

ROZPRAWY NAUKOWE
503

Włodzimierz Krzesiński

WZROST, PLONOWANIE I BILANS CUKRÓW
U WYBRANYCH ODMIAN SZPARAGA
(*ASPARAGUS OFFICINALIS* L.)



POZNAŃ 2018

WZROST, PLONOWANIE I BILANS CUKRÓW U WYBRANYCH ODMIAN SZPARAGA (*ASPARAGUS OFFICINALIS* L.)

ABSTRAKT

Celem pracy było pogłębienie wiedzy na temat wzrostu i plonowania szparaga z uwzględnieniem bilansu cukrów w roślinach, jak również przeanalizowanie wpływu przebiegu warunków klimatycznych na plonowanie szparaga, zarówno w latach przed rozpoczęciem zbiorów wypustek, jak i w latach zbiorów. Dodatkowo określono wpływ temperatury powietrza na intensywność oddychania korzeni, wypustek i pędów asymilacyjnych szparaga oraz przeanalizowano ilość cukrów zużywanych na potrzeby oddychania poszczególnych organów rośliny. Oceniono również wpływ temperatury powietrza i promieniowania słonecznego na intensywność fotosyntezy. Podjęto także próbę opracowania modelu umożliwiającego wyznaczenie masy pędów asymilacyjnych na podstawie ich grubości i wysokości, co z kolei pozwoliło na określenie powierzchni pędów asymilacyjnych, ilości absorbowanego światła przez te pędy, produkcji cukrów w okresie asymilacji oraz zapotrzebowania cukrów na potrzeby oddychania pędów asymilacyjnych. W oparciu o uzyskane wyniki zaproponowano wskaźniki opisujące efektywność zużycia cukrów w odniesieniu do ilości absorbowanego światła przez pędy asymilacyjne oraz zebranego plonu.

Badania obejmowały siedem doświadczeń prowadzonych w polu, tunelu foliowym, szklarni oraz kamerach wegetacyjnych w latach 1994–2012. W doświadczeniach polowych przeanalizowano plonowanie pięciu odmian szparaga sadzonych w trzech kolejnych latach oraz określono wpływ terminu kończenia zbiorów na wzrost i plonowanie trzech odmian szparaga. W doświadczeniach prowadzonych w warunkach kontrolowanych określono wpływ temperatury na fotosyntezę i oddychanie kilku odmian szparaga.

W pierwszym doświadczeniu stwierdzono, że plon ogólny i handlowy pięciu odmian szparaga zależał od roku zbiorów i odmiany, natomiast nie miały na niego wpływu warunki klimatyczne związane z rokiem sadzenia rozsady. Warunki te istotnie modyfikowały wpływ odmiany i czynników klimatycznych w roku zbiorów. Im większy był plon ogólny w jednym roku, tym mniejszy był on w kolejnym. Największy plon ogólny i handlowy zebrano u odmiany 'Gijnlim'.

W kolejnych dwóch doświadczeniach, w których zróżnicowano długość okresu zbiorów wykazano, że wielkość plonu ogólnego, handlowego oraz średnia masa wypustki zależały również od terminu kończenia zbiorów i odmiany. Średni plon ogólny i handlowy odmiany 'Gijnlim' był większy niż odmiany 'Backlim', jednak odmiana 'Backlim' tworzyła grubsze wypustki. Wydłużenie okresu zbiorów do 30 czerwca zwiększyło wielkość plonu ogólnego w pierwszych trzech latach zbiorów wypustek. W kolejnych latach zbierany plon był coraz mniejszy, gdyż dłuższy okres zbiorów wiązał się ze skróceniem okresu asymilacji, co doprowadziło do osłabienia roślin. Termin kończenia zbiorów miał wpływ również na badane parametry pędów asymilacyjnych. Im później kończono zbiory wypustek, tym pędy asymilacyjne miały mniejszą średnicę, wysokość i masę oraz mniejszy był LAI, przez co rośliny absorbowały mniej światła niż przy kończeniu zbiorów 10 czerwca. Jednak przy zbiorach do 30 czerwca pędy asymilacyjne miały większy udział masy pędów z gałęziami w masie całego pędu i SLA, a w łanie pędów asymilacyjnych było wyższe natężenie PPFd.

Wykazano, że masa pędów asymilacyjnych (M_{PA}) może zostać określona na podstawie ich średnicy (d_{PA}) i ich wysokości (H_{PA}) według wzoru:

$$M_{PA} = 0,00785 \cdot d_{PA}^2 \cdot H_{PA} \cdot (0,871 - 0,0145 \cdot d_{PA} + 9,74 \cdot \exp(-d_{PA}))$$

Efektywność kwantowa fotosyntezy, punkt wysycenia światłem, punkt kompensacji świetlnej oraz maksymalna fotosynteza netto zależały od odmiany i temperatury powietrza. Im wyższa temperatura w zakresie 15–30°C, tym mniejsza była efektywność kwantowa fotosyntezy i wyższy punkt wysycenia światłem oraz punkt kompensacji świetlnej. Oddychanie korzeni, wypustek i pędów asymilacyjnych zależało od temperatury i w temperaturze 20°C wynosiło odpowiednio 97 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹, 225 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ i 212 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹. Skrócenie okresu zbiorów do 10 czerwca wydłużyło okres asymilacji i zwiększyło ilość produkowanych cukrów. Pomimo wydłużenia okresu asymilacji, zwiększona produkcja cukrów w niewielkim stopniu przełożyła się na wielkość plonu ogólnego. Przy kończeniu zbioru 10 czerwca, produkcja cukrów zwiększyła się o 91% w porównaniu do produkcji cukrów przy zbiorach do 30 czerwca, jednak wielkość plonu ogólnego była większa średnio o 9,7%. Przy zbiorach do 30 czerwca, krótszy okres asymilacji był kompensowany przez rośliny szparaga między innymi poprzez zmianę pokroju pędów asymilacyjnych umożliwiającą lepsze wykorzystanie światła, bardziej efektywne wykorzystanie cukrów do wzrostu pędów asymilacyjnych oraz mniejsze zużycie cukrów na potrzeby oddychania korzeni i pędów asymilacyjnych. Rośliny szparaga magazynowały w korzeniach także większy udział produkowanych cukrów niż rośliny, u których zbiory trwały do 10 czerwca. Do korzeni było eksportowanych średnio 75% produkowanych cukrów. Procent eksportowanych cukrów zależał od odmiany a nie od terminu kończenia zbiorów. Najwięcej cukrów eksportowanych było do korzeni odmiany 'Gijnlim' (średnio 78%), a mniej do korzeni odmian 'Backlim' i 'Thielim' (73%). W okresie zbiorów, rośliny szparaga wykorzystywały średnio 13,6% z wszystkich wyprodukowanych cukrów. Z 1 t·ha⁻¹ cukrów zużywanych w tym okresie zbierano 4,8 t·ha⁻¹ plonu ogólnego. Efektywność wykorzystania cukrów do wzrostu wypustek nie zależała od terminu kończenia zbioru. Tempo uwalniania cukrów było ściśle skorelowane z ilością cukrów w karpach przed rozpoczęciem okresu zbiorów i, niezależnie od terminu kończenia zbiorów, wynosiło średnio 11% cukrów zgromadzonych w korzeniach spichrzowych szparaga na każde 100°Cd. Szybkość wyrastania wypustek w przeliczeniu na sumę temperatury powietrza zależała od odmiany i terminu kończenia zbiorów. Im wcześniej kończono zbiory, tym więcej było cukrów w korzeniach i szybciej wyrastały wypustki, przez co zbierano większy plon ogólny w przeliczeniu na sumę temperatury. Przy zbiorach do 10 czerwca plon ogólny wynosił 5,1 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹, natomiast przy zbiorach do 30 czerwca 2,7 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹. U odmiany 'Gijnlim' średni plon ogólny w przeliczeniu na sumę temperatury był największy i wynosił 4,2 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹, a u odmiany 'Backlim' najmniejszy (3,5 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹). Rośliny szparaga produkowały w okresie asymilacji średnio 16,1 t·ha⁻¹ cukrów. Stwierdzono wpływ terminu kończenia zbiorów wypustek na ilość cukrów produkowanych i zużywanych na potrzeby oddychania bytowego i wzrostowego. Im krócej zbierano wypustki, tym więcej cukrów było produkowanych i zużywanych z wyjątkiem samego okresu zbiorów, w którym ilość zużywanych cukrów była podobna przy różnym terminie kończenia zbiorów.

Słowa kluczowe: odmiana, temperatura, opady, PPFD, LAI, SLA, absorpcja światła, pędy asymilacyjne, gałęziaki, fotosynteza, punkt kompensacji świetlnej, punkt wysycenia światłem, oddychanie bytowe, oddychanie wzrostowe, bilans cukrów, efektywność wykorzystania cukrów

GROWTH, YIELD AND CARBOHYDRATE BALANCE IN SELECTED ASPARAGUS CULTIVARS (*ASPARAGUS OFFICINALIS* L.)

ABSTRACT

The aim of the study was to extend the knowledge about the growth and yield of asparagus, including the carbohydrate balance and to analyse the effect of climatic conditions on the yield of asparagus in the pre-harvest and harvest years. In addition, the influence of the air temperature on the respiration rate of roots, spears and summer stalks was determined and the amount of carbohydrates required for the respiration of individual plant organs was analysed. The influence of the air temperature and solar radiation on the photosynthesis rate was also assessed. The research also included an attempt to develop a model allowing the calculation of the weight of summer stalks based on their diameter and height. In consequence, it was possible to determine the leaf area index of summer stalks, the amount of light absorbed by these stalks, the production of carbohydrates during the assimilation period and the amount of carbohydrates required for the respiration of summer stalks. The results were used as the basis for indicators describing the efficiency of carbohydrate consumption in relation to the amount of light absorbed by summer stalks and yield.

The research included 7 experiments conducted in a field, plastic tunnel, greenhouse and growth chambers between 1994 and 2012. The field experiments included an analysis of the yield of five asparagus cultivars planted in three subsequent years and the influence of the harvest end date on the growth and yield of three asparagus cultivars. The influence of temperature on the photosynthesis and respiration of several asparagus cultivars was determined in experiments conducted under controlled conditions.

The first experiment showed that the total and marketable yield of five asparagus cultivars depended on the cultivar and harvest year, but it did not depend on the climate conditions in the year when the seedlings were planted. These conditions significantly modified the effect of the cultivar and the harvest year. The higher the total yield in one year was, the smaller it was in the next year. The 'Gijnlim' cultivar gave the highest total and marketable yields. In the next experiments the total and marketable yields as well as the mean weight of spears also depended on the harvest end date and cultivar. The total and marketable yields of the 'Gijnlim' cultivar were higher than the yields of the 'Backlim' cultivar, but the 'Backlim' had thicker spears. When the harvest period was extended to June 30, the total yield increased in the first three years of harvesting. In the following years the total yield tended to decrease, because the longer harvest period shortened the assimilation period and resulted in weaker plants than in the traditional or shortened harvest periods. The harvest end date affected the parameters of summer stalks. The longer the harvest period was, the smaller the diameter, height and weight of summer stalks were and the plants absorbed less light than when the harvest ended on July 30. However, when the harvest lasted until June 30, the summer stalks had a higher share of shoots with cladophylls and higher SLA, and there was higher PPFD inside canopy. The research showed that the diameter and (d_{PA}) height (H_{PA}) of summer stalks could be used to calculate their weight (M_{PA}) according to the following equation:

$$M_{Pa} = 0.00785 \cdot d_{PA}^2 \cdot H_{PA} \cdot (0.871 - 0.0145 \cdot d_{PA} + 9.74 \cdot \exp(-d_{PA}))$$

The quantum efficiency of photosynthesis, light saturation point, light compensation point and maximum net photosynthesis depended on the cultivar and air temperature. The higher the temperature within the range of 15–30°C was, the lower the quantum efficiency of photosynthesis was and the higher the light saturation point and the light compensation point were. The respiration of roots, spears and assimilation stalks depended on the temperature and at 20°C it amounted to 97 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹, 225 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ and 212 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹, respectively. When the harvest period was shortened to June 10, the assimilation period was extended and the amount of carbohydrates was increased. Despite the longer assimilation period, the increased production of carbohydrates had minimal effect on the total yield. When the harvest ended on June 10, the production of carbohydrates increased by 91%, as compared with the production when the harvest lasted until June 30. However, the average total yield was 9.7% higher. When the harvest lasted until June 30, the asparagus plants compensated for the shorter assimilation period by changing the shape of assimilation stalks to allow better use of light, more efficient use of carbohydrates for the growth of summer stalks and lower consumption of carbohydrates for the respiration of roots and summer stalks. The asparagus plants also stored in the roots a bigger share of carbohydrates produced than the plants harvested until June 10. On average, 75% of produced carbohydrates was exported to the roots. The percentage of exported carbohydrates depended on the cultivar but did not depend on the harvest end date. The highest amount of carbohydrates was exported to the roots of the ‘Gijnlim’ cultivar (on average, 78%), whereas the lowest amount was exported to the roots of the ‘Backlim’ and ‘Thielim’ cultivars (73%). On average, during the harvest the asparagus plants used 13.6% of all carbohydrates produced. During this period there was 1 t·ha⁻¹ of carbohydrates used per 4.8 t·ha⁻¹ of spears harvested. The efficiency of the use of carbohydrates for the growth of spears did not depend on the harvest end date. The rate of release of carbohydrates was closely correlated with the amount of carbohydrates before the beginning of harvest and, irrespective of the end of harvest, on average 11% of carbohydrates was accumulated in the asparagus storage roots per 100°Cd. The rate of spear growth in relation to the sum of the air temperature depended on the cultivar and the harvest end date. The earlier the harvest end was, the more carbohydrates was in the roots, and the faster the spears grew. It resulted in a higher total yield per total temperature. When the harvest lasted until June 10, the total yield was 5.1 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹, whereas for harvests lasting until June 30 the total yield was 2.7 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹. The ‘Gijnlim’ cultivar had the highest total yield per total temperature (4.2 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹), whereas the ‘Backlim’ cultivar had the lowest yield (3.5 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹). On average, during the assimilation period the asparagus plants produced 16.1 t·ha⁻¹ of carbohydrates. The harvest end date had significant effect on the amount of carbohydrates produced and consumed for maintenance and growth respirations. The shorter the harvest period was, the more carbohydrates were produced and consumed, except for the harvest period itself when the amount of carbohydrates consumed was similar regardless of different harvest end dates.

Keywords: cultivar, temperature, precipitation, PPFD, LAI, SLA, light absorption, summer stalks, cladophylls, photosynthesis, light compensation point, light saturation point, maintenance respiration, growth respiration, carbohydrate balance, efficiency of carbohydrate use

KOMITET REDAKCYJNY

**Anna Golcz, Anna Gramza-Michałowska, Stanisław Grześ,
Ewa Kiryluk-Dryjska, Jolanta Komisarek, Andrzej Krauss,
Andrzej Mazur, Sebastian Nowaczewski, Julita Reguła,
Jacek Wójtowski (przewodniczący), Anna Zielińska-Krybus**

Redaktor Działu

prof. dr hab. Anna Golcz

Recenzent

prof. dr hab. Anita Biesiada

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu
Poznań 2018, Poland



Książka jest dostępna na licencji Creative Commons – Uznanie autorstwa – Użycie niekomercyjne – Bez utworów zależnych 4.0 Międzynarodowe (CC BY-NC-ND 4.0)

ISSN 1896-1894

ISBN 978-83-7160-908-4

e-ISBN 978-83-67112-84-0

<https://doi.org/10.17306/978-83-67112-84-0>

Redakcja

Kamila Markowska

Skład i łamanie

Donata Latusek

WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU PRZYRODNICZEGO W POZNANIU

ul. Witosza 45, 60-693 Poznań

tel.: 61 848 7808, e-mail: wydawnictwo@up.poznan.pl

<https://wydawnictwo.up.poznan.pl/>

Wydanie I. Ark. wyd. 10,7

Wersja elektroniczna dostępna na stronie <https://wydawnictwo.up.poznan.pl/books.html?dostepnosc=open%20access> oraz w serwisie <https://www.ibuk.pl/>

SPIS TREŚCI

WYKAZ SKRÓTÓW	9
WSTĘP	13
1. PRZEGLĄD LITERATURY	15
1.1. Pochodzenie i opis botaniczny szparaga	15
1.2. Rozwój części nadziemnych szparaga	15
1.3. Rozwój systemu korzeniowego	17
1.4. Plonowanie	17
1.5. Przebieg fotosyntezy u szparaga i dobór metody jej pomiaru	18
1.6. Procesy oddychania u szparaga	20
1.7. Synteza cukrów w roślinach szparaga	21
1.8. Znaczenie prognozowania wzrostu i plonowania roślin	23
2. MATERIAŁ I METODY BADAŃ	24
2.1. Zakres badań	24
2.1.1. Metodyka przeprowadzenia doświadczeń	24
2.1.2. Charakterystyka wybranych odmian szparaga	27
2.2. Ocena plonowania	28
2.3. Karpy szparaga	29
2.4. Ocena parametrów pędów asymilacyjnych	29
2.4.1. Średnica i wysokość pędu asymilacyjnego a jego masa	29
2.4.2. Całkowita masa pędów asymilacyjnych	30
2.4.3. Udział masy gałęziaków	31
2.4.4. Sucha masa pędów asymilacyjnych	31
2.4.5. Specyficzna powierzchnia liści (gałęziaków)	31
2.4.6. Rozkład pionowy gałęziaków	32
2.4.7. Indeks powierzchni gałęziaków	32
2.5. Analiza procesu fotosyntezy i oddychania roślin szparaga	34
2.6. Cukry	36
2.6.1. Analizy zawartości cukrów	36
2.6.2. Bilans cukrów	36
2.7. Wskaźniki opisujące wzrost i plonowanie	38
2.8. Charakterystyka warunków klimatycznych	38
2.9. Analiza statystyczna otrzymanych wyników	41
2.9.1. Analiza wariancji	41

2.9.2.	Analiza korelacji i regresji	42
2.9.3.	Funkcje użyte do opisanja zależności pomiędzy badanymi czynnikami	42
3.	WYNIKI I DYSKUSJA	44
3.1.	Plonowanie	44
3.1.1.	Plonowanie pięciu odmian szparaga sadzonych w trzech kolejnych latach	44
3.1.2.	Plonowanie szparaga przy różnym terminie kończenia zbiorów	48
3.2.	Karpy szparaga	51
3.2.1.	Świeża masa karp	51
3.2.2.	Sucha masa karp	51
3.3.	Pędy asymilacyjne	53
3.3.1.	Średnica i wysokość pędu asymilacyjnego a jego masa	53
3.3.2.	Całkowita masa pędów asymilacyjnych	57
3.3.3.	Sucha masa pędów asymilacyjnych	60
3.3.4.	Specyficzna powierzchnia liści (gałęziaków)	61
3.3.5.	Rozkład pionowy pędów i gałęziaków	62
3.3.6.	Indeks powierzchni liści (gałęziaków)	62
3.3.7.	Absorpcja światła	63
3.4.	Fotosynteza	68
3.4.1.	Krzywe świetlne fotosyntezy	68
3.4.2.	Efektywność kwantowa fotosyntezy	68
3.4.3.	Punkt wysycenia światłem	69
3.4.4.	Punkt kompensacji świetlnej	69
3.4.5.	Maksymalna fotosynteza netto	72
3.5.	Oddychanie	74
3.6.	Cukry	76
3.6.1.	Stężenie cukrów w korzeniach	76
3.6.2.	Ilość cukrów w korzeniach szparaga z jednostki powierzchni	80
3.6.3.	Bilans cukrów	80
3.6.3.1.	Produkcja cukrów	80
3.6.3.2.	Zużycie cukrów na potrzeby oddychania wzrostowego	82
3.6.3.3.	Zużycie cukrów na potrzeby oddychania bytowego	84
3.6.3.4.	Zestawienie cukrów produkowanych i zużywanych	85
3.7.	Podsumowanie	86
	Tabele do rozdziału 3	89
4.	WNIOSKI	116
	LITERATURA	118

