydawnictwo SGGW Warszawa”.
- Szczepaniak W., Grzebisz W., Żuchlińska B., 2002, *Reakcja buraków cukrowych na nawozy azotowe na tle nawożenia potasowo-sodowo-magnezowego*, „Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin” 222: 83-90.
- Szewczuk C., 2007, *Wapń, fosfor i potas - jesienią Azot, magnez, siarka i sód - wiosną*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 4/2007: 29-30.
- Szewczuk C., 2008, *Nawożenie plantacji buraka azotem i mikroelementami*, „Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego” 2/2008: 22-23.
- Szmigiel A., Kołodziejczyk M., Kulig B., Oleksy A., 2014, *Wpływ nawożenia azotem na plonowanie buraka pastewnego*, „Fragmenta Agronomica” 31, nr 4: 100-107.
- Szymczak-Nowak J., Okopowych M. N. Z. T. P. R., Roślin O. B. I. H. A., 2003, *Reakcja odmian buraka cukrowego na nawożenie obornikiem i słomą. Część I. Wschody, obsada, wystawanie korzeni i plon buraka cukrowego*, „Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych” 494: 453-463.
- Tarkalson D. D., Bjorneberg D. L., Camp S., Dean G., Elison D., Foote P., 2016, *Improving nitrogen management in pacific northwest sugar beet production*, „Journal of Sugar Beet Research. 53 (1&2)”: 14-36.
- Trzebiński, Cieśla, 1979, *Fizjologiczne i technologiczne podstawy nawożenia azotowego buraków cukrowych*, „Postępy Nauk Rolniczych” nr 1/79: 43-56.
- Tsialtas J. T., Maslaris N., 2005, *Effect of N Fertilization Rate on Sugar Yield and Non-Sugar Impurities of Sugar Beets (Beta vulgaris) Grown Under Mediterranean Conditions*, „Journal of Agronomy and Crop Science” 191: 330-339.
- Ulińska, Maria, 1959, *Technika obliczeń przy opracowaniu wyników doświadczeń rolniczych*, t. II, Oddział IUNG w Gorzowie.

- Van Eerd L. L., Congreves K. A., Zandstra J. W., 2012, *Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) storage quality in large outdoor piles is impacted by pile management but not by nitrogen fertilizer or cultivar*, „Canadian Journal of Plant Science” 92, nr 1: 129-139.
- Varga I., Jović J., Rastija M., Kulundžić A. M., Zebec V., Lončarić Z., Antunović M., 2022, *Efficiency and management of nitrogen fertilization in sugar beet as spring crop: a review*, „Nitrogen” 3, nr 2: 170-185.
- Varga I., Kulundžić A. M., Kojić M. T., Antunović M., 2024, *Does the amount of pre-sowing nitrogen fertilization affect sugar beet root yield and quality of different genotypes?*, „Nitrogen” 5, nr 2: 386-408.
- Varga I., Lončarić Z., 2020, *Dynamics of sugar beet root, crown and leaves mass with regard to plant densities and spring nitrogen fertilization*, „Poljoprivreda 26(1)”: 32-39.
- Varga I., Lončarić Z., Kristek S., Kulundžić A. M., Rebekić A., Antunović M., 2021, *Sugar beet root yield and quality with leaf seasonal dynamics in relation to planting densities and nitrogen fertilization*, „Agriculture” 11, nr 5: 355-407.
- Varga I., Markulj Kulundžić A., Tkalec Kojić M., Antunović M., 2024, *Does the amount of pre-sowing nitrogen fertilization affect sugar beet root yield and quality of different genotypes*, „Nitrogen” 5, nr 2: 386-408.
- Varga I., Radočaj D., Jurišić M., Kulundžić A. M., Antunović M., 2023, *Prediction of sugar beet yield and quality parameters with varying nitrogen fertilization using ensemble decision trees and artificial neural networks*, „Computers and Electronics in Agriculture” 212: 108076.
- Varga I., Rebekić A., Pospišil M., Kulundžić A. M., Zebec V., Iljkić D., Antunović M., 2023, *Fenotypová modifikovatelnost listu cukrové řepy během vegetace odhadem listové plochy*, „Listy cukrovarnické a řepářské” 139, nr 5-6: 182-190.
- Wang N., Fu F., Wang H., Wang P., He S., Shao H., Zhang X., 2021a, *Effects of irrigation and nitrogen on chlorophyll content, dry matter and nitrogen accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.)*, „Scientific Reports” 11, nr 1: 1-9.
- Wesołowski M., Bętkowski M., Kokoszka, 2023, *Wpływ gospodarki bezobornikowej na jakość korzeni buraka cukrowego*, „Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio E” 58: 1-12.
- Wyszyński Z., Kalinowska-Zdun M., Roszkowska B., Laudański Z., Gozdowski D., 2002, *Plony i jakość korzeni buraka cukrowego na plantacjach produkcyjnych w zależności od nawożenia mineralnego, pH i zasobności gleb w fosfor i potas*, „Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin” 222: 231-238.