WYKAZ SKRÓTÓW

a, b, c, d	– parametry funkcji coefficients of function
A_{net}	– natężenie asymilacji CO ₂ netto ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) net CO ₂ assimilation intensity ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
APAR	– ilość absorbowanego światła przez pędy asymilacyjne (%) the amount of light absorbed by summer stalks (%)
B	– stopień żółknięcia pędów asymilacyjnych (skala 0–10: 0 – zielone, 10 – żółte) the degree of summer stalk yellowing (scale 0–10: 0 – green, 10 – yellow)
C_A	– cukry produkowane w okresie asymilacji ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) carbohydrates produced during assimilation ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)
C_b	– cukry zużywane na potrzeby oddychania bytowego ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) carbohydrates consumed for maintenance respiration ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)
C_w	– cukry zużywane na potrzeby oddychania wzrostowego ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) carbohydrates consumed for growth respiration ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)
C_{WPA}	– cukry zużywane na potrzeby oddychania wzrostowego pędów asymilacyjnych ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) carbohydrates consumed for growth respiration of summer stalks ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)
C_{WWY}	– cukry zużywane na potrzeby oddychania wzrostowego wypustek ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) carbohydrates consumed for growth respiration of shoots ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)
C_{WKO}	– cukry zużywane na potrzeby oddychania wzrostowego korzeni ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) carbohydrates consumed for growth respiration of roots ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)
C_{Ws}	– cukry, z których węgiel został wbudowany bezpośrednio w suchą masę, czyli tzw. cukry strukturalne ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) carbohydrates with carbon directly built into dry mass, i.e. structural carbohydrates ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)

C_{We}	– cukry zużyte na wytworzenie niezbędnej energii do wzrostu nowych organów rośliny ($t \cdot ha^{-1}$) carbohydrates consumed to generate energy for the growth of new plant organs ($t \cdot ha^{-1}$)
CHO	– węglowodany (cukry) rozpuszczalne w wodzie water-soluble carbohydrates
CUE	– efektywność wykorzystania cukrów do wzrostu wypustek ($t \cdot ha^{-1}$ wypustek) \cdot ($t \cdot ha^{-1}$ cukrów) $^{-1}$ the efficiency of use of carbohydrates for the growth of shoots ($t \cdot ha^{-1}$ of shoots) \cdot ($t \cdot ha^{-1}$ of carbohydrates) $^{-1}$
CUE_{LI}	– procent światła absorbowanego przez pędy asymilacyjne w przeliczeniu na ilość cukrów potrzebnych do ich wytworzenia (% światła \cdot ($t \cdot ha^{-1}$ cukrów) $^{-1}$) the percentage of light absorbed by summer stalks in terms of the amount of carbohydrates necessary to produce them (% light \cdot ($t \cdot ha^{-1}$ carbohydrates) $^{-1}$)
d_{PA}	– średnica pędów asymilacyjnych (mm) summer stalk diameter (mm)
h	– godzina hour
H_{PA}	– wysokość pędów asymilacyjnych (cm) summer stalk height (cm)
LAI	– indeks powierzchni liści (gałęziaków) leaf (cladophyllos) area index
M_{PA}	– masa pojedynczego pędu (g) individual shoot weight (g)
M_{PA_0}	– masa pędów wyznaczona z teoretycznej ich objętości (g) shoot weight calculated from the theoretical shoot volume (g)
M_{WY}	– masa wypustek ($t \cdot ha^{-1}$) shoot weight ($t \cdot ha^{-1}$)
M_{KO}	– masa korzeni ($t \cdot ha^{-1}$) root weight ($t \cdot ha^{-1}$)
$M_{PA_{ha}}$	– masa wszystkich pędów asymilacyjnych ($t \cdot ha^{-1}$) the weight of all summer stalks ($t \cdot ha^{-1}$)
MC_{PA}	– całkowita masa pędów asymilacyjnych ($t \cdot ha^{-1}$) total summer stalk weight ($t \cdot ha^{-1}$)
N_{PA}	– liczba pędów asymilacyjnych (szt. $\cdot m^{-2}$) the number of summer stalks ($pcs \cdot m^{-2}$)
$N_{PA_{ha}}$	– liczba pędów asymilacyjnych na powierzchni 1 ha the number of summer stalks per ha

OB	– oddychanie bytowe
MR	– maintenance respiration
OW	– oddychanie wzrostowe
GR	– growth respiration
PAR	– promieniowanie fotosyntetycznie aktywne (400–700 nm), ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) photosynthetic active radiation (400–700 nm), ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
PP _{PA}	– suma pól powierzchni przekrojów poprzecznych pędów asymilacyjnych ($\text{cm}^2\cdot\text{m}^{-2}$) total cross-sectional areas of summer stalks ($\text{cm}^2\cdot\text{m}^{-2}$)
PPFD	– gęstość strumienia fotosyntetycznych fotonów ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) photosynthetic photon flux density ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
RAD	– radiacja – ogólne promieniowanie słoneczne ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) radiation – total solar radiation ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)
RUE	– efektywność wykorzystania zaabsorbowanego światła do produkcji suchej masy ($\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$) the efficiency of use of light absorbed for dry mass production ($\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$)
<i>r</i>	– współczynnik korelacji liniowej Pearsona Pearson's linear correlation coefficient
<i>R_g</i>	– oddychanie gałęziaków ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) cladophyllos respiration ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
<i>r_{PA}</i>	– promień przekroju poprzecznego pędu asymilacyjnego (mm) summer stalk cross-sectional radius (mm)
<i>R²</i>	– współczynnik determinacji coefficient of determination
<i>R_{KA}</i>	– oddychanie korzeni ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) root respiration ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
s.m.	– sucha masa (%)
DM	– dry mass (%)
SLA	– specyficzna powierzchnia liści (gałęziaków) specific leaf (cladophyllos) area
SLW	– specyficzna masa liści (gałęziaków) specific leaf (cladophyllos) weight
<i>V_{PA}</i>	– teoretyczna objętość pędu asymilacyjnego theoretical summer stalk volume

- $W_{100^{\circ}\text{Cd}}$ – zebrany plon ogólny wypustek szparaga przy sumie ciepła równej 100°Cd (stopniodni) liczonej od 10°C
the total harvested yield of asparagus shoots at total heat of 100°Cd (degree days) calculated from 10°C
- WS_k – współczynnik korygujący masę pędów asymilacyjnych
summer stalk weight correction coefficient
- \bar{x} – średnia
average
- $^{\circ}\text{Cd}$ – stopniodni – suma ciepła liczona od 10°C
degree days – total heat calculated from 10°C

WSTĘP

Szparag jest warzywem wieloletnim, którego okres plonowania w warunkach klimatycznych Polski trwa około 10 lat. Każdego roku prowadzenia szparagarni, po zbiorach szparagów, rośliny tworzą pędy asymilacyjne, które chłoną CO₂ oraz następuje formowanie nowych pąków i gromadzenie cukrów w korzeniach szparaga. Wytwarzane wtedy przez roślinę cukry, a w szczególności wielocukry – fruktany, są podstawowym składnikiem zapasowym zmagazynowanym w korzeniach spichrzowych. Składniki te są zużywane wiosną następnego roku do tworzenia z części pąków młodych pędów, nazywanych wypustkami i stanowiących plon, a z pozostałych pąków po skończeniu zbiorów do wytworzenia pędów asymilacyjnych. Badania dotyczące ilości cukrów wymagają pracy i kosztów. O ile samo określenie stężenia cukrów w korzeniach jest stosunkowo proste, o tyle wyznaczenie ilości cukrów w całej karpie już nie, ze względu na jej wielkość i długość korzeni (Knaflowski i in., 1999a; Gąsecka i in., 2002). Dotychczas niewiele wiadomo na temat ilości cukrów zużywanych w procesie oddychania roślin szparaga. Wykonanie bilansu cukrów może przyczynić się do lepszego poznania zależności pomiędzy różnymi parametrami rośliny, jest przydatne również w optymalizacji procesu produkcji szparagów (Lampert i in., 1980; Wilson i in., 2002a; 2002b; 2008). Z tego względu poszukuje się innych metod i wskaźników, które mogłyby być użyteczne do analizy stanu rośliny i jej możliwości plonotwórczych, jak również pozwoliłyby wyznaczyć optymalny termin kończenia zbiorów w danym roku. Obecny stan wiedzy pozwala wprawdzie na uzyskanie wysokich i dobrych jakościowo plonów, jednakże precyzyjne sterowanie produkcją nie jest możliwe bez dokładniejszego oceny efektu współdziałania różnych czynników. Cel ten można osiągnąć poprzez lepsze poznanie fizjologii szparaga, jak również określenie zależności pomiędzy cechami morfologicznymi i procesami fizjologicznymi w okresie wzrostu i plonowania szparaga z wykorzystaniem analizy cukrów, między innymi przy pomocy analizy korelacji i regresji.

Do tej pory większość prac dotyczących uprawy szparaga w Polsce skupiała się na wielkości i jakości jego plonów. W niniejszej pracy położono większy nacisk na próbę odpowiedzi na pytanie, dlaczego nastąpiło takie, a nie inne zróżnicowanie wielkości i jakości plonu. Ze względu na specyfikę wzrostu i plonowania szparaga, który jest rośliną wieloletnią i z tego powodu okres asymilacji przypada w roku poprzedzającym zbiory wypustek, wykonano bilans cukrów w roślinie. Uwzględnił on z jednej strony produkcję cukrów w procesie fotosyntezy, a z drugiej ich zapotrzebowanie wynikające ze wzrostu nowych organów i oddychania niezbędnego do podtrzymania życia już istniejących części rośliny. Aby jednak możliwe było wykonanie takiego bilansu, konieczne jest opisanie zależności pomiędzy cechami morfologicznymi pędów asymilacyjnych a ich masą czy absorpcją światła.

Znając masę pędów asymilacyjnych, można wyznaczyć ilość cukrów potrzebnych do ich wytworzenia (Wilson i in., 2008), pośrednio określić ilość absorbowanego światła, ilość asymilowanego CO₂ w procesie fotosyntezy przez cały łan szparagów, ilość cukrów zużywanych w procesie oddychania i gromadzonych w karpie. W praktyce problem polega na tym, że masy pędów asymilacyjnych nie można określić bezpośrednio *in vivo* na roślinie. Możliwe jest to tylko po ich ścięciu, co z kolei przekreśla prowadzenie dalszych badań na tych pędach. Z tego względu określenie zależności pomiędzy łatwo mierzalnymi parametrami pędów asymilacyjnych, takimi jak ich średnica mierzona kilka centymetrów nad ziemią, czy wysokość, może być przydatne w praktyce i przyczynić się do ułatwienia dalszych badań nad szparagiem.

Celem pracy było pogłębienie wiedzy na temat wzrostu i plonowania szparaga z uwzględnieniem bilansu cukrów w roślinach, jak również przeanalizowanie wpływu przebiegu warunków klimatycznych na plonowanie szparaga, zarówno w latach przed rozpoczęciem zbiorów wypustek, jak i w latach zbiorów. Dodatkowo określono wpływ temperatury powietrza na intensywność oddychania korzeni, wypustek i pędów asymilacyjnych szparaga oraz przeanalizowano ilość cukrów zużywanych na potrzeby oddychania poszczególnych organów rośliny. Oceniono również wpływ temperatury powietrza i promieniowania słonecznego na intensywność fotosyntezy. Podjęto także próbę opracowania modelu umożliwiającego wyznaczenie masy pędów asymilacyjnych na podstawie ich grubości i wysokości, co z kolei pozwoliło na określenie powierzchni pędów asymilacyjnych, ilości absorbowanego światła przez te pędy, produkcji cukrów w okresie asymilacji oraz zapotrzebowania cukrów na potrzeby oddychania pędów asymilacyjnych. W oparciu o uzyskane wyniki zaproponowano wskaźniki opisujące efektywność zużycia cukrów w odniesieniu do ilości absorbowanego światła przez pędy asymilacyjne oraz zebranego plonu.

1. PRZEGLĄD LITERATURY

1.1. Pochodzenie i opis botaniczny szparaga

Szparag lekarski (*Asparagus officinalis* L.) pochodzi z południowej Afryki (Norup i in., 2015). Należy do rodziny szparagowatych (*Asparagaceae*), która obejmuje co najmniej 211 gatunków, w większości występujących w Afryce (Norup i in., 2015; *Asparagus – the plant list*, 2018). Poza Afryką rośnie również w stanie naturalnym w Europie Środkowej (w tym w Polsce), na południu Europy, Bliskim Wschodzie oraz Syberii (Knaflowski i in., 1999a; Knaflowski, 2005; Norup i in., 2015).

Szparag jest byliną z silnie skróconym zimującym kłęczem, z którego wyrastają mięsiste korzenie oraz pąki. Kłęcze wraz z korzeniami i pąkami nazywane jest karpą. U szparaga występują dwa rodzaje korzeni: mięsiste korzenie spichrzowe oraz wyrastające z nich korzenie włókniste. Korzenie włókniste, żyjące zazwyczaj rok, pobierają wodę i składniki pokarmowe i zamierają zimą. Korzenie spichrzowe, w których magazynowane są cukry, mogą żyć kilka lat (Knaflowski i in., 1999a; Knaflowski, 2005).

Z pąków na kłęczu wyrastają pędy asymilacyjne. Młode pędy asymilacyjne po osiągnięciu 20–30 cm nazywane wypustkami stanowią część jadalną szparaga. Pędy asymilacyjne u młodych, nieplonujących roślin wyrastają na wiosnę, a na plantacjach plonujących po zakończeniu zbiorów wypustek pod koniec czerwca lub na początku lipca. Liście właściwe szparaga są silnie zredukowane i mają wygląd bezbarwnych błoniastych łusek. Nie spełniają one żadnej roli w procesie asymilacji CO₂. Fotosynteza u szparaga zachodzi głównie w końcowych fragmentach pędów – gałęziakach. Są to małe, pędowe twory igielkowe długości około 1 cm wyrastające na pędach bocznych w pęczkach po kilka sztuk, zwykle po pięć (Knaflowski i in., 1999a; Knaflowski, 2005).

Szparag jest rośliną dwupienną, rozdzielнопłciową i owadopylną. W górnej części pędu z kątów łuskowatych liści wyrastają po dwie sztuki drobnych kwiatów koloru zielonkawo-żółto-białego, dzwonekowi, z trzykrotnym okwiatem. Owocem szparaga jest jagoda właściwa o zabarwieniu początkowo zielonym, a w końcowym etapie dojrzewania czerwonym. Zawiera ona od jednego do dziewięciu (zwykle sześć) kulistych, czarnych matowych nasion. Masa 1000 nasion szparaga wynosi 18–29 g, a przydatność do użytku materiał siewny zachowuje przez 3–4 lata od zbioru (Brzeziński, 1931).

1.2. Rozwój części nadziemnych szparaga

Pędy asymilacyjne, wyrastające wiosną z pąków na karpie, są najpierw białe, później po wyrośnięciu nad powierzchnię gruntu przebarwiają się na kolor purpurowo-fioletowy i na końcu zielony. Z czasem drewnieją, a jesienią wraz z na-

dejsciem chłódów przebarwiają się na kolor żółty i zasychają. Zimą lub wczesną wiosną następnego roku są wycinane, aby w kolejnym sezonie mogły wyrastać nowe pędy (Knaflowski i in., 1999a; Knaflowski, 2005). Pędy asymilacyjne początkowo wyrastają dzięki cukrom zgromadzonym w karpie, później w coraz większym stopniu asymilują CO₂, aż do momentu, gdy same produkują więcej cukrów, niż potrzebują. Powszechnie uznaje się, że momentem przełomowym w tym zakresie jest rozwinięcie się gałęziaków.

Wielkość pędów asymilacyjnych zmienia się wraz z wiekiem roślin. W pierwszych latach po posadzeniu z roku na rok zwiększa się ona u szparaga aż do momentu, kiedy pędy dorastają do ponad 2 metrów wysokości i są silnie rozgałęzione. W kolejnych latach obserwuje się stosunkowo niewielkie fluktuacje w ich wielkości, zależne od warunków wzrostu oraz wielkości zebranego plonu. Po około 10 latach, wraz ze starzeniem się roślin, następuje zmniejszanie masy pędów asymilacyjnych (Knaflowski i in., 1999a; Knaflowski, 2005; Krzesiński i in., 2008b). Woolley i in. (2002) stwierdzili, że na wielkość pędów asymilacyjnych może wpływać długość dnia: jego skrócenie powoduje zmniejszenie pędów asymilacyjnych.

U szparaga występuje dominacja wierzchołkowa (Tiedjens, 1924; 1926; Kretschmer i Hartmann, 1979; Nichols i Woolley, 1985). Największa wypustka, wyrastająca z danego skupienia pąków na roślinie, hamuje wyrastanie nowych wypustek oraz spowalnia wzrost mniejszych. Dominacja jest tym silniejsza, im większa jest pierwsza wypustka. Jeżeli ilość uwalnianych cukrów jest większa, niż może zagospodarować pierwsza wyrastająca wypustka, następuje wzrost kolejnych wypustek. Początek wzrostu pąków na kłęczu, a tym samym ilość cukrów uwalnianych z korzeni spichrzowych, zależy w głównej mierze od temperatury gleby (Bouwkamp i McCully, 1972; Nichols i Woolley, 1985).

Udział masy gałęziaków w pędzie głównym jest skorelowany z wiekiem rośliny. Wraz z nim zmieniają się również proporcje pomiędzy masą pędu głównego, pędów bocznych i gałęziaków (Inagaki i in., 1989). Udział masy gałęziaków w masie całego pędu zmniejsza się z wiekiem rośliny, natomiast masa gałęziaków wzrasta ze względu na większą masę całych pędów. Pomimo mniejszego udziału masy gałęziaków jest ona większa u roślin starszych niż jednorocznych. W badaniach Inagaki i in. (1989) u jednorocznych roślin masa gałęziaków stanowiła około 62% całkowitej suchej masy pędu asymilacyjnego, natomiast u roślin trzyletnich tylko około 27%. Udział masy pędu głównego również zmieniał się z wiekiem roślin w zakresie od około 14% u roślin jednorocznych do około 52% u roślin trzyletnich. Udział masy pędów bocznych w całkowitej masie pędów zmieniał się w mniejszym stopniu i wahał się od około 22% u roślin trzyletnich do 24% u roślin jednorocznych (Inagaki i in., 1989).

W badaniach amerykańskich prowadzonych od końca lipca do końca września, obejmujących 8 genotypów szparaga, stwierdzono, że specyficzna masa gałęziaków (SLW – z ang. *Specific Leaf Weight*) wahała się w stosunkowo niewielkim zakresie od 10,4 mg·cm⁻² (genotyp 86Sam3) do 13,6 mg·cm⁻² (odmiana 'Franklin') (Bai i Kelly, 1999).

Knaflowski (1994) wyznaczył model regresyjny, który można wykorzystać do prognozowania wielkości plonu szparaga na podstawie parametrów pędów asymilacyjnych ocenianych w poprzednim roku. Prognoza była tym dokładniejsza, im

odmiana i warunki klimatyczne były bliższe warunkom, dla których kalibrowano model regresyjny.

1.3. Rozwój systemu korzeniowego

Kłacz szparaga jest na ogół rozgałęziony i przyrasta poziomo do 5 cm w ciągu roku. Przy zbyt głębokim posadzeniu karpki, kłacz może rosnać ukośnie w górę (Knaflowski i in., 1999a; Knaflowski, 2005).

Korzenie spichrzowe zwykle są nierozgałęzione, a po uszkodzeniu wierzchołka wzrostu przestają rosnać. Główna masa korzeni sięga do 1 m w głąb gleby, zaś pojedyncze korzenie mogą dorastać nawet do 3 m, a czasami i głębiej. Korzenie szparaga rosną również na boki, osiągając wysokość do 2,5 m długości. Przestrzenny rozkład korzeni zależy od właściwości fizycznych gleby, głównie stosunków powietrzno-wodnych i poziomu jej zwężności. Na glebach, w których występują niekorzystne warunki dla wzrostu korzeni, takie jak zbyt duża zawartość wody, mało powietrza, czy też, gdy w podglebiu znajdują się zbite warstwy, korzenie szparaga rosną głównie poziomo, natomiast na glebach lekkich, przepuszczalnych, o prawidłowych stosunkach powietrzno-wodnych lub glebach o dużej zawartości materii organicznej, większość korzeni szparaga rośnie w głąb. Silnie rozrośnięta roślina może mieć nawet ponad 1000 korzeni spichrzowych (Knaflowski i in., 1999a; Knaflowski, 2005; Drost i Wilson, 2002 i 2003).

W latach plonowania sucha masa karpki mieści się w zakresie od 6 t·ha⁻¹ do 20 t·ha⁻¹ (Wilson i in., 2008). Autorzy ci stwierdzili, że masa ta zmienia się w ciągu roku w zależności od ilości cukrów zgromadzonych w korzeniach.

1.4. Plonowanie

Liczne badania wykazały, że tempo wzrostu wypustek zależy od temperatury w okolicach wierzchołka wzrostu wypustki (Tiedjens, 1924; Culpepper i Moon, 1939a; 1939b; Bouwkamp i McCully, 1972). Początkowo jest to temperatura gleby, a po wyrośnięciu ponad glebę, temperatura powietrza. Maksymalna prędkość wyrastania wypustek dochodzi do 0,51 cm·h⁻¹ w temperaturze 30°C (Dean, 1999). Uważa się, że minimalna temperatura do wzrostu szparaga mieści się w zakresie od 0°C do 10°C i zależy od odmiany, kondycji roślin, wieku roślin i przebiegu warunków klimatycznych (Liebig i Wiebe, 1982; Dean, 1999; Wilson i in., 1999; Heißner i in., 2006). Zależność pomiędzy temperaturą poniżej 10°C a szybkością wzrostu wypustek jest krzywoliniowa, a w temperaturze od 10°C do 32°C prostoliniowa (Culpepper i Moon, 1939a; Blumenfeld i in., 1963; Nichols i Woolley, 1985). Optymalna temperatura do wyrastania wypustek wynosi 24,5–33°C, podczas gdy powyżej 35°C wypustki nie wyrastają (Dean, 1999). Szybkość uwalniania cukrów potrzebnych do wzrostu wypustek jest skorelowana z natężeniem oddychania korzeni.

Wielkość i jakość plonu szparaga zależy od wielu czynników, w tym od wielkości karp, odmiany, wieku plantacji (Knaflowski, 1994; Knaflowski i Kałużewicz, 1998), długości okresu zbioru (Knaflowski i in., 1999b; Hikasa, 2000; Caruso, 2002; Knaflowski i Krzesiński, 2002; Paschold i in., 2002) oraz temperatury powietrza (Poll i Kruistum, 1990; Yen i in., 1996; Knaflowski i Krzesiński, 1998).

Rośliny męskie i żeńskie różnią się pod względem wielkości i jakości plonu oraz charakterystyki pędów asymilacyjnych. U roślin żeńskich stwierdzono większe zróżnicowanie w średnicy wypustek i pędów asymilacyjnych, natomiast u roślin męskich duże zróżnicowanie pomiędzy roślinami dotyczyło wielkości plonu wczesnego i całkowitego oraz liczby wypustek (Ellison i in., 1960). Rośliny męskie wcześniej wchodziły w okres plonowania po założeniu plantacji, są plenniejsze, wcześniej wiosną rozpoczynają plonowanie i plonują oraz żyją dłużej niż rośliny żeńskie, ale ich wypustki są cieńsze. Rośliny żeńskie są mniej plenne, gdyż część asymilatów zużywana jest na owoce i nasiona, przez co mniej gromadzą w karpie substancji zapasowych, z których w następnym roku wyrastają wypustki (Yeager i Scott, 1938; Moon, 1976; Knaflowski i in., 1999a).

1.5. Przebieg fotosyntezy u szparaga i dobór metody jej pomiaru

Szparag jest rośliną, u której w okresie plonowania nie zachodzi fotosynteza. Dopiero po zakończeniu zbiorów następuje wyrastanie pędów asymilacyjnych. Wraz z pojawieniem się pędów nad powierzchnią gruntu wytwarzany jest w nich chlorofil i rozpoczyna się proces fotosyntezy. W tym okresie oddychanie zdecydowanie przeważa nad asymilacją CO₂. Wraz ze zwiększeniem zielonej powierzchni fotosyntetycznie aktywnej, przewaga oddychania nad fotosyntezą zmniejsza się, osiągając punkt, po przekroczeniu którego pędy asymilacyjne produkują więcej cukrów, niż same potrzebują i rozpoczyna się ich magazynowanie w korzeniach spichrzowych. W wyniku asymilacji CO₂ w korzeniach mięsistych gromadzone są cukry, które w następnym roku zostaną wykorzystywane do wytworzenia plonu oraz nowych pędów asymilacyjnych (Sawada i in., 1962; Inagaki i in., 1989).

Szparag jest rośliną typu C3 (Downton i Törökfalvy, 1975), u której fotosynteza zachodzi głównie w gałęziakach (Sawada i in., 1962; Inagaki i in., 1989). Wielkość fotosyntezy zachodzącej w pędzie głównym i rozgałęzieniach bocznych ma stosunkowo niewielkie znaczenie dla całkowitej asymilacji CO₂ netto pędu. W badaniach Inagaki i in. (1989) asymilacja CO₂ w rozgałęzieniach bocznych o średnicy 0,5–1 mm dochodziła do 30% asymilacji gałęziaków, a w pędzie głównym osiągała maksymalnie 3% poziomu asymilacji gałęziaków. Przyczyną mniejszej asymilacji netto CO₂ w pędach bocznych i w pędzie głównym niż w gałęziakach jest niższa zawartość chlorofilu oraz ich intensywniejszy proces oddychania. Inagaki i in. (1989) stwierdzili, że zawartość chlorofilu 'a' w gałęziakach dochodziła do 650 µg·g⁻¹ świeżej masy, a chlorofilu 'b' do 200 µg·g⁻¹ świeżej masy. Zawartość chlorofilu 'a' oraz chlorofilu 'b' w pędach bocznych była o około 25% mniejsza niż w gałęziakach.

W badaniach Bai i Kelly (1999) wykazano, że specyficzna masa gałęziaków była skorelowana z intensywnością fotosyntezy netto całych roślin ($r = 0,74$).

Zwiększenie SLW o $1 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ powodowało wzrost fotosyntezy netto średnio o $3,3 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

W ciągu dnia w godzinach południowych intensywność fotosyntezy netto jest największa (Bai i Kelly, 1999; Guo i in., 2002b). W badaniach Bai i Kelly (1999) odnotowano, że w dni słoneczne, od końca lipca do końca września, w godzinach od 9:00 do 18:00, średnia fotosynteza netto u 8 genotypów szparaga wahała się od $15,7 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (genotyp 86Sam3) do $27,8 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (odmiana 'Franklim').

Wraz ze starzeniem się zielonych pędów asymilacyjnych zmniejsza się maksymalna fotosynteza netto (Bai i Kelly, 1999; Guo, 2001), a wraz z rozpoczęciem żółknięcia pędów asymilacyjnych, intensywność asymilacji CO_2 zmniejsza się znacznie szybciej. Od 21 lipca do 23 września średnia intensywność fotosyntezy u ośmiu genotypów zmniejszyła się liniowo z $27 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ do $12 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Bai i Kelly, 1999).

Zależność fotosyntezy od natężenia światła obrazuje tzw. krzywa świetlna fotosyntezy. W całkowitej ciemności fotosynteza nie zachodzi, rozpoczyna się natomiast od momentu pojawienia się pierwszych zaabsorbowanych fotonów przez gałęziaki. Etap ten charakteryzuje się największą efektywnością wykorzystania PPF. Wraz ze wzrostem ilości światła efektywność wykorzystania fotonów w procesie fotosyntezy spada aż do osiągnięcia poziomu, przy którym nie obserwuje się już wzrostu fotosyntezy. Krzywe świetlne dostarczają następujących wskaźników (Licor, 2018):

- intensywność oddychania w ciemności (Rd),
- punkt kompensacji świetlnej (Q_c) – poziom PPF, przy którym równoważą się procesy pobierania (fotosynteza) i wydzielania CO_2 (oddychanie komórkowe, fotooddychanie) przez roślinę. Roślina nie wydziela ani nie pobiera CO_2 ,
- punkt wysycenia światłem (Q_{max}) – poziom PPF, powyżej którego nie wzrasta intensywność fotosyntezy,
- wydajność kwantowa (α) – początkowe nachylenie krzywej opisującej intensywność fotosyntezy.

Istnieją cztery metody wyznaczania krzywych świetlnych: szybka, wolna, pomiary na wielu liściach i poprzez cieniowanie (Licor, 2018).

Metoda szybka wyznaczania krzywych świetlnych polega na wykonaniu pomiarów po przystosowaniu liści do dużej intensywności światła, a następnie obniżeniu poziomu PPF o $200 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ lub mniej co każde 1–2 minuty. Przy tej metodzie czasami aparaty szparkowe nie mają wystarczającej ilości czasu, aby dostosować poziom otwarcia aparatów szparkowych do ilości światła, przez co pozostają bardziej otwarte, niż są normalnie, zwłaszcza przy niskich wartościach PPF. Nie ma to generalnie znaczenia dla samej krzywej, należy jednak ostrożnie interpretować wyniki dotyczące przewodności szparkowej oraz międzykomórkowego poziomu CO_2 (C_i), gdyż odnoszą się do warunków nie w pełni stałych (Licor, 2018).

Metoda wolna wyznaczania krzywych świetlnych polega na wykonaniu pomiarów asymilacji CO_2 po 15–20 minutach od zmiany natężenia PPF. Pomiary można wykonywać, rozpoczynając od ciemności do maksymalnej intensywności PPF oraz odwrotnie. Przy tego typu pomiarach aparaty szparkowe mają wystarczającą ilość czasu, aby dostosować poziom otwarcia do ilości światła, co powoduje,

że wartość Ci jest mniej więcej stała przy wszystkich pomiarach. W rzeczywistości Ci można wykorzystać jako wskaźnik, kiedy należy wykonać następny pomiar, z wyjątkiem pomiaru w ciemności (Licor, 2018).

Trzecia metoda wyznaczania krzywych świetlnych polega na wykonaniu pomiaru na wielu liściach dostosowanych do aktualnego natężenia promieniowania słonecznego. Pomiary wykonuje się przy różnym natężeniu PPFD oraz w ciemności tak, aby uzyskać całą krzywą. W metodzie tej zmienność pomiędzy pomiarami wynika z wykorzystania liści, które mogą się różnić wiekiem, grubością, zawartością chlorofilu czy kątem padania na nie promieni słonecznych. Zmienność związaną z różnym kątem padania promieni słonecznych można zniwelować, stosując lampę zakładaną na klips pomiarowy, z intensywnością PPFD dostosowaną do aktualnego promieniowania słonecznego. Metoda ta nie jest polecana dla wszystkich gatunków roślin. Można ją wykorzystać na przykład dla drzew liściastych, u których wymienione czynniki mają stosunkowo małe znaczenie (Licor, 2018). U szparaga metoda ta nie sprawdza się ze względu na dużą zmienność gałęziaków. Pędy asymilacyjne intensywnie wyrastają w ciągu 2–3 tygodni, jednak nie jednocześnie, ponadto część pędów asymilacyjnych wyrasta w późniejszym terminie, aż do jesieni.

Punkt kompensacji świetlnej wynosi dla szparaga od 1,2 klx do 2 klx ($28\text{--}37 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (Inagaki i in., 1989).

Punkt wysycenia światłem jest uzależniony od wieku pędów asymilacyjnych. Pędy młode mają wyższy punkt wysycenia światłem niż pędy stare. W badaniach Inagaki i in. (1989) stwierdzono, że punkt wysycenia światłem u pędów młodych wynosi 40–50 klx ($740\text{--}925 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), a u starszych mieści się w zakresie 10–20 klx ($185\text{--}370 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), zaś temperatura optymalna dla fotosyntezy szparaga zawiera się w przedziale około $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

1.6. Procesy oddychania u szparaga

Wielu autorów stosuje podział na oddychanie bytowe (ang. *maintenance respiration*) związane z podtrzymaniem procesów życiowych istniejących organów roślin oraz oddychanie wzrostowe (ang. *growth respiration*) zależne od przyrostu masy różnych części rośliny (Amthor, 1984; 1989; Marcelis i in., 1998). W obu rodzajach oddychania zużywane są cukry. Gdy cukrów jest zbyt mało na zaspokojenie wszystkich potrzeb w roślinie, to w pierwszej kolejności są one zużywane na potrzeby oddychania bytowego (Marcelis i in., 1998). Oddychanie bytowe rośnie wraz z temperaturą (Amthor, 1984) i maleje wraz z wiekiem organów roślinnych (McCree, 1982; 1988; Amthor, 1989). Oddychanie bytowe zależy od gatunku i odmiany oraz części rośliny. Największy poziom oddychania bytowego stwierdzono w gałęziakach, mniejszy w pędach i korzeniach, a najmniejszy w organach spichrzowych (Penning de Vries i Van Laar, 1982; Marcelis i in., 1998). Oddychanie bytowe korzeni szparaga w okresie zbiorów wypustek wynosi 15% suchej masy korzeni (Wilson i in., 2008). Guo (2001) nie stwierdził różnic w poziomie oddychania w ciemności u dwóch odmian szparaga.

Poziom oddychania wzrostowego zależy od składu chemicznego roślin. Może być on obliczony również na podstawie zawartości węgla i azotu lub węgla i popiołu (Penning de Vries i in., 1974; Penning de Vries i Van Laar, 1982; Vertregt i Penning de Vries, 1987; Amthor, 1989). Wilson i in. (2008) przyjęli dla szparaga współczynnik konwersji cukrów na suchą masę na poziomie 0,7, co jest wartością często spotykaną w literaturze dla innych gatunków roślin (Vertregt i Penning de Vries, 1987; Amthor, 1989; Marcelis i in., 1998).

1.7. Synteza cukrów w roślinach szparaga

Wielkość uzyskiwanych plonów ma niewątpliwie związek z zawartością cukrów w karpie szparaga. Wraz z postępującym zbiorem wypustek i w początkowym okresie tworzenia pędów asymilacyjnych stężenie cukrów w korzeniach spada, natomiast pod koniec okresu asymilacji wzrasta prawie trzykrotnie (Hikasa i Kamata, 1994). W korzeniach spichrzowych gromadzone są głównie fruktany i niewielka ilość sacharozy, glukozy i fruktozy (Pressman i in., 1989; Martin i Hartmann, 1990; Hirayama i in., 1993; Hikasa i Imada, 1995). Martin i Hartmann (1990) stwierdzili, że w korzeniach występuje również niewielka ilość skrobi. Sacharoza jest głównym cukrem transportowym do korzeni spichrzowych (Hikasa i Imada, 1995). Fruktany to oligosacharydy składające się z cząsteczki glukozy i przyłączonych do niej, w zależności od stopnia polimeryzacji (DP), cząsteczek fruktozy (Hirayama i in., 1993). W roślinie szparaga fruktany pełnią podwójną rolę: jako węglowodany zapasowe i jako bufor osmotyczny (Martin i Hartmann, 1990). W korzeniach spichrzowych 80% wszystkich węglowodanów stanowią fruktany, 18% wolne cukry i 2% skrobia (Martin i Hartmann, 1990). Skład cukrów i ich zawartość zależą od wieku korzeni. Sacharoza i fruktany o DP = 2–4 występują w starych, a fruktany o wyższym stopniu polimeryzacji w młodych korzeniach spichrzowych (Hikasa i Imada, 1995). Fruktany nie występują natomiast w cienkich korzeniach włóknistych, w których stwierdzano wysoki poziom sacharozy i monosacharydów (Martin i Hartmann, 1990; Hikasa i Imada, 1995).

Umiarkowane obniżenie zawartości cukrów występuje w warunkach niskiej temperatury i suszy (Pressman i in., 1989; 1993). Stwierdzono również, że obniżenie temperatury z jednoczesnym nawadnianiem powoduje początkowo spadek poziomu tych węglowodanów, z następującym po nim szybkim jego wzrostem. Uważa się więc, że fruktany pełnią rolę nie tylko substancji zapasowych, ale także metabolitów regulujących, będących przykładowo składnikiem buforów osmotycznych. Dzięki temu, szparagi łatwo adaptują się do różnych warunków środowiska zarówno w klimacie umiarkowanym jak i tropikalnym (Martin i Hartmann, 1990).

Organem spichrzowym jest również kłącze szparaga, gdyż około 63% węglowodanów w nim zgromadzonych występuje w formie fruktanów. Wysoka zawartość wolnych cukrów (35% wszystkich węglowodanów) świadczy natomiast według Martina i Hartmanna (1990) o tym, że przez kłącze transportowane są one pomiędzy częścią nadziemną i podziemną rośliny.

Matsubara (1981) stwierdził, że zawartość cukrów w wypustkach wahała się od 1,5 do 7,3%. Według Martina i Hartmanna (1990) wolne cukry stanowią 80% wszystkich węglowodanów w wypustkach. Zawartość cukrów w wypustkach jest nierównomiernie rozłożona. Bliżej główki znajduje się mniej cukrów niż u podstawy wypustki (Oguri i in., 1984; Żurawicz, 2006; Żurawicz i in., 2008). Najwięcej cukrów miały wypustki rosnące w niskich temperaturach. Zielone wypustki szparaga zawierają mniej cukrów rozpuszczalnych i innych węglowodanów niż wypustki białe (Li i Zhang, 1994). Zawartość cukrów w wypustkach szparaga zależy od terminu zbioru. Im później były zbierane wypustki, tym mniej zawierały cukrów (Żurawicz, 2006).

Produkty fotosyntezy gromadzone są głównie w młodych organach rośliny. W badaniach przeprowadzonych przez Hikasa i Imada (1995) względne zapotrzebowanie na produkty asymilacji było największe w gałęziakach, a stosunkowo małe w systemie korzeniowym. Stwierdzono nieco większe zapotrzebowanie na asymilaty w młodych korzeniach spichrzowych oraz cienkich korzeniach włóknistych niż w starych korzeniach spichrzowych (Hikasa i Imada, 1995). Pędy asymilacyjne szparaga zawierają 45,1% węgla w suchej masie i 45,8% C w suchej masie karpki (Araki i in., 2012). Po osiemnastu godzinach od pobrania $C^{14}O_2$ stwierdzono, że znaczony węgiel został wbudowany przede wszystkim w gałęziaki i łodygi, a tylko 20% zgromadzone zostało w korzeniach (Hikasa i Imada, 1995). Zawartość suchej masy w pędach asymilacyjnych szparaga była największa latem i stopniowo zmniejszała się późną jesienią i wczesną wiosną (Hikasa i Kamata, 1994).

Długość dnia może wpływać na partycjonowanie cukrów w roślinie szparaga (Woolley i in., 2002). Skrócenie dnia z 15,5 do 14 godzin spowodowało zwiększenie ilości cukrów magazynowanych w korzeniach oraz zmniejszenie przyrostu pędów asymilacyjnych. Skrócenie dnia poniżej 14 godzin nie zwiększało ilości cukrów magazynowanych w korzeniach, co według tych autorów może sugerować, że na partycjonowanie cukrów ma wpływ także niska temperatura.

Przed zimą następuje wzrost zawartości suchej masy w korzeniach szparaga. Siomos i Pontikidou (2000) stwierdzili, że największa zawartość suchej masy w korzeniach szparaga występowała jesienią (21,3%), a najmniejsza po wyrośnięciu pędów asymilacyjnych (11,4%).

Zawartość suchej masy w zielonych wypustkach szparaga zmieniała się w okresie zbiorów od 7,6% wiosną do 6,7% latem. Cukry stanowiły odpowiednio 23,6% i 17,0% suchej masy (Shou i in., 2007).

W Nowej Zelandii opracowano model plonowania szparaga w oparciu o zawartość cukrów w roślinie (Wilson i in., 2002a), który jest wykorzystywany w systemie wspomagania decyzji. System ten dostarcza informacji na temat efektów kończenia zbiorów w różnych terminach, co ułatwia producentom szparaga podejmowanie decyzji o zakończeniu zbiorów (Wilson i in., 2002b). W modelu tym uwzględniono również temperaturę i promieniowanie słoneczne, jednak nie wzięto pod uwagę ilości poszczególnych cukrów, a tylko ich ogólną zawartość.

1.8. Znaczenie prognozowania wzrostu i plonowania roślin

Do prognozowania wzrostu i plonowania roślin wykorzystywane są modele matematyczne. Dają one możliwość testowania hipotez, podsumowania istniejącej wiedzy, opisanie i zrozumienia zachodzących procesów oraz porównania różnych scenariuszy wzrostu i plonowania (Marcelis i in., 1998). Modele mogą być wykorzystywane w systemach wspomagania decyzji, które umożliwiają użytkownikowi optymalizację uprawy i podjęcie najbardziej racjonalnych działań. Wykorzystywane są również do planowania produkcji (Lentz, 1998). Plon roślin determinowany jest produkcją suchej masy, jej dystrybucją oraz zawartością w różnych organach rośliny. Produkcja suchej masy napędzana jest przez fotosyntezę, która zależy od absorpcji światła przez liście roślin. Największe znaczenie dla ilości absorbowanego światła ma powierzchnia liści, która jest zależna od wielkości produkcji suchej masy i rozdziału suchej masy do poszczególnych organów rośliny (Marcelis i in., 1998).