- Zbigniew Staszewski, 2011, *Azot w glebie i jego wpływ na środowisko*, „Zeszyty Naukowe Inżynieria Lądowa i Wodna w Kształtowaniu Środowiska” nr 4: 50-58.
- Zhou H., Xu P., Zhang L., Huang R., Yang M., Wang K., Fan H., 2023, *Nitrogen application promotes drought-stressed sugar beet growth by improving photosynthesis, osmoregulation, and antioxidant defense*, „Journal of Soil Science and Plant Nutrition” (dostęp: 25 stycznia 2023).
- Zimny L., Kuc P., 2005, *Zawartość podstawowych składników pokarmowych w buraku cukrowym uprawianym w różnych systemach nawożenia w drugiej rotacji płodozmianu*, „Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio E. Agricultura” 60: 185-194.
- Zimny L., Malak D., Śniady R., 2000, *Znaczenie produkcyjne gorczycy białej i nawożenia azotowego w uprawie buraka cukrowego*, „Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych” 470: 181-189.



## 9. Spis tabel

Tabela 1. pH oraz zawartość C i P, K i Mg w glebie przed rozpoczęciem doświadczenia .....	33
Tabela 2. Zabiegi agrotechniczne i terminy ich wykonania w latach badań.....	34
Tabela 3. Analiza wariancji dla plonu korzeni buraka cukrowego .....	35
Tabela 4. Analiza wariancji dla plonu suchej masy korzeni .....	41
Tabela 5. Analiza wariancji dla plonów liści buraka cukrowego .....	42
Tabela 6. Współdziałanie formy azotu w latach badań na plon liści buraka ( $t \cdot ha^{-1}$ ).....	44
Tabela 7. Współdziałanie dawki azotu w latach badań na plon liści ( $t \cdot ha^{-1}$ ) .....	45
Tabela 8. Zawartość sacharozy oraz melasotworów w korzeniach buraka cukrowego .....	46
Tabela 9. Współdziałanie dawki azotu w latach badań na zawartość .....	50
Tabela 10. Współdziałanie formy azotu i dawki azotu na zawartość.....	50
Tabela 11. Współdziałanie dawki azotu w latach badań na zawartość kationów potasu ( $mmol \cdot kg^{-1}$ )..	50
Tabela 12. Współdziałanie dawki azotu w latach badań na zawartość kationów sodu ( $mmol \cdot kg^{-1}$ ) ....	50
Tabela 13. Analiza wariancji dla biologicznego plonu cukru .....	51
Tabela 14. Współdziałanie formy N w latach badań dla biologicznego plonu cukru ( $t \cdot ha^{-1}$ ) .....	52
Tabela 15. Współdziałanie dawki N w latach badań dla biologicznego plonu cukru ( $t \cdot ha^{-1}$ ) .....	52
Tabela 16. Analiza wariancji dla technologicznego plonu cukru.....	53
Tabela 17. Współdziałanie formy N w latach badań dla technologicznego.....	55
Tabela 18. Współdziałanie dawki N w latach badań dla technologicznego.....	55
Tabela 19. Szerokość i długość korzeni buraków cukrowych .....	57
Tabela 20. Zawartość suchej masy w liściach i korzeniach buraka cukrowego.....	60
Tabela 21. Świeża masa liści z pojedynczej rośliny i świeża masa pojedynczego korzenia .....	63
Tabela 22. Zawartość azotu w korzeniach (% s.m.).....	67
Tabela 23. Analiza wariancji dla akumulacji N w korzeniach buraka ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) .....	68
Tabela 24. Aktywność reduktazy azotanowej ( $nmol (NO_2^-) g^{-1} \text{ św. m. godz. }^{-1}$ ).....	75
Tabela 25. Zawartość barwników fotosyntetycznych w liściach buraka ( $mg \cdot g^{-1} \text{ św. m.}$ ).....	77
Tabela 26. Suma chlorofili i karotenoidów w liściach buraka cukrowego ( $mg \cdot g^{-1} \text{ św. m.}$ ).....	78