Modele dzieli się na opisowe i mechanistyczne. Modele opisowe, często nazywane statystycznymi, regresyjnymi lub empirycznymi, w niewielkim stopniu lub wcale nie odwzorowują mechanizmów działania systemów. Natomiast modele mechanistyczne zawierają ilościowy opis mechanizmów i procesów w roślinie (Penning de Vries i in., 1989). Modele te zawierają submodele i hierarchiczną strukturę opisującą wzrost. Na najniższym poziomie hierarchii, modele mechanistyczne korzystają z submodeli opisowych, przez co są ograniczone ilością poziomów w hierarchii (Larsen, 1990). Obecnie tworzy się bardziej złożone modele mechanistyczne uwzględniające coraz więcej procesów i mechanizmów różnicujących wzrost i plonowanie roślin nawet na poziomie komórkowym, jednak przy obecnym stanie wiedzy nie są one w stanie odwzorować całego systemu. Im bardziej jest rozbudowany model mechanistycznym, tym trudniej jest go wykorzystać w praktyce do prognozowania wzrostu i plonowania roślin (Marcelis i in., 1998).

Prace dotyczące prognozowania wzrostu i plonowania szparaga z wykorzystaniem modeli matematycznych prowadzone są od wielu lat zarówno w Polsce, jak i na świecie (Knaflewski, 1994; Wilson i in., 1999; 2002; Drost i Wilcox-Lee, 2000; Knaflewski i in., 2002; Cembali i in., 2004; Cembali i Hood, 2009; Feller, 2012).

2. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

2.1. Zakres badań

2.1.1. Metodyka przeprowadzenia doświadczeń

Badania obejmowały siedem doświadczeń prowadzonych w latach 1994-2012 w polu, tunelu foliowym, szklarni oraz kamerach vegetacyjnych. W niniejszej pracy wykorzystano dotychczas nieopublikowane wyniki z tych doświadczeń. Analiza obejmowała rezultaty z następujących doświadczeń wykonanych na terenie Stacji Doświadczalnej „Marcelin” Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu (N: 52°24'32"; E: 16°51'25"):

D.1. Doświadczenia polowe

- D.1.1 Plonowanie pięciu odmian szparaga sadzonych w trzech kolejnych latach
- D.1.2 Wpływ terminu kończenia zbiorów na plonowanie dwóch odmian szparaga ('Backlim' i 'Gijnlim')
- D.1.3 Wpływ terminu kończenia zbiorów na plonowanie odmiany 'Thielim'

D.2. Doświadczenia prowadzone w warunkach kontrolowanych

- D.2.1 Temperatura i wielkość karpki a plonowanie szparaga
- D.2.2 Wiek roślin a plonowanie z uwzględnieniem bilansu cukrów
- D.2.3 Wpływ wieku roślin na wzrost pędów asymilacyjnych z uwzględnieniem bilansu cukrów
- D.2.4 Krzywe świetlne fotosyntezy.

Doświadczenia polowe (D.1)

Wszystkie doświadczenia polowe przeprowadzono na glebie pólowej wytworzonej z piasku gliniastego, który zalegał na glinie lekkiej, silnie spiaszczonej. Zabiegi agrotechniczne, ochrona przed chorobami i szkodnikami, zwalczanie chwastów oraz nawożenie i nawadnianie były wykonywane zgodnie z aktualnymi zaleceniami i nie limitowały w istotny sposób wzrostu szparaga (Knaflowski, 2005).

Doświadczenie D.1.01. Celem badań było określenie wpływu warunków środowiska na plonowanie pięciu odmian szparaga ('Gijnlim', 'Andreas', 'Thielim', 'J. Giant', 'Vulkan') sadzonych w trzech kolejnych latach. Doświadczenie założono w układzie bloków losowych w czterech powtórzeniach. Rozsadę szklarniową sadzono na tym samym polu w końcu lipca w trzech kolejnych latach 1994, 1995 i 1996. Na każdym poletku doświadczalnym posadzono 20 roślin na głębokość 20 cm, w rozstawie 170 × 40 cm. Zielone wypustki szparaga o długości 22 cm były wycinane codziennie. Zbiory trwały do 20 czerwca. Ze względu na różne lata sadzenia rozsady, kolejne lata zbiorów wypustek przypadały w różnych latach kalendarzowych (tab. 1).

Analiza dotyczyła przede wszystkim takich warunków środowiska jak: temperatura powietrza, opady i całkowite promieniowanie słoneczne (radiacja). Oddzielnie

Tabela 1. Rok zbiorów a rok kalendarzowy w doświadczeniu D.1.01
 Table 1. The harvest year vs. calendar year in experiment D.1.01

Rok sadzenia Planting year	Rok zbiorów – Harvest year						
	0*	1	2	3	4	5	6
1994	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
1995	1998	1999	2000	2001	2002	2003	–
1996	1999	2000	2001	2002	2003	–	–

*Wstępny krótki zbiór przez około 2 tygodnie, nieuwzględniony w analizie.

Źródło: opracowanie własne (dla wszystkich tabel w rozprawie).

*Short preliminary harvest lasting about two weeks not included in analysis.

Source: own elaboration (for all tables in this book).

analizowano warunki atmosferyczne w pierwszych latach po posadzeniu roślin do pierwszego zbioru wypustek i w latach zbiorów wypustek z wydzieleniem okresu asymilacji.

Pierwszy dzień okresu asymilacji w roku sadzenia rozpoczynał się każdego roku 1 sierpnia, w kolejnych latach bez zbioru wypustek 1 maja, a w latach, w których zbierano wypustki – od dnia zakończenia zbiorów. Za koniec okresu asymilacji uznano dzień, w którym wystąpiły pierwsze jesienne przymrozki, gdy temperatura powietrza spadała poniżej 0°C.

Za początek okresu zbiorów w każdym roku przyjęto dzień, w którym pierwszy raz zbierano wypustki szparaga, dlatego liczba dni zbiorów wahała się od 49 dni w roku 2003 i 2004 do 62 dni w roku 1999 (tab. 9). Wyniki dotyczące zawartości cukrów w tym doświadczeniu zostały wcześniej opublikowane (Gąsecka i in., 2002; Stachowiak i in., 2003; Gąsecka i in., 2008).

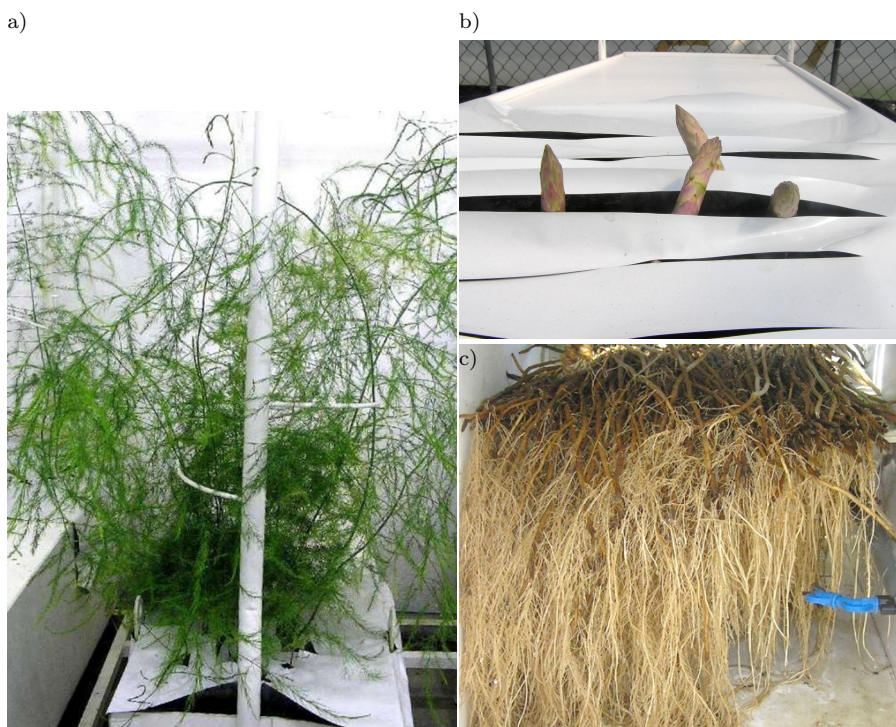
Doświadczenie D.1.02. Celem badań było określenie wpływu terminu kończenia zbiorów na wzrost i plonowanie szparaga. Wyniki tego doświadczenia zostały wykorzystane do analizy bilansu cukrów. Dwuczynnikowe doświadczenie w układzie bloków losowanych w czterech powtórzeniach rozpoczęto w roku 1998 i zakończono w roku 2010. Pierwszym czynnikiem doświadczenia były dwie odmiany szparaga ‘Gijnlim’ i ‘Backlim’, a drugim trzy różne terminy kończenia zbiorów wypustek. Zbiory kończono 10 czerwca (termin skrócony), 20 czerwca (tradycyjny) i 30 czerwca (wydłużony). Rozsadę doniczkową, produkowaną w szklarni, posadzono w rozstawie 1,8 m × 0,35 m na głębokość ok. 20 cm w roku 1998. Na każdym poletku posadzono 20 roślin. Część wyników z tego doświadczenia została opublikowana wcześniej (Żurawicz, 2006; Żurawicz i in., 2008; Knaflewski i in., 2010).

Doświadczenie D.1.03. Celem badań było, podobnie jak i w poprzednim doświadczeniu D.1.02, określenie wpływu terminu kończenia zbiorów na wzrost i plonowanie szparaga z uwzględnieniem bilansu cukrów. W badaniach wykorzystano odmianę ‘Thielim’ i zastosowano te same terminy kończenia zbiorów co w doświadczeniu D.1.02. Jednoczynnikowe doświadczenie w układzie bloków losowanych, w czterech powtórzeniach, założono w roku 1998. Rozsadę doniczkową produkowaną w szklarni posadzono w rozstawie 1,8 m × 0,35 m na głębokość około 20 cm. Na każdym poletku posadzono 20 roślin.

Doświadczenia w warunkach kontrolowanych D.2

Doświadczenie D.2.01. Celem badań było określenie wpływu wielkości karpki i temperatury powietrza na fotosyntezę i oddychanie różnych organów szparaga, stężenie i ilość cukrów oraz plonowanie szparaga. Doświadczenie dwuczynnikowe w układzie całkowicie losowym założono w czterech powtórzeniach w latach 2005–2006. Powtórzenie stanowiła jedna roślina. Pierwszym czynnikiem była wielkość karpki ($3,1 \pm 1,2$ kg i $1,3 \pm 0,3$ kg), a drugim temperatura powietrza (15, 20 i 25°C). Rośliny szparaga były uprawiane metodą aeroponiczną w układzie zamkniętym z recyrkulacją pożywki (ryc. 1a) i c)). Badania przeprowadzone w kamerze vegetacyjnej o powierzchni 10 m^2 , obejmowały trzy cykle uprawowe, każdy składający się z okresu asymilacji i zbiorów. Czteroletnie karpki szparaga odmiany 'Eposs' posadzono 18 kwietnia 2005 roku do zbiorników o pojemności 250 dm^3 . Szczegółowy opis metody i część wyników została opublikowana wcześniej (Gąsecka i in., 2009).

Doświadczenie D.2.02. Celem doświadczenia było określenie wpływu wieku roślin szparaga na jego plonowanie z uwzględnieniem bilansu cukrów. W doświad-



Ryc. 1. Rośliny szparaga uprawiane metodą aeroponiczną: a) w okresie asymilacji, b) początek zbiorów wypustek, c) system korzeniowy

Źródło: opracowanie własne (dla wszystkich rycin w rozprawie).

Fig. 1. Asparagus plants cultivated in the aeroponic system: a) the assimilation period, b) the beginning of spear harvest, c) the root system

Source: own elaboration (for all figures in this book).

czeniu tym wykonano też pomiary fotosyntezy i oddychania różnych organów szparaga. Jednoczynnikowe doświadczenie założono w tunelu foliowym w układzie bloków losowanych w trzech powtórzeniach. Powtórzenie stanowiła jedna roślina. Czynnikiem doświadczenia był wiek rośliny. Badania wykonano na jednorocznych, czteroletnich i siedmioletnich roślinach szparaga odmiany 'Eposs'. Rośliny uprawiane były metodą aeroponiczną w układzie zamkniętym z recyrkulacją pożywki (ryc. 1). Doświadczenie powtórzono dwukrotnie w warunkach kontrolowanych (sadzenie roślin 18 kwietnia 2005 oraz 1 września 2005). W analizie wyników wzrostu wypustek wykorzystano dane dotyczące stanu roślin (zawartości cukrów) i warunków klimatycznych w czasie prowadzenia doświadczenia, nie odnosząc wyników bezpośrednio do terminu sadzenia. Szczegółowy opis metody i część wyników zostały opublikowane wcześniej (Krzesiński i in., 2008a).

Doświadczenie D.2.03. Celem badań było określenie wpływu wieku roślin na wzrost pędów asymilacyjnych z uwzględnieniem bilansu cukrów. W doświadczeniu tym wykonano też pomiary fotosyntezy i oddychania różnych organów szparaga. Jednoczynnikowe doświadczenie w układzie bloków losowanych założono w tunelu foliowym w trzech powtórzeniach. Powtórzenie stanowiła jedna roślina szparaga odmiany 'Eposs'. Czynnikiem doświadczenia był wiek rośliny. Dwuletnie karpysze szparaga ważyły średnio 1,97 kg \pm 0,91 kg, pięcioletnie 2,07 kg \pm 0,54 kg, a ośmioletnie 3,34 \pm 1,10 kg. Rośliny uprawiane były metodą aeroponiczną w układzie zamkniętym z recyrkulacją pożywki. Rośliny posadzono w dwóch terminach: 27 kwietnia oraz 11 sierpnia 2006. Uprawę zakończono odpowiednio po 97 i 98 dniach od dnia sadzenia. W analizie wyników wzrostu pędów asymilacyjnych wykorzystano dane dotyczące stanu roślin (zawartości cukrów) i warunków klimatycznych w czasie prowadzenia doświadczenia, nie odnosząc wyników bezpośrednio do terminu sadzenia. Szczegółowy opis metody i część wyników opublikowano wcześniej (Krzesiński i in., 2008b).

Doświadczenie D.2.03. Celem doświadczenia było określenie wpływu temperatury na krzywe świetlne fotosyntezy dla ośmiu odmian szparaga. Pomiary wykonano w temperaturze powietrza 15°C, 20°C, 25°C i 30°C. Dwuczynnikowe doświadczenie w układzie bloków losowanych w sześciu powtórzeniach założono w kamerze vegetacyjnej w latach 2011–2012. Drugim czynnikiem doświadczenia były odmiany: 'Avalim', 'Ercole', 'Gijnlim', 'Guelph Millennium', 'NJ 953', 'Pacific 2000', 'UC 157' i 'Vittorio'. Nasiona wysiano w połowie kwietnia do doniczek o pojemności 0,2 l wypełnionych torfem i piaskiem (1:1). Po dwóch miesiącach rośliny przesadzono do większych doniczek o pojemności 0,75 l.

2.1.2. Charakterystyka wybranych odmian szparaga

Odmiany szparaga wykorzystywane zarówno w doświadczeniach polowych, jak i doświadczeniach w kontrolowanych warunkach były odmianami w 100% męskimi, z wyjątkiem odmian 'Eposs' i 'Pacific 2000', które były odmianami dwupiennymi.

'Avalim' i 'Gijnlim' zostały wyhodowane w Holandii (Limgroup) do uprawy w klimacie umiarkowanym zarówno na zbiór wypustek białych, jak i zielonych.

Odmiany ‘Backlim’ i ‘Thielim’ również pochodzą z Holandii, polecane są jednak głównie na zbiór białych wypustek. ‘Backlim’ jest odmianą późną a ‘Thielim’ średnio wczesną. Obydwie odmiany są dobrze plonujące, o grubych wypustkach. ‘Avalim’ jest bardzo wczesną, pełną odmianą, charakteryzującą się grubymi wypustkami dobrej jakości. ‘Gijnlim’ daje zazwyczaj wczesny i duży plon. Odmiana ta jest wysoce odporna na rdzę szparaga (*Puccinia asparagi* DC.). Jej wypustki są proste i gładkie, z zamkniętymi główkami (Limseeds BV, 2018).

Odmiany ‘Ercole’ i ‘Vittorio’ zostały wyhodowane we Włoszech. ‘Ercole’ jest odmianą średnio wczesną, przeznaczoną do uprawy w klimacie umiarkowanym, z dobrą odpornością na rdzę szparaga, tworzącą wypustki średniej grubości (RAGGI VIVAI, 2018). ‘Vittorio’ jest odmianą relatywnie pełną, do uprawy w klimacie umiarkowanym. Tworzy proste wypustki, względnie grube z zamkniętą główką.

‘UC 157’ pochodzi z USA. Jest to odmiana wczesna, polecana dla uprawy w klimacie umiarkowanym i ciepłym. Tworzy wypustki średniej grubości. Uprawiana jest głównie w Kalifornii, Meksyku i Peru (Walker Seed, 2018).

‘Guelph Millennium’ pochodzi z Kanady i charakteryzuje się dobrą odpornością na mroźne zimy. Jest to odmiana późna, tworząca dobrej jakości wypustki. ‘Pacific 2000’ został wyhodowany w Nowej Zelandii do uprawy w ciepłym oraz umiarkowanym klimacie. Jest tolerancyjny na choroby. Wypustki tworzą ścisłe główki (Hargreaves Plants, 2018). ‘NJ 953’ pochodzi z New Jersey, USA. Charakteryzuje się dużą tolerancją karpki na *Fusarium oxysporum* f. sp. *asparagi*. Jest odmianą chronioną patentem, o dobrej jakości wypustek (Chin i in., 2010).

‘Eposs’ pochodzi z Niemiec. Jest to odmiana wczesna, tolerancyjna na choroby i dość pełna, o wyrównanych wypustkach średniej grubości i ścisłych główkach (Knaflowski, 2005).

2.2. Ocena plonowania

Zielone wypustki szparaga o długości 20–22 cm były zbierane codziennie do 15 maja, a następnie co drugi dzień, zazwyczaj do 20 czerwca. Po zbiorze wypustki były liczone i ważone oraz dzielone na klasy jakości zgodnie z normą PN-R-75504:1993 na podstawie średnicy i wyglądu. Zbyt długie wypustki skracano do 22 cm. Klasa ekstra obejmowała wypustki proste, o ścisłych główkach i minimalnej średnicy 12 mm (ekstra B). Określony został również procentowy udział w plonie wypustek o średnicy powyżej 16 mm (ekstra A). Do pierwszej klasy zaliczano wypustki o ścisłych główkach, z dopuszczalnym lekkim skrzywieniem. Wypustki o średnicy 12–16 mm zaliczono do klasy IA, a o średnicy 6–12 mm do klasy IB. Do klasy drugiej zaliczano wypustki z lekko rozluźnioną główką, o dopuszczalnych większych skrzywieniach niż w pierwszej klasie, a średnica minimalna wypustek wynosiła 6 mm. Wśród wypustek stanowiących plon niehandlowy określono liczbę wypustek z rozluźnioną główką, sparciałych i krzywych, które na długości 10 cm miały ponad 2 cm odchylenia.

2.3. Karpy szparaga

W doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 świeża i sucha masa karp została określona po ich wykopaniu w latach 2002, 2006 i 2011. Z każdego poletka wykopano dwie karpy, a w roku 2011 wszystkie karpy z 2 mb. Po wykopaniu karpy umyto, a następnie określano ich świeżą i suchą masę metodą wagową. Zawartość suchej masy określana była po wysuszeniu korzeni w temperaturze 105°C. Stężenie cukrów określono metodą HPLC po hydrolizie kwasowej (Siomos i Pontikidou, 2000). W latach, w których nie wykopywano karp, masa karpy była interpolowana.

2.4. Ocena parametrów pędów asymilacyjnych

2.4.1. Średnica i wysokość pędu asymilacyjnego a jego masa

Pomiary morfologiczne pędów asymilacyjnych wykonywane były pod koniec sierpnia i we wrześniu, gdy rośliny osiągnęły już swoją maksymalną wielkość. Pędy liczono i mierzono ich średnicę (d_{PA}) oraz wysokość (H_{PA}). Z każdego poletka pomiarom podlegało dziesięć pierwszych roślin, a w przypadku gdy nie było wyraźnej granicy pomiędzy roślinami, mierzono pędy z 2 mb rzędu roślin. U trzech pierwszych roślin lub roślin z pierwszego metra rzędu, mierzono dodatkowo średnicę pędów na wysokości 5 cm nad powierzchnią gleby za pomocą suwmiarki z dokładnością do 1 mm. Wysokość pędów była określana za pomocą tyczki z przymocowaną miarą z dokładnością do 1 cm.

Sumę powierzchni przekrojów poprzecznych pędów asymilacyjnych na 1 m² pola (PP_{PA}) obliczono według wzoru:

$$PP_{PA} = \sum_{n=1}^{N_{PA}} \pi \cdot r_{PA}^2$$

w którym: r_{PA} – promień pędu ($r_{PA} = \frac{d_{PA}}{2}$),

N_{PA} – liczba pędów asymilacyjnych na 1 m².

W latach 2004–2007 określono zależności pomiędzy wysokością, średnicą i masą pędów asymilacyjnych. Analizę przeprowadzono na podstawie 848 pomiarów, wykonanych w polowych doświadczeniach D.1.01, D.1.02 i D.1.03. Masę każdego pędu asymilacyjnego (M_{PA}) określano metodą wagową z dokładnością do 1 grama bezpośrednio po jego ścięciu. Do analizy wykorzystano w pełni rozwinięte pędy asymilacyjne o masie w zakresie od 0,8 g do 719,2 g i średnicy od 1 do 29 mm (tab. 2). Wysokość pędów dochodziła do 250 cm, przy czym najniższe pędy asymilacyjne miały 20 cm wysokości.

Do analizy korelacji i regresji zgromadzono dane o możliwie jak największym zakresie i rozkładzie normalnym (tab. 2). Największe zróżnicowanie wyrażone wartościami wariancji i odchylenia standardowego spośród analizowanych cech pędów

Tabela 2. Statystyki opisowe cech morfologicznych pojedynczego pędu asymilacyjnego
 Table 2. The descriptive statistics of morphological features of an individual summer stalk

Cecha pędu asymilacyjnego Summer stalk characteristics	Średnia Average	Minimum Minimum	Maksimum Maximum	Mediana Median	Odchylenie standardowe Standard deviation	Wariancja Variance	Kurtoza Kurtosis	Skośność Skewness	Liczba danych Number of data
Masa (g) Weight (g)	79,5	0,8	719,2	24,0	123,5	15 259	6,70	2,52	848
Wysokość (cm) Height (cm)	123,4	20	250	120	53,4	2 856	-0,87	-0,01	848
Średnica (mm) Diameter (mm)	7,8	1,0	29,0	5,0	5,8	34	1,61	1,40	848

asymilacyjnych stwierdzono w danych opisujących ich masę, a najmniejsze w dotyczących ich średnicy. Spośród wszystkich badanych cech zgromadzone wyniki opisujące wysokość roślin miały rozkład najbardziej zbliżony do normalnego. Na podstawie tych danych wyznaczono równania regresji opisujące zależności pomiędzy masą, wysokością i średnicą pędów asymilacyjnych. Równania te wykorzystano w dalszej części pracy, między innymi do wyznaczenia masy pędów asymilacyjnych i ilości cukrów potrzebnych do ich wytworzenia.

Wyznaczone równanie regresji, opisujące wpływ średnicy i wysokości pędu asymilacyjnego na jego masę, zostało porównane z wynikami uzyskanymi w badaniach prowadzonych w kamerach vegetacyjnych w latach 2004–2007 (doświadczenia D.2.01, D.2.02 i D.2.03) oraz z wynikami doświadczenia odmianowego, prowadzonego w latach 2008–2012. Wyniki pomiarów średnicy, wysokości, masy pędów asymilacyjnych z doświadczeń prowadzonych w kamerach vegetacyjnych (doświadczenia D.2.01, D.2.02 i D.2.03) zostały wcześniej opublikowane (Krzysiński i in., 2008a; 2008b; Gąsecka i in., 2009).

2.4.2. Całkowita masa pędów asymilacyjnych

Masa wszystkich pędów asymilacyjnych na powierzchni 1 ha ($M_{PA_{ha}}$) została obliczona według wzoru:

$$M_{PA_{ha}} = N_{PA_{ha}} \cdot M_{PA}$$

w którym: $N_{PA_{ha}}$ – liczba pędów asymilacyjnych na powierzchni 1 ha,
 M_{PA} – średnia masa pojedynczego pędu asymilacyjnego obliczona na podstawie równań wyznaczonych w badaniach własnych (rozdz. 3.3.1).

2.4.3. Udział masy gałęziaków

Udział masy pędów z gałęziakami, pędów bocznych i pędu głównego w całkowitej masie pędu asymilacyjnego określono na podstawie pomiarów 29 pędów asymilacyjnych o masie w zakresie od 34 g do 469 g w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03. Średnia masa pędów wynosiła 213 g. Do badań wybrano losowo pędy asymilacyjne w jak najszerszym zakresie masy, aby możliwe było wykonanie analizy korelacji i regresji. Statystyki opisowe pędów asymilacyjnych podano w tabeli 3. Po ścięciu całe pędy asymilacyjne były ważone z dokładnością do 1 grama. Następnie odcinano i natychmiast ważono pędy z gałęziakami, pędy boczne bez gałęziaków i pęd główny.

Tabela 3. Statystyki opisowe cech morfologicznych pojedynczego pędu asymilacyjnego
Table 3. The descriptive statistics of morphological features of an individual summer stalk

Cecha pędu asymilacyjnego Summer stalk characteristics	Średnia Average	Minimum Minimum	Maksimum Maximum	Mediana Median	Odczylenie standardowe Standard deviation	Wariancja Variance	Kurtoza Kurtosis	Skosność Skewness	Liczba danych Number of data
Masa (g) Weight (g)	213	34	469	174	138	19 077	-1,2	0,4	29

2.4.4. Sucha masa pędów asymilacyjnych

Zawartość suchej masy określana była metodą wagową po wysuszeniu w temperaturze 105°C. Plon suchej masy został obliczony na podstawie plonu świeżej masy i zawartości suchej masy. W doświadczeniu D.2.04 zawartość suchej masy wyznaczono dla każdego odcinka pędu asymilacyjnego z gałęziami, na którym wykonywano pomiar intensywności fotosyntezy netto. Natomiast w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 oznaczono zawartość suchej masy w wyrastających pędach asymilacyjnych (wypustkach) oraz w pędach zielonych, żółknących i zbrązowiałych po ich zaschnięciu.

2.4.5. Specyficzna powierzchnia liści (gałęziaków)

Specyficzna powierzchnia gałęziaków została wyliczona tak samo, jak to ma miejsce w przypadku specyficznej powierzchni liści (SLA – *Specific Leaf Area*), czyli jako stosunek powierzchni pędów z gałęziakami do ich suchej masy, na podstawie pomiarów wykonanych w doświadczeniach D.1.02, D.1.03 i D.2.04.

W doświadczeniach D.1.02 i D.1.03, SLA obliczono na podstawie indeksu powierzchni gałęziaków i suchej masy pędów asymilacyjnych, a w doświadczeniu

D.2.04 na podstawie powierzchni odcinków pędów z gałęziakami, na których wykonano pomiary fotosyntezy.

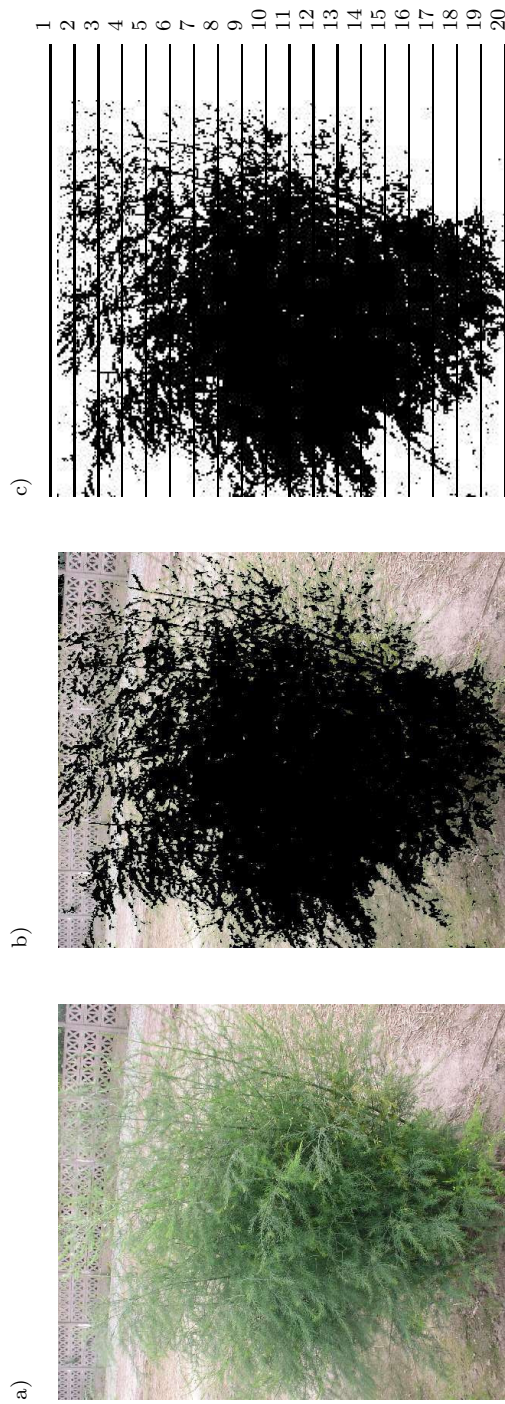
2.4.6. Rozkład pionowy gałęziaków

Analizę pionowego rozkładu gęstości gałęziaków na roślinie wykonano na podstawie pomiarów w doświadczeniach D.1.01, D.1.02 i D.1.03. Rozkład ten wyznaczono na podstawie analizy zdjęć pędów asymilacyjnych z 50 roślin szparaga. Zdjęcia o wielkości 2560×1696 piksela zostały wykonane aparatem cyfrowym Olympus C5050Z w rozdzielczości pionowej i poziomej 72 dpi (odwzorowanie kolorów: RGB, głębia: 24 bity). Do analizy wybrano zdjęcia z roślinami, które miały od 2 do 40 pędów i wysokość od 20 do 270 cm. Obróbkę zdjęć wykonano w programie komputerowym Corel PHOTO-PAINT ver. 9.0 firmy Corel Corporation Limited. W pierwszym etapie przygotowania zdjęć wykadrowano roślinę, następnie usunięto czarny kolor i zmieniono zieloną barwę pędów asymilacyjnych na kolor czarny. Ostatni etap polegał na usunięciu tła i zastąpieniu go białą barwą. Tak przygotowane zdjęcie podzielono na 20 poziomych warstw (ryc. 2a), b), c)). Podział zdjęć wykonano z dokładnością do 1 piksela w programie komputerowym napisanym w języku programowania Visual Basic. Każdą warstwę zapisano do oddzielnego pliku ($50 \text{ zdjęć} \times 20 \text{ warstw} = 1000 \text{ plików}$) i określono powierzchnię pędów asymilacyjnych z wykorzystaniem programu komputerowego Skwer. Ze względu na różną wysokość roślin i format zdjęć, wysokość pędów oraz gęstość rozkładu gałęziaków podano w procentach. Przyjęto odwrotny procentowy zapis wysokości: 0% wysokości odnosiło się do wierzchołka roślin, a 100% do podstawy pędów przy powierzchni gruntu. Ułatwiło to analizę absorpcji światła i obliczenie wydajności fotosyntezy dla całej rośliny.

2.4.7. Indeks powierzchni gałęziaków

W doświadczeniach polowych indeks powierzchni gałęziaków (LAI) został wyznaczony dwoma metodami: na podstawie pomiarów ilości absorbowanego światła oraz na podstawie pomiarów morfologicznych pędów asymilacyjnych w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03.

Indeks powierzchni gałęziaków w pierwszej metodzie wyliczono tak samo, jak to ma miejsce w przypadku roślin wytwarzających typowe liście. Został on obliczony automatycznie przez SunScan Analysis System (Delta-T Devices, Cambridge, Wielka Brytania) w czasie pomiarów ilości absorbowanego światła. SunScan został skonfigurowany do pomiarów typowych roślin, przy założeniu, że gałęziaki były równomiernie rozłożone w pionie i poziomie ($ELADP = 1$), a absorpcja światła przez gałęziaki wynosiła 0,85. Pomiary wykonywano pomiędzy godziną 10:00 a 14:00, kiedy cień rzucany przez pędy asymilacyjne mieścił się w obrębie poletka.



Ryc. 2. Etapy obróbki zdjęć dla określenia pionowego rozkładu gęstości pędów asymilacyjnych: a) oryginalne, b) po zastąpieniu zielonej barwy czarną, c) po usunięciu tła. Poziome linie oznaczają granice podziału na warstwy, w których analizowano powierzchnię pędów asymilacyjnych

Fig. 2. Stages of image processing to determine the vertical distribution of summer stalks density: a) original, b) after replacing the green color with black, c) after removing the background. Horizontal lines indicate the boundaries of division into layers in which the surface of summer stalks was analyzed

W drugiej metodzie wyznaczono średnią masę pojedynczego pędu asymilacyjnego na podstawie jego średnicy i wysokości przy użyciu równania opracowanego w rozdziale 3.3.1. Następnie obliczono masę wszystkich pędów i powierzchnię gałęziaków na roślinie, korzystając z równań opracowanych w rozdziale 3.3.3 i 3.3.5.

Zależności pomiędzy cechami roślin w łanie roślin i absorpcją PAR określono na podstawie 76 pomiarów wykonanych w doświadczeniach D.1.01, D.1.02 i D.1.03. Obejmowały one w pierwszej kolejności pomiar PAR i wyznaczenie LAI, a następnie dla tych samych roślin określono średnią liczbę pędów oraz ich masę, wysokość i średnicę w łanie pędów asymilacyjnych. Zgromadzone dane do analizy charakteryzowały się szerokim zakresem i rozkładem zbliżonym do normalnego (tab. 4).

Tabela 4. Statystyki opisowe cech morfologicznych w łanie pędów asymilacyjnych
Table 4. The descriptive statistics of morphological features in a canopy of summer stalks

Parametry pędów asymilacyjnych na 1 m ² Summer stalk characteristics per 1 m ²	Średnia Average	Minimum Minimum	Maksimum Maximum	Mediana Median	Odczylenie standardowe Standard deviation	Wariancja Variance	Kurtoza Kurtosis	Skośność Skewness	Liczba danych Number of data
Wysokość (cm) Height (cm)	159	54,0	230	160	41,75	1 743	-0,10	-0,50	76
Liczba pędów Number of summer stalks	43,9	1,6	158	41	29,83	889,8	1,64	0,95	76
Średnica (mm) Diameter (mm)	12,8	6,0	23	12	4,135	17,1	0,25	0,82	76
Suma powierzchni przekrojów poprzecznych (cm ²) Total cross-sectional area (cm ²)	68,7	2,2	425	48	77,6	6 021	7,20	2,41	76
Masa (kg) Weight (kg)	8,1	0,1	50,3	5,3	9,312	86,7	6,56	2,31	76
Indeks powierzchni liści (LAI) Leaf Area Index (LAI)	2,28	0,2	5,4	2,2	1,317	1,7	-0,80	0,17	76
Absorpcja PAR PAR absorption	0,67	0,1	0,95	0,8	0,239	0,1	-0,10	-1,00	76

2.5. Analiza procesu fotosyntezy i oddychania roślin szparaga

Pomiary natężenia fotosyntezy netto, wyrażone jako ilość CO₂ asymilowanego przez gałęziaki (A_{net}), wykonane były w latach 2006–2007 oraz 2011–2012 z wykorzystaniem systemu LCpro+ (firma ADC, Anglia). Do pomiarów zastosowano komorę LCpro+ dla roślin iglastych.

W celu określenia wpływu temperatury na maksymalną asymilację CO₂ netto pomiary wykonywane były przy maksymalnym natężeniu PAR 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, co po uwzględnieniu przenikalności komory dawało 1290 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PAR. W czasie pomiaru asymilacji CO₂ system automatycznie utrzymywał w komorze zadaną temperaturę oraz PPF. Badania wykonano w temperaturze komory od +3,8°C do +35°C. CO₂ utrzymywany był na poziomie 360 ppm, a wilgotność powietrza 10–20 mBar. Pomiary asymilacji CO₂ netto wykonane były na zdrowych, zielonych odcinkach pędów z gałęziakami o powierzchni 5–15 cm². Po pomiarze asymilacji odcinki te były odcinane od rośliny, następnie ważone oraz skanowane w rozdzielczości pionowej i poziomej 300 dpi (Skaner Plustek OpticPro UT16) w dwóch kolorach: bieli i czerni, przy czym tło było białe, a gałęziaki czarne. Tak skanowane obrazy przetwarzane były przez program komputerowy o nazwie Skwer, przy pomocy którego wyznaczono powierzchnię pędów szparaga.

Pomiary intensywności fotosyntezy i oddychania, niezbędne do skonstruowania krzywych świetlnych, wykonano metodą szybką (Licor, 2018) za pomocą systemu LCpro+ (ADC BioScientific Ltd., Anglia) w doświadczeniu D.2.04. Pomiary zostały wykonane z wykorzystaniem komory dla roślin iglastych i przy PPF na poziomie 1200, 1000, 800, 600, 400, 300, 200, 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 35, 30, 25, 20, 15, 10, 5 i 0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Poziom PPF utrzymywany był automatycznie przez system LCpro+ z wykorzystaniem lampy LED z diodami niebieskimi (470 nm) i czerwonymi (660 nm), przy czym 5–10% stanowiły fotony niebieskie. Ze względu na stosunkowo wolną reakcję szparaga na zmiany PPF, pomiary dla każdego poziomu PPF wykonywano po 4 minutach od jego zmiany. Każdorazowo wykonywano trzy pomiary co minutę. Pomiarów dokonano w temperaturze 15, 20, 25 i 30°C. Na 1–2 godziny przed pomiarami rośliny umieszczono w komorze klimatycznej, w której była temperatura odpowiednia do wykonania pomiarów. Dodatkowo system LCpro+ utrzymywał precyzyjnie temperaturę powietrza w samej komorze pomiarowej. Wilgotność powietrza nie była kontrolowana przez LCpro, natomiast w komorze klimatycznej, w której znajdowały się rośliny i system LCpro+, utrzymywano wilgotność powietrza na poziomie 50%. Po zakończeniu pomiaru fotosyntezy i oddychania, każdy odcinek pędu asymilacyjnego, na którym wykonywano pomiar, był ścinany, a następnie określano jego świeżą i suchą masę oraz obliczono powierzchnię za pomocą programu komputerowego Skwer, po zeskanowaniu w rozdzielczości 300 dpi. Po wyznaczeniu powierzchni wyniki pomiarów przeliczane były do rzeczywistej powierzchni pędów z gałęziakami.

Dla określenia wpływu żółknięcia pędów asymilacyjnych na natężenie fotosyntezy netto, we wrześniu 2006 roku wykonano pomiary asymilacji CO₂ przy PAR 1290 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ i temperaturze komory 22°C dla 16 losowo wybranych roślin o różnym stopniu żółknięcia pędów asymilacyjnych. Stopień żółknięcia pędów oceniono na podstawie analizy skanowanych pędów. Skalę punktową dla stopnia żółknięcia ustalono na podstawie cyfrowego zapisu barwy, wykorzystując model barw RGB, w którym trzy składowe kolory: R – czerwony, G – zielony i B – niebieski tworzą podstawę modelu kolorów. Każdemu z tych trzech kolorów jest przypisana wartość z zakresu od 0 do 255. W modelu RGB, bazującym na kolorach światła, wyższym wartościom RGB odpowiadają większe ilości białego światła.

Skutkiem tego, im większe są wartości RGB, tym jaśniejsze kolory one opisują. Gdy wszystkie trzy składowe osiągną maksymalne wartości, uzyskiwany jest kolor biały. Jedno z ograniczeń modelu barw RGB polega na tym, że jest on zależny od urządzenia. Z tego względu uzyskane wyniki przeliczono na skalę punktową od 0 do 10, w której 0 oznacza pędy zielone, a 10 – żółte. Pędy skanowano skanerem Plusstek OpticPro UT16 w rozdzielczości pionowej i poziomej 300 dpi (odwzorowanie kolorów: RGB, głębia: 24 bity). Obróbkę obrazów skanowanych pędów wykonano w programie komputerowym Corel PHOTO-PAINT ver. 9.0 firmy Corel Corporation Limited. W pierwszym etapie analizy ograniczono obszar roboczy do samego pędu, stosując „maskę”. Barwę pędów uśredniono, wykorzystując jeden z filtrów rozmywania o nazwie „rozmywanie gaussowskie”. Po zastosowaniu filtru w trzech miejscach na skanowanych pędach odczytano barwę, wykorzystując model RGB. Następnie wyznaczono równania regresji pozwalające na przeliczenie barwy pędów na skalę od 0 do 10.