## Spis rysunków

Rysunek 1. Suma miesięcznych opadów w latach badań oraz w wieloleciu .....	26
Rysunek 2. Roczna suma opadów w latach prowadzenia badań oraz w wieloleciu .....	26
Rysunek 3. Suma opadów w miesiącach wegetacji buraka (IV-X).....	27
Rysunek 4. Średnie miesięczne temperatury powietrza na wysokości 2m .....	28
Rysunek 5. Średnie miesięczne temperatury powietrza przy glebie .....	29
Rysunek 6. Średnie roczne temperatury powietrza w latach badań oraz w wieloleciu.....	30
Rysunek 7. Średnie roczne temperatury powietrza w miesiącach wegetacji buraka (IV-X).....	30
Rysunek 8. Miesięczna suma godzin nasłonecznienia w latach badań oraz w wieloleciu.....	32
Rysunek 9. Roczna suma godzin nasłonecznienia w latach badań .....	32
Rysunek 10. Plon korzeni w zależności od roku badań, formy oraz dawki N .....	35
Rysunek 11. Graficzne przedstawienie wpływu badanych czynników na plon korzeni.....	36
Rysunek 12. Wpływ współdziałania formy i dawki azotu na plon korzeni buraka .....	39
Rysunek 13. Wpływ współdziałania dawki i formy N w latach badań na plon korzeni .....	40
Rysunek 14. Wpływ współdziałania lat i dawki azotu na plon korzeni.....	40
Rysunek 15. Plon suchej masy korzeni w zależności od lat badań, formy oraz dawki N.....	42
Rysunek 16. Plon liści w zależności od lat badań, formy oraz dawki azotu.....	43
Rysunek 17. Graficzne przedstawienie wpływu badanych czynników na plon liści .....	44

Rysunek 18. Graficzne przedstawienie współdziałania formy N w latach badań dla plonu liści .....	45
Rysunek 19. Graficzne przedstawienie współdziałania dawki N w latach badań dla plonu liści .....	46
Rysunek 20. Biologiczny plon cukru w zależności od lat badań, formy oraz dawki N.....	52
Rysunek 21. Technologiczny plon cukru w zależności od lat badań, formy oraz dawki N .....	55
Rysunek 22. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian szerokości korzenia buraka.....	58
Rysunek 23. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian długości korzeni buraka .....	58
Rysunek 24. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian suchej masy w liściach buraka.....	61
Rysunek 25. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian suchej masy w korzeniach buraka .....	61
Rysunek 26. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian świeżej masy liści z pojedynczej rośliny .....	64
Rysunek 27. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian świeżej masy pojedynczego korzenia .....	64
Rysunek 28. Zależność pomiędzy św. m. pojedynczego korzenia a plonem biologicznym cukru .....	65
Rysunek 29. Świeża masa pojedynczego korzenia a biologiczny plon cukru w latach badań.....	65
Rysunek 30. Świeża masa pojedynczego korzenia a biologiczny plon cukru dla form N.....	66
Rysunek 31. Graficzne przedstawienie dynamiki zmian zawartości N w korzeniach .....	67
Rysunek 32. Efekty główne dla akumulacji azotu w korzeniach buraka .....	69
Rysunek 33. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a plonem św. m. korzeni buraka .....	69
Rysunek 34. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a plonem korzeni w latach badań.....	70
Rysunek 35. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a plonem korzeni dla dawek azotu....	70
Rysunek 36. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a plonem korzeni św. m. dla form N.	71
Rysunek 37. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a długością korzeni .....	71
Rysunek 38. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a długością korzeni dla form N.....	72
Rysunek 39. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a szerokością korzeni .....	72
Rysunek 40. Zależność pomiędzy akumulacją N w korzeniach a szerokością korzeni dla form azotu	73
Rysunek 41. Zależność między zawartością chlorofilu <i>a</i> w fazie BBCH 25 a plonem s.m. korzeni....	79
Rysunek 42. Zależność między zawartością chlorofilu <i>a</i> a plonem s.m. korzeni dla dawki N .....	79
Rysunek 43. Zależność między zawartością chlorofilu <i>a</i> a plonem s.m. korzeni dla formy N .....	80
Rysunek 44. Zależność między zawartością chlorofilu <i>b</i> a sacharozą w korzeniach .....	80
Rysunek 45. Zależność między zawartością chlorofilu <i>b</i> a sacharozą w korzeniach dla formy N.....	81