2.6. Cukry

2.6.1. Analizy zawartości cukrów

Próbki korzeni do analiz zawartości cukrów były pobierane wiosną, po zakończeniu zbiorów wypustek i jesienią, w odległości 30–50 cm od karpny (doświadczenia D.1.02 i D.1.03). Dodatkowo w latach 2005–2006 określano stężenie cukrów w okresie wyrastania pędów asymilacyjnych.

Wykonano oznaczanie stężenia sumy cukrów prostych po kwasowej hydrolizie (Siomos i Pontikidou, 2000). Analizy powyższe wykonano w Katedrze Chemii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu dysponującej chromatografem ciekłym najnowszej generacji Waters 2695 z Refractive Index detektorem – Waters 2414. Do rozdzielania zastosowano kolumny Sugar-Pak firmy Waters. Ekstrakcję cukrów przeprowadzono w roztworze wodno-etanolowym (80:20, v/v). Identyfikacja jakościowa cukrów przeprowadzona została w oparciu o czasy retencji, a ilościowa na podstawie krzywych kalibracji standardów poszczególnych cukrów.

2.6.2. Bilans cukrów

Bilans cukrów wykonano dla doświadczeń, w których zróżnicowano długość okresu zbiorów wypustek (dośw. D.1.02 i D.1.03). W bilansie cukrów uwzględniono z jednej strony cukry produkowane w okresie asymilacji (C_A), a z drugiej cukry zużywane na potrzeby oddychania bytowego (C_b) i oddychania wzrostowego (C_w).

$$C_A = C_b + C_w$$

Ilość cukrów zużytych na oddychanie wzrostowe była sumą cukrów zużytych na potrzeby oddychania wzrostowego pędów asymilacyjnych (C_{WPA}), wypustek szparaga w okresie plonowania (C_{WWY}) oraz wzrostu nowych korzeni (C_{WKO}).

$$C_w = C_{WPA} + C_{WWY} + C_{WKO}$$

Ilość cukrów zużywanych na potrzeby oddychania wzrostowego została obliczona na podstawie suchej masy wypustek, pędów asymilacyjnych i nowych korzeni, przy założeniu że z 1 grama cukrów powstaje 0,7 g suchej masy (Marcelis i in., 1998; Wilson i in., 2008). Przy czym cukry zużywane na oddychanie wzrostowe rozdzielono dodatkowo na cukry, z których węgiel został wbudowany bezpośrednio w suchą masę, czyli tzw. cukry strukturalne (C_{Ws}) i cukry zużyte na wytworzenie niezbędnej energii do wzrostu (C_{We}):

$$C_w = C_{Ws} + C_{We}$$

Ilość poszczególnych cukrów strukturalnych obliczono na podstawie zawartości węgla w suchej masie szparaga (45,1%) (Araki i in., 2012) i zawartości węgla w cukrach według wzorów:

$$C_{WPA} = \frac{M_{PA} \cdot 0,25 \cdot 0,451}{0,4}, \quad \text{po uproszczeniu } C_{WPA} = M_{PA} \cdot 0,282$$

$$C_{WWY} = \frac{M_{WY} \cdot 0,072 \cdot 0,451}{0,4}, \quad \text{po uproszczeniu } C_{WWY} = M_{WY} \cdot 0,0812$$

$$C_{WKO} = \frac{M_{KO} \cdot 0,1 \cdot 0,451}{0,4}, \quad \text{po uproszczeniu } C_{WKO} = M_{KO} \cdot 0,113$$

gdzie: M_{PA} , M_{WY} i M_{KO} oznaczają suchą masę, odpowiednio pędów asymilacyjnych, wypustek i nowych korzeni.

Ilość cukrów zużytych na wytworzenie niezbędnej energii do wzrostu nowych organów rośliny została obliczona na podstawie różnicy pomiędzy ilością cukrów zużywanych na potrzeby oddychania wzrostowego a ilością cukrów strukturalnych.

Ponadto obliczono ilość cukrów zużywanych na potrzeby oddychania bytowego i wzrostowego w okresie asymilacji, spoczynku zimowego oraz plonowania, jak również sumaryczną ilość cukrów zużywanych przez pędy asymilacyjne, korzenie i wypustki, a także całkowite zużycie cukrów na potrzeby oddychania bytowego i wzrostowego.

Ilość cukrów produkowanych w okresie asymilacji CO_2 została wyznaczona na podstawie współczynnika konwersji zaabsorbowanego promieniowania słonecznego na suchą masę (Radiation use efficiency – RUE) wynoszącego dla szparaga $1,5 \text{ g s.m.} \cdot \text{MJ}^{-1}$ (Wilson i in., 2008) zwiększonego o ilość cukrów (CHO), zużywanej bezpośrednio na potrzeby oddychania ($2,35 \text{ g CHO} \cdot \text{MJ}^{-1}$). Ilość zaabsorbowanego promieniowania słonecznego wyznaczono na podstawie obliczonego indeksu powierzchni gałęziaków (LAI) oraz równania opisującego ilość absorbowanego promieniowania słonecznego w zależności od LAI (ryc. 18d). Przyjęto, że okres asymilacji trwał od zakończenia zbiorów do wystąpienia pierwszych przymrozków. Dla każdego dnia okresu asymilacji wyznaczono współczynnik korygujący LAI. W pełni

okresu asymilacji, to jest po 14 dniach od zakończenia zbiorów, współczynnik ten wynosił 1, natomiast w okresie pierwszych czternastu dni od zakończenia zbiorów zwiększał się codziennie o 1/14. Wpływ temperatury na wielkość produkcji cukrów został obliczony na podstawie równania z ryciny 20. Uwzględniono również wpływ żółknięcia pędów asymilacyjnych na produkcję cukrów, przyjmując, że pędy rozpoczynały żółknięcie 30 dni przed pierwszym jesiennym przymrozkiem. Założono, że istnieje liniowa zależność pomiędzy produkcją cukrów a stopniem żółknięcia pędów (ryc. 21). W okresie żółknięcia każdego dnia współczynnik określający wpływ żółknięcia na produkcję cukrów zmniejszał się o 1/30 w zakresie od 1 do 0.

2.7. Wskaźniki opisujące wzrost i plonowanie

Na podstawie wyników uzyskanych z doświadczeń D.1.02 i D.1.03, obliczono cztery wskaźniki wzrostu i plonowania szparaga. Pierwszy z nich określał efektywność wykorzystania cukrów do wzrostu pędów asymilacyjnych w przeliczeniu na procent absorbowanego światła ($\% \cdot (t \text{ CHO} \cdot \text{ha}^{-1})^{-1}$). Drugi ze wskaźników charakteryzował wielkość plonu ogólnego wytworzonego z 1 tony cukrów ($(t \cdot \text{ha}^{-1}) \cdot (t \text{ CHO} \cdot \text{ha}^{-1})^{-1}$), a kolejny wielkość tego plonu w przeliczeniu sumę temperatury powietrza liczoną powyżej 10°C ($t \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 100^\circ \text{Cd}^{-1}$). Ostatni z przedstawionych wskaźników określał procent cukrów zużywanych w okresie plonowania na sumę temperatury powietrza powyżej 10°C ($\% \text{CHO} \cdot 100^\circ \text{Cd}^{-1}$). Wpływ terminu kończenia zbiorów na wielkość tych wskaźników obliczono na podstawie analizy regresji prostoliniowej, przy czym przyjęto dla końca zbiorów szparaga 10 czerwca wartość -10, dla 20 czerwca wartość 0 i dla 30 czerwca wartość +10).

2.8. Charakterystyka warunków klimatycznych

W okresie prowadzenia doświadczeń polowych automatyczna stacja meteorologiczna HOBO 21 (Onset Corp., USA), znajdująca się na polu, rejestrowała temperaturę powietrza, natężenie promieniowania fotosyntetycznie aktywnego oraz całkowite promieniowanie słoneczne, wilgotność powietrza, siłę i kierunek wiatru oraz opady.

Dane klimatyczne w okresie zbiorów wypustek od kwietnia do czerwca oraz w okresie asymilacji CO₂ od lipca do października zostały scharakteryzowane na podstawie odchyień od średnich wartości wieloletnich dla Stacji Doświadczalnej „Marcelin” Wydziału Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu z lat 1990–2017 (tab. 5–7). Pomiar obejmowały temperaturę powietrza, sumę opadów i całkowite promieniowanie słoneczne (radiację).

Lata 1996–1998 oraz 2001, 2004 i 2010 były stosunkowo chłodne. Średnia temperatura powietrza od kwietnia do października była niższa niż średnia wieloletnia dla Stacji Doświadczalnej „Marcelin” z lat 1990–2017 (tab. 5). W pozostałych

Tabela 5. Średnia temperatura powietrza z lat 1990–2017 oraz odchylenie od średniej (°C) w okresie prowadzenia badań dla Stacji Doświadczalnej „Marcelin”

Table 5. The average air temperature from 1990 to 2017 and deviation from average (°C) during the experiments at the ‘Marcelin’ Experimental Station

Lata Years	Miesiąc – Month							Średnia Mean
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
1990-2017	9,4	14,3	17,1	19,3	18,7	14,0	8,8	14,5
Odchylenie od średniej z lat 1990–2017 Deviation from average between 1990 and 2017								
1994	-0,2	-1,6	-1,2	2,9	-0,3	0,1	-2,3	-0,4
1995	-1,0	-1,4	-0,9	1,6	0,3	-1,0	1,6	-0,1
1996	-1,1	-1,5	-0,6	-3,2	-0,5	-3,4	0,4	-1,4
1997	-3,9	-1,2	-0,2	-1,4	0,9	-1,1	-2,1	-1,3
1998	0,8	0,6	0,3	-1,7	-2,2	-0,5	-0,9	-0,5
1999	-0,2	-0,8	-0,8	0,9	-0,8	3,0	-0,3	0,1
2000	2,7	1,5	0,5	-3,2	-0,8	-1,3	3,1	0,4
2001	-1,3	0,5	-2,1	0,6	-0,5	-1,9	3,2	-0,2
2002	-0,6	2,6	0,8	1,0	2,5	-0,1	-1,4	0,7
2003	-1,2	1,5	2,0	0,1	0,9	0,5	-3,4	0,1
2004	0,0	-1,6	-1,0	-1,5	1,1	0,1	1,3	-0,2
2005	0,2	-0,6	-0,6	0,7	-1,2	2,4	2,1	0,4
2006	-0,2	-0,3	1,4	4,7	-1,2	3,2	2,5	1,5
2007	1,3	1,1	2,0	-0,7	0,1	-0,5	-0,5	0,4
2008	-0,4	0,2	1,5	0,6	-0,2	-0,6	0,4	0,2
2009	2,9	-0,8	-1,6	-0,1	0,6	1,5	-1,3	0,2
2010	-0,4	-2,7	0,4	2,5	0,1	-1,1	-2,7	-0,6
2011	2,5	0,2	1,6	-2,6	0,1	1,1	-0,1	0,4
2012	1,4	1,3	-1,0	0,0	0,0	0,4	-0,4	0,2
2013	-0,9	0,5	0,4	1,3	0,4	-1,2	1,8	0,3
2014	1,4	-0,7	-0,8	2,4	-1,2	1,5	2,1	0,7
2015	-0,8	-1,1	-1,2	0,1	3,8	0,7	-0,9	0,1
2016	-0,5	1,4	1,4	-0,7	-0,8	3,5	-0,1	0,6
2017	-1,1	0,4	1,2	0,1	0,9	-0,2	2,1	0,5

latach temperatura powietrza była nieznacznie większa od średniej wieloletniej. Najcieplejszym miesiącem był lipiec w roku 2006, a najchłodniejszym październik 2003 roku.

W okresie wzrostu wypustek szparaga i ich zbiorów od kwietnia do czerwca, średnia temperatura powietrza wynosiła 13,7°C. Przy tradycyjnym terminie kończenia zbiorów, pierwsze wypustki szparaga były zbierane pod koniec kwietnia, a zbiory kończyły się 20 czerwca. W okresie tym średnia temperatura powietrza była na poziomie 15,4°C, a suma temperatury 293°Cd (stopniodni, powyżej 10°C). Badania własne obejmowały dwa doświadczenia, w których termin zbiorów był skrócony do 10 czerwca lub wydłużony do 30 czerwca. W terminach tych średnia temperatura wynosiła odpowiednio 15,0°C i 15,8°C, a suma temperatury 216°Cd i 377°Cd.

W całym okresie asymilacji, trwającym od lipca do końca października, średnia temperatura powietrza wynosiła 16,7°C. W okresie od 1 lipca do końca sierpnia, gdy utrzymywały się zielone pędy asymilacyjne i zachodziła intensywna asymi-

Tabela 6. Średnie opady deszczu z lat 1990–2017 oraz odchylenie od średniej (mm) w okresie prowadzenia badań dla Stacji Doświadczalnej „Marcelin”

Table 6. Average monthly rainfall from 1990 to 2017 and deviation from average (mm) during the experiments at the ‘Marcelin’ Experimental Station

Lata Years	Miesiąc – Month							Suma Sum
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
1990-2017	28	50	57	82	51	42	33	342,0
Odchylenie od średniej z lat 1990–2017 Deviation from average between 1990 and 2017								
1994	19,1	8,9	-22,7	-4,4	14,1	15,4	-13,2	17,2
1995	-13,7	15,0	31,2	-54,3	8,5	17,8	-20,3	-15,8
1996	-12,5	29,1	-26,9	118,7	10,8	28,9	-4,9	143,2
1997	13,7	15,1	28,7	111,7	-10,7	-8,9	26,5	176,1
1998	3,9	-23,2	6,1	-23,9	9,4	32,1	51,4	55,8
1999	28,4	6,6	24,3	-40,8	-5,4	18,9	13,3	45,3
2000	-11,3	7,0	-15,6	-0,8	-5,4	-6,2	-8,7	-41,0
2001	5,8	-38,5	11,0	23,9	49,1	70,9	-5,4	116,8
2002	8,9	20,2	-14,4	-53,4	25,1	-21,5	67,0	31,9
2003	-7,7	-33,2	-20,3	51,0	-43,5	-23,1	2,2	-74,6
2004	-10,0	-0,5	-1,8	-32,2	6,5	-18,5	13,1	-43,4
2005	-11,9	11,8	-40,1	-8,3	-1,9	-7,2	-27,4	-85,0
2006	1,7	-4,8	-35,3	-61,1	44,9	-19,4	-12,6	-86,6
2007	-19,1	10,0	13,9	-5,5	7,3	-14,0	-15,4	-22,8
2008	44,3	-42,2	-49,1	-31,5	12,9	-26,2	22,8	-69,0
2009	-11,9	31,6	39,9	11,1	-36,7	-14,2	19,0	38,8
2010	-3,3	51,6	-38,7	-6,9	43,7	30,2	-26,0	50,6
2011	-21,1	-41,0	-1,1	64,9	-20,5	-24,4	-12,0	-55,1
2012	-11,9	-2,8	37,5	44,7	-17,1	-21,2	-12,4	16,8
2013	-12,5	14,6	70,5	-42,3	-17,1	27,4	-18,2	22,4
2014	21,7	28,4	-16,5	12,5	4,7	-3,4	-5,8	41,6
2015	-5,1	-23,2	36,7	5,1	-26,9	-20,0	-13,4	-46,8
2016	14,5	-17,8	7,2	20,1	-10,9	-0,5	0,3	13,0
2017	-11,1	-22,8	-24,0	0,6	-27,8	-17,9	0,3	-102,7

lacja CO₂, średnia temperatura powietrza wynosiła 20,0°C. Zarówno skrócenie, jak i wydłużenie okresu zbioru miały wpływ na długość okresu asymilacji CO₂. Średnio okres asymilacji CO₂ rozpoczął się 10 dni po zakończeniu zbiorów. Przy skróconym okresie zbiorów, temperatura powietrza do końca sierpnia utrzymywała się średnio na poziomie 18,8°C, a przy wydłużonym 21,0°C. Od początku września rozpoczynało się żółknięcie pędów asymilacyjnych. W miesiącu tym średnia temperatura powietrza wynosiła 14,0°C. W październiku temperatura powietrza znacznie zmniejszyła się i utrzymywała się średnio na poziomie 8,8°C.

Najbardziej deszczowym miesiącem w okresie prowadzenia badania był lipiec (tab. 6). Średnio w latach 1990–2017 suma opadów w tym miesiącu wynosiła 82 mm. Im bliżej jesieni lub wiosny, tym suma opadów była mniejsza. Najwięcej opadów w okresie od kwietnia do października było w roku 1997, następnie 1996 i 2001 roku. Natomiast mało opadów odnotowano w latach: 2017, 2005–2006 i 2003. W pozostałych latach ilość opadów była zbliżona do średniej wieloletniej. W okresie asymilacji największą ilość opadów odnotowano w roku 1996, 2001 i 1997, a najmniejszą w roku 2015 i 2013.

Tabela 7. Średnie miesięczne promieniowanie słoneczne z lat 1990–2017 oraz odchylenie od średniej ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) w okresie prowadzenia badań dla Stacji Doświadczalnej „Marcelin”
 Table 7. Average monthly solar radiation from 1990 to 2017 and deviation from average ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) during the experiments at the ‘Marcelin’ Experimental Station

Lata Years	Miesiąc – Month							Suma Sum
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
1990-2017	381	500	524	528	441	277	158	2 809,1
Odchylenie od średniej z lat 1990–2017 Deviation from average between 1990 and 2017								
1994	-14,1	-12,9	50,9	145,9	-32,9	-56,4	2,1	82,4
1995	-45,6	30,2	-16,0	117,4	52,6	-71,4	2,8	69,9
1996	24,8	-76,2	-3,6	-39,6	-16,4	-45,7	-23,8	-180,6
1997	-13,1	-17,1	39,9	-5,9	66,5	14,9	-13,2	71,9
1998	-32,4	63,8	34,9	-4,1	-13,0	-22,9	-30,0	-3,6
1999	-51,6	79,1	-66,0	69,6	8,9	34,1	-15,8	58,3
2000	32,1	73,3	53,7	-141,0	5,5	-21,4	-28,2	-25,9
2001	-58,5	66,8	-51,7	-9,2	41,3	-75,6	3,2	-83,8
2002	-20,8	31,9	31,0	-40,3	6,7	12,6	-18,2	2,9
2003	2,3	49,4	103,6	-33,8	43,4	12,9	-22,0	155,8
2004	2,2	5,9	16,0	6,6	19,0	15,8	-1,5	64,0
2005	51,2	-7,6	59,3	-15,5	16,5	73,0	53,0	229,9
2006	-22,0	19,0	43,6	112,2	-108,0	67,6	8,3	120,6
2007	80,6	12,7	-33,3	-96,7	-1,4	1,8	0,7	-35,5
2008	-37,0	65,5	82,9	37,5	-52,2	-15,3	6,4	87,8
2009	119,7	-11,3	-67,0	-24,3	44,9	48,2	-25,4	84,8
2010	90,4	-189,7	21,7	16,0	-40,8	21,4	80,7	-0,2
2011	-2,5	39,3	19,9	-120,3	-2,3	33,5	21,8	-10,7
2012	29,3	38,9	-88,8	-38,0	-33,9	3,8	9,2	-79,5
2013	-53,3	-76,2	-53,0	51,4	8,1	-22,5	13,1	-132,4
2014	-30,6	-57,7	-26,5	16,5	-38,8	-2,9	-13,7	-153,7
2015	-23,9	-11,7	-57,0	-16,0	35,7	21,8	-6,9	-58,0
2016	-36,8	-25,4	-16,8	-87,9	-35,9	88,0	-31,6	-146,4
2017	-39,9	-23,4	-41,5	-25,0	36,1	-9,5	18,7	-84,4

Od kwietnia do czerwca, czyli w okresie zbiorów wypustek szparaga, suma promieniowa słonecznego wynosiła $1404 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a w okresie asymilacji od lipca do października $1405 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (tab. 7). Najbardziej słonecznym miesiącem był lipiec, przy czym w czerwcu i maju stwierdzono tylko nieznacznie mniejsze promieniowanie słoneczne.

2.9. Analiza statystyczna otrzymanych wyników

2.9.1. Analiza wariancji

Analiza wariancji dla wybranych cech we wszystkich doświadczeniach została wykonana dla doświadczeń jedno-, dwu- lub trzyczynnikowych w układzie losowym lub bloków losowanych. Szczegółowy układ doświadczeń został podany przy ich opisie w rozdziale 2.1.1. Istotność wpływu badanych czynników doświad-

czenia na badane cechy określono na podstawie testu F, a różnice między średnimi wyznaczono na podstawie testu Newman-Keulsa.

W doświadczeniu D.1.01, dla lepszego zobrazowania wpływu badanych czynników na plonowanie i jakość szparagów, podano procent wyjaśnionej zmienności obliczony na podstawie sumy kwadratów z analizy wariancji. Podano również wartości F_{emp} z analizy, przyjmując założenie, że im większa była wartość F_{emp} , tym silniejszy był wpływ analizowanego czynnika czy interakcji pomiędzy analizowanymi czynnikami na badaną cechę. Ze względu na silne zróżnicowanie wyników pominięto zamieszczanie oznaczeń literowych w tabelach, podając tylko wartości najmniejszej istotnej różnicy dla $\alpha = 0,05$ i $\alpha = 0,01$. Zwłaszcza przy interakcji pomiędzy wszystkimi analizowanymi czynnikami oznaczenia wielu średnich wymagałyby zamieszczenia dla pojedynczej średniej nawet kilkunastu liter mówiących o braku różnic pomiędzy kolejnymi średnimi.

Analizę statystyczną otrzymanych wyników, obejmującą analizę wariancji, korelacji i regresji, wykonano w programach komputerowych: Statistica dla Windows wersji 5.1 G (edycja '97) firmy Statsoft Inc. oraz Microsoft Excel 97.

2.9.2. Analiza korelacji i regresji

Do analizy korelacji i regresji gromadzono dane w jak najszerszym zakresie. Im większe są zakresy danych, odchylenie standardowe i wariancja oraz więcej jest danych, tym bardziej uniwersalny charakter mają opisane zależności. Do poprawnego wyznaczenia zależności ważne było równomierne zgromadzenie danych w całym zakresie pomiarowym. Im rozkład danych był bliższy rozkładowi normalnemu, tym większa wiarygodność przedstawionych zależności. Dopasowanie do rozkładu normalnego zostało określone na podstawie kurtozy i skośności. Kurtozę charakteryzowała spiczastość rozkładu. Jeśli wartość kurtozy jest wyraźnie różna od zera, wówczas rozkład jest albo bardziej płaski albo bardziej spiczasty niż rozkład normalny. Wartość kurtozy dla rozkładu normalnego wynosi 0. Skośność umożliwiła określenie odchylenia rozkładu od symetrii. Jeśli skośność ma wartość wyraźnie różną od zera, wówczas dany rozkład jest asymetryczny, gdyż rozkład normalny jest doskonale symetryczny. Wyznaczone równania prawidłowo opisują zależność w zakresie, w którym były dane do jego wyznaczenia.

2.9.3. Funkcje użyte do opisanie zależności pomiędzy badanymi czynnikami

Powszechnie wiadomo, że przy mnożeniu i dzieleniu procent zachowuje się jak liczba rzeczywista 0,01. Właściwość tę wykorzystano w arkuszach kalkulacyjnych, m.in. w Microsoft Excel do uproszczenia obliczeń. Stąd w funkcjach przedstawionych w niniejszej pracy, przyjęto zapis procentów jako liczb rzeczywistych. Dlatego, gdy cecha wyrażona jest w procentach i przyjmuje wartości od 0% do 100%, to w równaniach odpowiada to wartościom od 0 do 1. Sposób zapisu funkcji jest zgodny z formatem zamieszczonym w programie komputerowym TableCurve

2D, użytym do wytypowania równań najlepiej opisujących daną zależność oraz kalibracji parametrów tych funkcji.

Funkcja $y = ax + b$ została użyta do opisanego zależności prostoliniowych. Parametr a charakteryzuje stopień nachylenia linii regresji. Wartości dodatnie parametru a świadczą o korelacji dodatniej. Parametr b określa miejsce przecięcia osi Y , czyli określa jaką wartość przyjmuje y , gdy $x = 0$. Jeżeli $y = 0$ przy $x = 0$, to funkcja przyjmuje postać: $y = ax$.

Funkcja $y = a + \frac{bx}{c+x}$ została użyta do opisanego zależności krzywoliniowych. Funkcja ta osiąga wartość maksymalną równą parametrowi b ($y_{\max} = b$). Parametr c charakteryzuje kształt krzywej. Im większa wartość parametru c , tym łuk krzywej jest bardziej łagodny. Funkcja zwraca prawidłowe wyniki przy ekstrapolacji, jeżeli y dąży do b . Gdy parametr $a = 0$ ($y = 0$ przy $x = 0$), wtedy $y = \frac{bx}{c+x}$. Gdy y wyrażony jest w procentach i przyjmuje wartości od 0% do 100% ($0-1$) oraz funkcja przyjmuje wartość zero przy $x = 0$ to równanie ma postać $y = \frac{x}{c+x}$.

Funkcja wykładnicza ($y = a \cdot \exp(bx)$). Parametr a określa miejsce przecięcia osi Y , czyli określa, jaką wartość przyjmuje y , gdy $x = 0$. Parametr b ma wpływ na kształt krzywej. Im wartości są bliższe 0, tym łuk krzywej jest bardziej łagodny. Dla $a = 0$, $y = 0$, a dla $b = 0$, $y = a$. Przy ujemnych wartościach parametru b , funkcja jest malejąca, a przy dodatnich rosnąca. W pracy wykorzystano kilka różnych modyfikacji funkcji wykładniczej wytypowanych za pomocą programu komputerowego TableCurve 2D: $y = a + b \cdot (1 - \exp(-cx))$, $y = a + b \cdot \exp(cx)$, $y = a + bx + c \cdot \exp(-x)$.

Funkcja potęgowa ($y = ax^b$) wykorzystywana była tylko wtedy, gdy wartości $x > 0$. Parametr b ma wpływ na kształt krzywej. Przy $b = 1$, $y = ax$. Im wartości są bliższe 1, tym łuk krzywej jest bardziej łagodny. Jeżeli $a > 0$, wtedy przy ujemnych wartościach parametru b , funkcja jest malejąca, a przy dodatnich rosnąca. Przy $b = 0$, $y = a$.

Parametry równań matematycznych wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów w programach: TableCurve 2D, TableCurve 3D firmy SPSS Inc., Statistica dla Windows wersji 5.1 G (edycja '97) firmy Statsoft Inc. oraz Microsoft Excel 97. Niezbędne przekształcenia równań wykonano w programie Mathcad 2001 firmy Mathsoft.

3. WYNIKI I DYSKUSJA

3.1. Plonowanie

3.1.1. Plonowanie pięciu odmian szparaga sadzonych w trzech kolejnych latach

W doświadczeniu D.1.01 długość okresu asymilacji w roku sadzenia szparagów zależała od terminu wystąpienia pierwszych przymrozków (tab. 8*). Najdłuższy okres stwierdzono, gdy szparagi były posadzone w roku 1995, a najkrótszy po posadzeniu ich w roku 1996. W kolejnych latach, jeszcze bez zbiorów wypustek, okres asymilacji trwał od 163 dni w roku 1996 do 184 dni w roku 1998. W latach prowadzenia zbiorów wypustek okres asymilacji był krótszy i wynosił od 115 dni w roku 2003 do 140 dni w roku 2000 (tab. 9). Największą sumę opadów i najmniejszą sumę temperatury a zarazem największą sumę radiacji odnotowano, gdy szparagi były sadzone w roku 1995. W kolejnych latach bez zbiorów (1996–1997), największą sumę opadów, stwierdzono przy najmniejszej sumie temperatury, gdy szparagi były sadzone w roku 1995.

Plon ogólny i handlowy zależał od roku zbiorów i odmiany, natomiast nie zależał od roku sadzenia rozsady (tab. 10 i 11). Stwierdzono również, że wszystkie interakcje pomiędzy badanymi czynnikami były istotne. Zarówno wielkość plonu ogólnego, jak i handlowego w większym stopniu zależały od odmiany niż roku zbiorów. Z rokiem zbiorów związane było 7,7% całkowitej zmienności w plonie ogólnym i 7,6% zmienności w plonie handlowym, a z odmianą odpowiednio 13,9% i 14,7%. Potwierdzają to również wartości F_{emp} , które wynosiły odpowiednio dla rodzaju plonu 22,9 i 21,8, dla roku zbiorów i 31,2 i 31,6 dla odmiany. Plon ogólny i handlowy był największy w trzecim i czwartym roku zbiorów, jak również u odmiany ‘Gijnlim’. Mniejszy plon ogólny i handlowy zebrano u odmiany ‘Thielim’, następnie u ‘Andreas’ i ‘Vulkan’, a najmniejszy u ‘J. Giant’. Zazwyczaj w pierwszych trzech, czterech latach zbiorów, plon ogólny i handlowy wzrasta z roku na rok (Knaflowski i Krzesiński, 2004). W badaniach własnych stwierdzono jednak wpływ interakcji pomiędzy rokiem zbiorów a odmianą, co wskazuje, że w pierwszych czterech latach wielkość zbieranego plonu ogólnego i handlowego była modyfikowana przez odmianę. Wpływ tej interakcji był jednak niewielki, F_{emp} dla plonu ogólnego i handlowego wynosiło odpowiednio 2,1 i 2,2, a procent wyjaśnionej zmienności w całym doświadczeniu stanowił odpowiednio 2,9% i 3,0%. Niemniej jednak wykazano, że zarówno plon ogólny, jak i handlowy nie wzrastał u większości odmian z roku na rok w pierwszych latach zbiorów. U odmiany ‘Andreas’ tylko plon ogólny był większy w czwartym roku zbiorów niż w drugim, natomiast plon handlowy nie różnił się istotnie wielkością we wszystkich latach zbiorów. U odmian ‘J. Giant’ i ‘Thielim’ we wszystkich czterech latach zbiorów nie wykazano istotnych różnic zarówno w plonie ogólnym, jak i handlowym. Najlepiej plonująca odmiana ‘Gijnlim’ miała większy plon ogólny i handlowy w trzecim i czwartym roku zbiorów

*Tabele 8–56 zostały zamieszczone na końcu rozdziału 3 (str. 89–115).

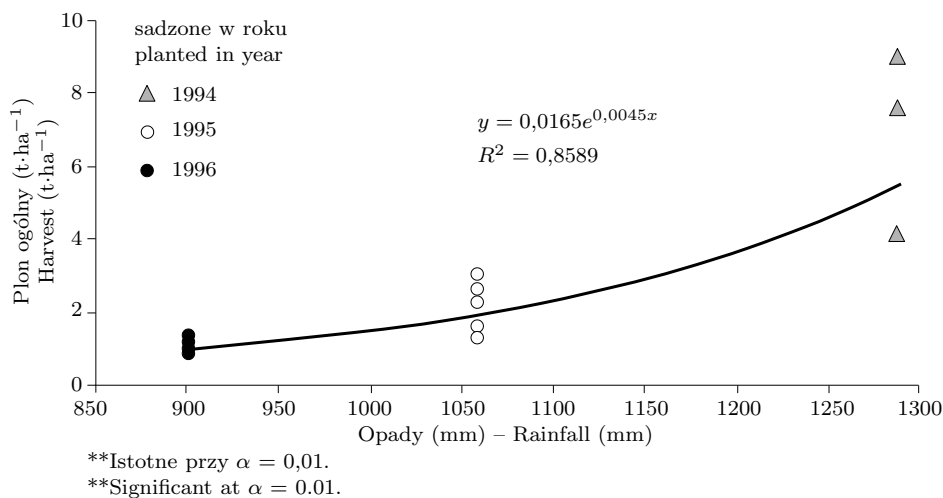
niż w roku pierwszym i drugim. U odmiany ‘Vulkan’ tylko w czwartym roku plon ogólny i handlowy był większy od plonu uzyskanego w pierwszym roku.

Na podstawie analizy wariancji wykazano, że warunki klimatyczne w roku sadzenia oraz w kolejnych latach po posadzeniu, a przed rozpoczęciem plonowania nie miały wpływu na wielkość plonu ogólnego i handlowego w czasie pierwszych czterech lat plonowania (tab. 10 i 11). Rok sadzenia był jedynym czynnikiem, który nie miał istotnego wpływu na wielkość plonów, modyfikował on jednak wpływ pozostałych dwóch czynników, a mianowicie odmiany i roku zbioru zbiorów. Stwierdzono silną dwuczynnikową interakcję pomiędzy rokiem sadzenia a rokiem zbiorów (odpowiednio F_{emp} 56,7 i 50,4), jak również znacznie słabszą interakcję pomiędzy rokiem sadzenia a odmianą (odpowiednio F_{emp} 5,9 i 5,3) oraz interakcję trójczynnikową pomiędzy rokiem sadzenia, rokiem zbiorów i odmianą (odpowiednio F_{emp} 4,5 i 4,8). Plony te nie wzrastały z roku na rok, podobnie jak w przypadku interakcji pomiędzy odmianą a rokiem zbiorów, czyli tak jak podają Knaflowski i Krzesiński (2004), lecz w dużej mierze zależały od roku sadzenia. U szparagów sadzonych w roku 1994 zaobserwowano nawet odwrotną tendencję, niż należałoby się spodziewać. W pierwszym roku zebrano największy plon handlowy, a najmniejszy w ostatnim roku zbiorów. Plon ogólny był również najmniejszy w czwartym roku zbiorów. U szparagów sadzonych w 1995 roku można zaobserwować wahania wielkości plonu ogólnego i handlowego. W pierwszym i trzecim roku zbiorów uzyskano najmniejszy plon ogólny, a w drugim i czwartym roku plon ogólny był istotnie większy niż w dwóch pierwszych latach, przy czym największy plon ogólny zebrano w ostatnim roku. W plonie handlowym wystąpiły podobne tendencje. Co ciekawe, u szparagów sadzonych w 1996 roku również wystąpiły wahania wielkości plonu ogólnego i handlowego, jednak większy plon ogólny i handlowy zebrano nie w drugim i czwartym roku, a w pierwszym i trzecim roku. Ponadto u szparagów sadzonych w roku 1995 największy plon ogólny i handlowy uzyskano w czwartym roku, a u szparagów sadzonych w 1996 r. w trzecim roku.

Liczba zebranych wypustek w plonie ogólnym zależała od odmiany, roku zbiorów i roku sadzenia roślin (tab. 12). Stwierdzono również istotny wpływ wszystkich efektów interakcji pomiędzy badanymi czynnikami. Najsilniej liczbę wypustek różnicowała interakcja pomiędzy rokiem sadzenia a rokiem zbiorów (32,6% całkowitej zmienności w doświadczeniu, F_{emp} 46,7). Wpływ odmiany był związany z 15,9% zmienności liczby wypustek (F_{emp} 34,1), a interakcja trzeciego stopnia pomiędzy wszystkimi badanymi czynnikami wyjaśniała 12,3% zmienności (F_{emp} 4,4). Wpływ pozostałych czynników i interakcji, pomimo że był istotny przy $\alpha = 0,01$, wyjaśniał mniej niż 10% zmienności w doświadczeniu. Analizując wpływ interakcji pomiędzy rokiem zbiorów a rokiem sadzenia, można stwierdzić, że najwięcej wypustek zebrano w piątym roku zbiorów szparagów sadzonych w roku 1995 oraz w czwartym roku zbiorów roślin sadzonych w roku 1994. Najmniej wypustek zebrano w drugim i czwartym roku zbiorów u roślin sadzonych w roku 1995, jak również w trzecim roku zbiorów u roślin sadzonych w roku 1996. Należy stwierdzić, że najwięcej wypustek zebrano u odmiany ‘Gijnlim’, a najmniej u ‘J. Giant’ oraz gdy rośliny sadzono w roku 1995.

Stwierdzono, że wielkość plonu ogólnego oraz liczba zebranych wypustek w drugim roku zbiorów zależały przede wszystkim od ilości opadów w okresie asymilacji

w latach poprzedzających zbiory (ryc. 3). Potwierdzają to doniesienia Rolbieckiego (2013), który wykazał, że w uprawie szparaga niedobór wody z opadów atmosferycznych powodował zmniejszenie plonu. Wykazał on również zasadność stosowania nawadniania w uprawie szparaga.



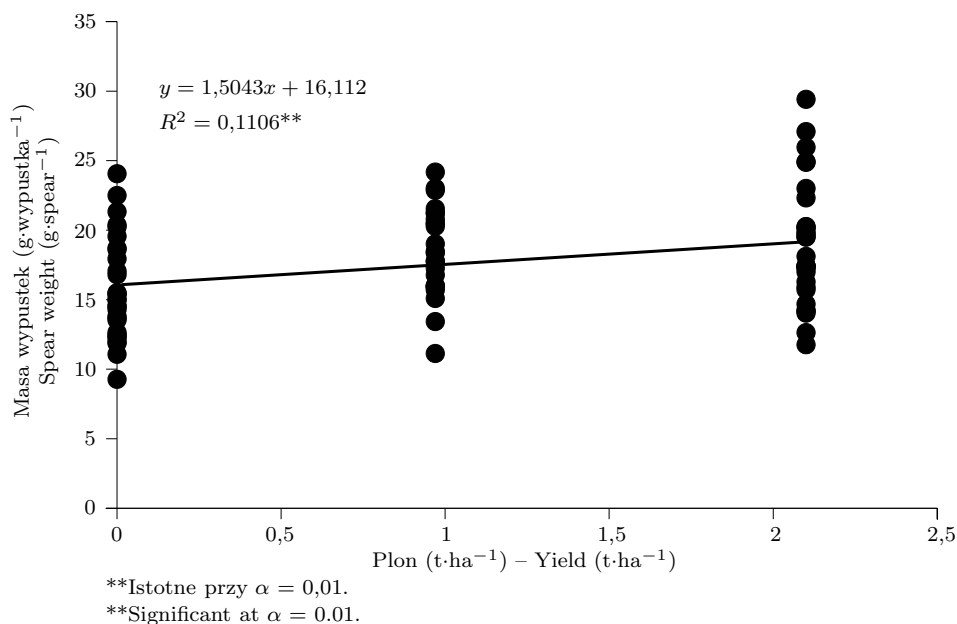
Ryc. 3. Wpływ sumy opadów w pierwszych latach po posadzeniu na wielkość plonu ogólnego wypustek szparaga w drugim roku zbiorów w doświadczeniu D.1.01

Fig. 3. The influence of rainfall in the first years after planting on the yield in the second year of harvest in experiment D.1.01

Szukając wyjaśnienia przyczyn takiego zróżnicowania wielkości plonu ogólnego, wykonano analizę korelacji pomiędzy wielkością tego plonu a warunkami klimatycznymi w latach od posadzenia roślin do pierwszych zbiorów oraz w latach plonowania z rozbiem na warunki w okresie zbiorów i w okresie asymilacji. Przeanalizowano również wpływ zebranego plonu w jednym roku na wielkość plonu w roku następnym (tab. 13).

Wstępny zbiór wypustek szparaga w pierwszym roku zbiorów nie miał istotnego wpływu na wielkość plonu w następnych latach zbiorów, niemniej jednak im większy był wstępny zbiór, tym mniejszą liczbę wypustek zbierano w następnych latach (tab. 13). Stwierdzono również, że im dłuższy był okres asymilacji od sadzenia do pierwszych zbiorów oraz im większe były sumy temperatury powietrza, promieniowania słonecznego i opadów, tym większą liczbę wypustek zbierano, pomimo że wielkość plonu ogólnego w pierwszych pięciu latach zbiorów nie zależała od warunków panujących w tym okresie. W efekcie spowodowało to zwiększenie średniej masy wypustek o 1,5 g w kolejnych latach zbiorów wraz ze zwiększeniem wielkości wstępnego zbioru wypustek o $1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (ryc. 4).

Na wielkość plonu oraz liczbę wypustek miały również wpływ warunki atmosferyczne oraz długość okresu asymilacyjnego w roku poprzedzającym zbiór. Paradoksalnie im dłuższy był okres asymilacji oraz większa była suma temperatury powietrza i promieniowania słonecznego, tym mniejszy był plon oraz liczba wypustek. Opady w okresie asymilacji zwiększały plon w roku następnym, ale nie

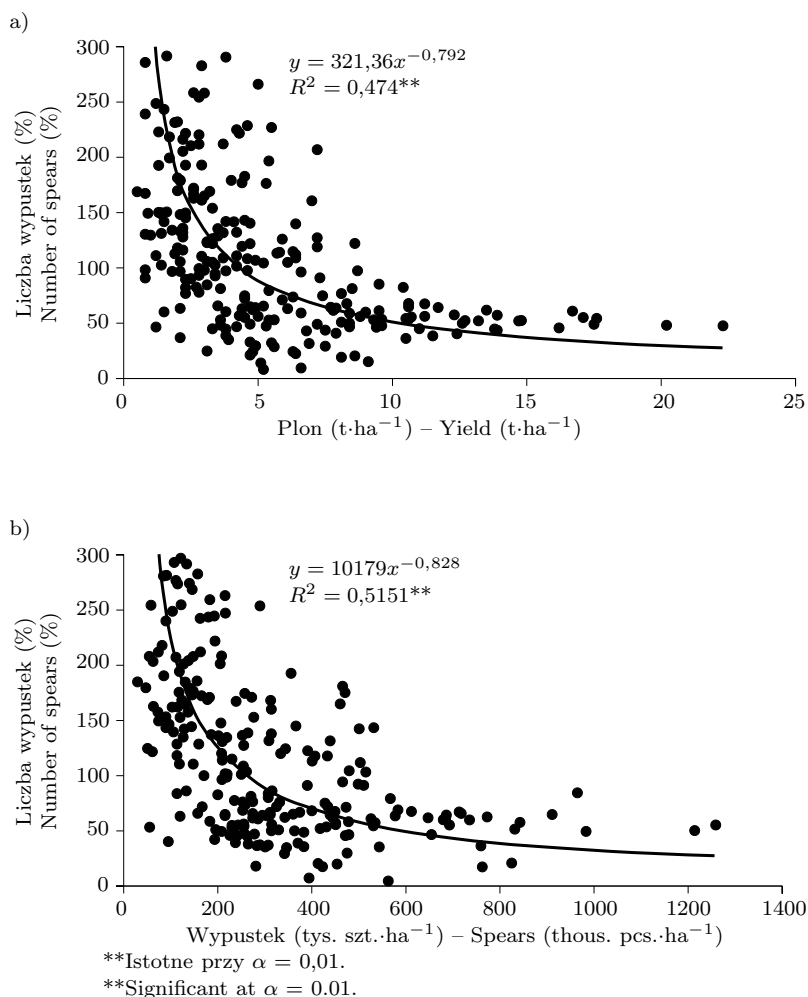


Ryc. 4. Wpływ wstępnego zbioru na średnią masę wypustek szparaga w następnych latach zbiorów w doświadczeniu D.1.01

Fig. 4. The influence of preliminary harvest on the mean spear weight in subsequent harvest years in experiment D.1.01

miały wpływu na liczbę wypustek. Najprawdopodobniej rośliny szparaga w okresie asymilacji miały zbyt mało wody, o czym świadczy nie tylko dodatnia korelacja pomiędzy opadami i wielkością plonu, ale również ujemna korelacja z pozostałymi parametrami warunków klimatycznych. Większa suma promieniowania słonecznego oraz wysoka temperatura zwiększały zapotrzebowanie na wodę, co przy niedoborze opadów pogłębiało niekorzystny wpływ tych warunków na wielkość plonu (Rolbiecki, 2013).

W badaniach własnych wydłużenie okresu zbiorów powodowało zmniejszenie wielkości plonu oraz liczby wypustek. Najsilniej z wielkością plonu i liczbą wypustek skorelowane były względna liczba wypustek i względny plon w roku następnym (tab. 14 i 15, ryc. 5). Analiza regresji wykazała, że są to zależności krzywoliniowe. Jeżeli zbierano mały plon oraz małą liczbę wypustek, średnio dla wszystkich odmian poniżej $4,38 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ i $265,9 \text{ tys. szt.}\cdot\text{ha}^{-1}$, wtedy względny plon oraz względna liczba wypustek w roku następnym były większe niż w roku poprzedzającym. Zwiększenie wielkości zbieranego plonu i liczby wypustek powyżej tych granic powodowało zmniejszenie względnej wielkości plonu oraz liczby wypustek w roku następnym (ryc. 5). Graniczną wielkość plonu oraz liczbę wypustek wyznaczono dla każdej odmiany (tab. 15) na podstawie równań regresji opracowanych dla poszczególnych odmian (tab. 14). Wartości te są zbliżone do średniej wielkości plonu ogólnego i liczby wypustek (tab. 10 i 12).

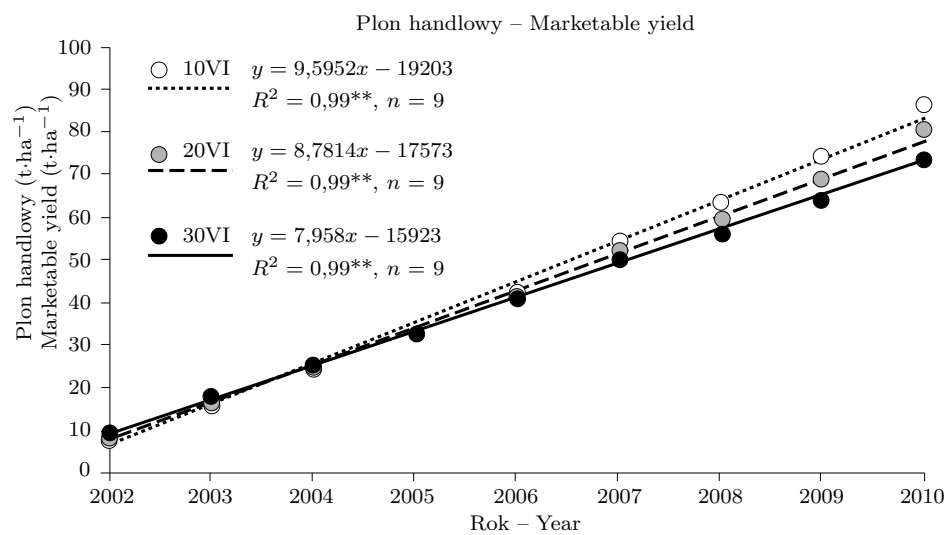
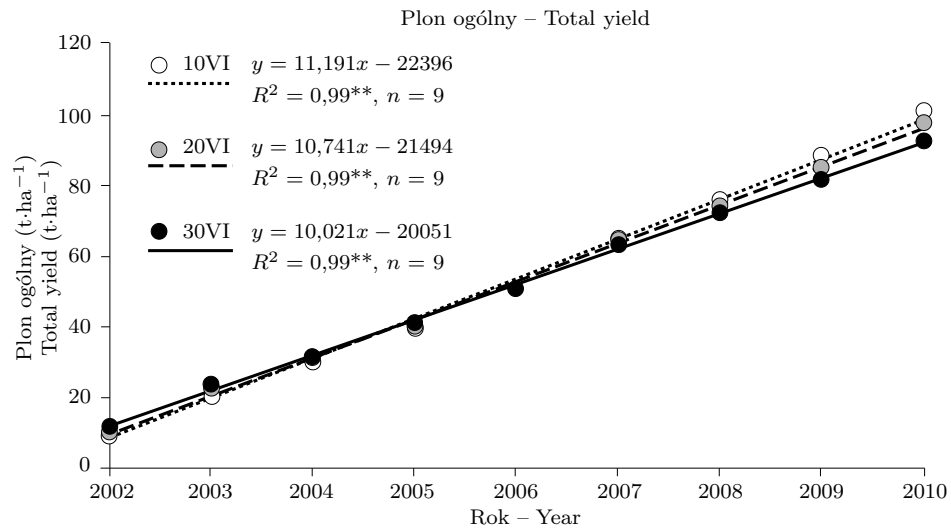


Ryc. 5. Wpływ wielkości plonu ogólnego na względną wielkość plonu w roku następnym (a) i liczby wypustek na względną liczbę wypustek w roku następnym (b) w doświadczeniu D.1.01

Fig. 5. The influence of the total yield on the relative yield in the next year (a), and the number of spears and the relative number of spears in the next year in experiment D.1.01

3.1.2. Plonowanie szparaga przy różnym terminie kończenia zbiorów

Stwierdzono istotny wpływ odmiany i terminu kończenia zbiorów na wielkość plonu ogólnego, handlowego i średnią masę jednostkową wypustki w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 (tab. 16 i 17). Plon ogólny i handlowy odmiany 'Gijnlim' był większy niż odmiany 'Backlim'. Odmiana 'Backlim' tworzyła wypustki o większej średniej masie niż odmiana 'Gijnlim'. Wydłużenie okresu zbiorów do 30 czerwca spowodowało zwiększenie wielkości plonu ogólnego tylko w pierwszych

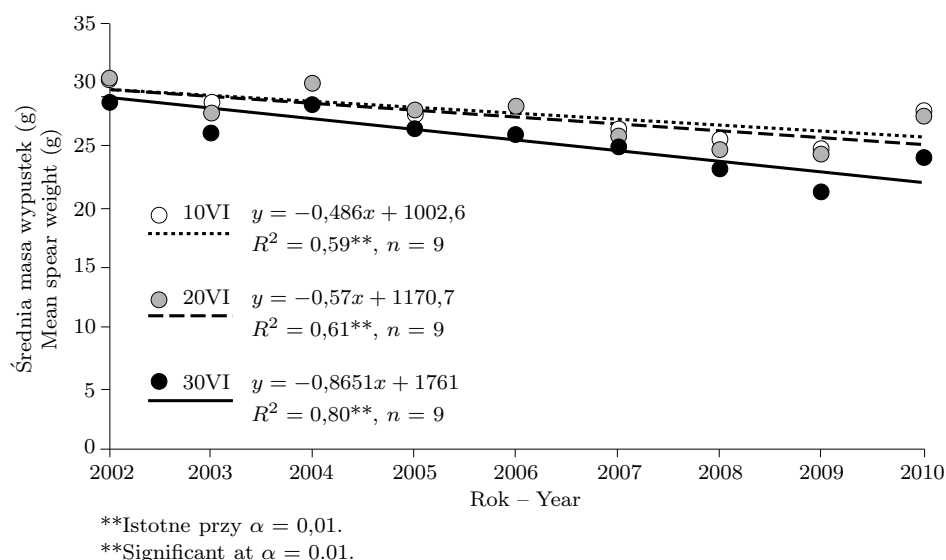


**Istotne przy $\alpha = 0,01$.

**Significant at $\alpha = 0.01$.

Ryc. 6. Kumulacja wielkości plonu ogólnego i handlowego w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03
Fig. 6. The total and marketable yield accumulation in experiments D.1.02 and D.1.03

latach zbiorów (ryc. 6), jednak z każdym następnym rokiem zbiorów, zbierany plon był coraz mniejszy ze względu na krótszy okres asymilacji i mniejszą ilość cukrów produkowanych przez pędy asymilacyjne i magazynowanych w korzeniach (Shelton i Lacy, 1980; Wilson i in., 2002a). W kolejnych latach stwierdzono zmniejszenie średnich wielkości plonu ogólnego, handlowego i średniej masy wypustki u wszystkich badanych odmian (ryc. 6 i 7), gdyż wydłużenie okresu zbiorów spowodowało skrócenie okresu asymilacji. Średnia wielkość zebranego do 20 czerwca plonu ogólnego odmian 'Backlim' i 'Gijnlim' nie różniła się istotnie od wielkości plonu ogólnego zebranego do 30 czerwca. Wypustki o największej masie jednostkowej zebrano u odmiany 'Thielim'.



Ryc. 7. Średnia masa wypustki w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03
 Fig. 7. The mean spear weight in experiments D.1.02 and D.1.03

Przy tradycyjnym terminie kończenia zbiorów wypustek do 20 czerwca, plon ogólny zwiększał się średnio o $10,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (ryc. 6). Wydłużenie zbiorów do 30 czerwca powodowało zmniejszenie średniego przyrostu plonu do $10,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, a skrócenie zbiorów do 10 czerwca jego zwiększenie do $11,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. W pierwszych 2 latach plonowania, wydłużenie okresu zbiorów powodowało nieznaczne zwiększenie wielkości sumarycznego plonu ogólnego. Od trzeciego do piątego roku wielkość sumarycznego plonu ogólnego była podobna przy wszystkich terminach kończenia zbiorów. Od szóstego roku sumaryczny plon z poletek, na których wydłużono termin kończenia zbiorów, był mniejszy niż przy wcześniejszym kończeniu zbiorów. Podobne zależności stwierdzono dla kumulacji plonu handlowego, przy czym wykazano większe różnice w kumulacji tego plonu z roku na rok od $8,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ przy kończeniu zbioru 30 czerwca do $9,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ przy zbiorach do 10 czerwca.

Średnica wypustek zależała od ilości cukrów zawartych w karpie oraz temperatury w okresie tworzenia się pąków na kłączy i w okresie wyrastania wypustek. Na

podstawie wykonanych badań stwierdzono, że duży wpływ na średnicę wypustek miała suma temperatury w okresie zbiorów. Potwierdzają to wcześniejsze doniesienia (Bouwkamp i McCully, 1975; Poll i Kruistum, 1990; McCormick i Geddes, 1996). W wielu publikacjach informowano o wpływie temperatury w okresie zbiorów na średnicę wypustek (Bouwkamp i McCully, 1975; Poll i Kruistum, 1990; McCormick i Geddes, 1996). W niniejszych badaniach również stwierdzono taką zależność. Oprócz tego wykazano, że wpływ temperatury na średnicę wypustek nie ogranicza się tylko do okresu zbiorów. Istotny wpływ temperatury na średnicę wypustek stwierdzono latem w okresie asymilacji i tworzenia pąków (Tiedjens, 1924; Benson i Takatori, 1980; Shelton i Lacy, 1980; Dufault i Greig, 1983; Robb, 1984; Haynes, 1987; Wooley i in., 1996; Siomos i Pontikidou, 2000).

3.2. Karpy szparaga

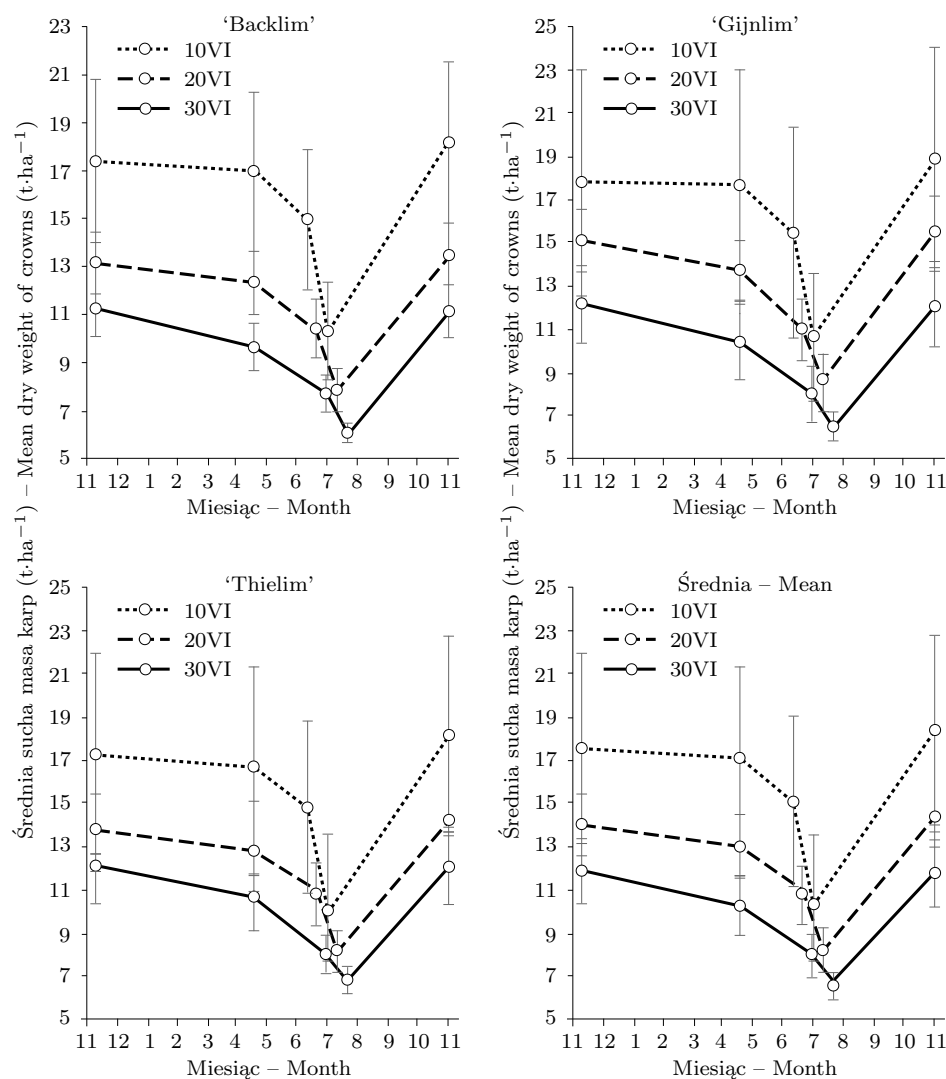
3.2.1. Świeża masa karp

Świeża masa karp zależała od odmiany i terminu kończenia zbiorów (tab. 18 i 19). Stwierdzono, że średnia świeża masa karp odmiany ‘Gijnlim’ była istotnie większa niż odmiany ‘Backlim’. Największą średnią świeżą masę karp odnotowano, gdy zbiory kończono 10 czerwca, a najmniejszą, gdy zbiory trwały do 30 czerwca, odpowiednio $104,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ i $63,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (tab. 18). W przeliczeniu na średnią masę pojedynczej karpki odpowiadało to 6,6 kg i 4,0 kg.

3.2.2. Sucha masa karp

Sucha masa karp zmieniała się w okresie wzrostu i plonowania szparagów i zależała od odmiany oraz terminu kończenia zbioru wypustek (ryc. 8). Największą ilość suchej masy stwierdzono jesienią po zakończeniu okresu asymilacji. W tym czasie średnia ilość suchej masy wynosiła od $11,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, gdy zbiory kończono 30 czerwca do $18,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, gdy koniec zbiorów był 10 czerwca. Jesienią większą średnią suchą masę karp miała odmiana ‘Gijnlim’ ($15,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), a mniejszą odmiany ‘Thielim’ ($14,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) i ‘Backlim’ ($14,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$). Jak podają Wilson i in. (2008) sucha biomasa karp u szparaga mieści się w zakresie od $6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ do $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$.

W okresie zimy sucha masa karp zmniejszała się średnio o 6,9%, gdy zbiory kończono 10 czerwca, o 10,0% przy tradycyjnym terminie kończenia zbiorów 20 czerwca i o 12,7% gdy koniec zbiorów opóźniono do 30 czerwca. Ubytek suchej masy w tym okresie związany był ze zużyciem cukrów w procesie oddychania karp (Haynes, 1987; Pressman i in., 1993; Guo, 2001). W okresie zbiorów cukry zawarte w korzeniach zużywane były nie tylko do oddychania karp, ale również do wytworzenia plonu. Powodowało to dalszy spadek zawartości suchej masy. Po zakończeniu zbiorów sucha masa karp była mniejsza niż sucha masa karp stwierdzona jesienią średnio od 32,4%, gdy zbiory kończono 30 czerwca, do 17,9% przy



Ryc. 8. Średnia sucha masa karp w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 w latach 2002–2010
 Fig. 8. The mean dry weight of crowns in experiments D.1.02 and D.1.03 conducted between 2002 and 2010

kończeniu zbiorów 10 czerwca. Sucha masa karp po zakończeniu zbiorów wypustek może być nawet o 50% mniejsza niż jesienią (Hikasa i Kamata, 1994). Najmniejszą suchą masę karp w badaniach własnych odnotowano około 2–3 tygodnie po zakończeniu zbiorów wypustek. W tym okresie sucha masa karp była mniejsza niż jesienią średnio od 44,5% przy kończeniu zbiorów 30 czerwca do 43,8% przy kończeniu zbiorów 10 czerwca. Przy kończeniu zbiorów 10 i 20 czerwca masa karp co roku wzrastała odpowiednio o 0,9 i 0,4 t·ha⁻¹, natomiast wydłużenie zbiorów do 30 czerwca nie powodowało corocznego wzrostu masy karp.

3.3. Pędy asymilacyjne

3.3.1. Średnica i wysokość pędu asymilacyjnego a jego masa

Stwierdzono, że masa pędu asymilacyjnego (M_{PA}) zależała od średnicy (d_{PA}) i wysokości (H_{PA}) pędu (ryc. 9a i b). Zależności te były krzywoliniowe a współczynniki determinacji dla równań opisujących te zależności wysoce istotne. Analiza regresji pomiędzy d_{PA} a M_{PA} wyjaśniła 90% zmienności M_{PA} , a pomiędzy H_{PA} i M_{PA} – 59%. Przy czym istotna była też zależność krzywoliniowa pomiędzy d_{PA} i H_{PA} (ryc. 10). Równanie to wyjaśniało 36% zmienności przy $\alpha = 0,01$.

W badaniach własnych przyjęto hipotezę, że masa pędu była skorelowana z jego teoretyczną objętością (V_{PA}), która została obliczona według wzoru na objętość walca:

$$V_{PA} = 3,14 \cdot \left(\frac{d_{PA}}{20} \right)^2 \cdot H_{PA}$$

Po uproszczeniu:

$$V_{PA} = 0,00785 \cdot d_{PA}^2 \cdot H_{PA}$$

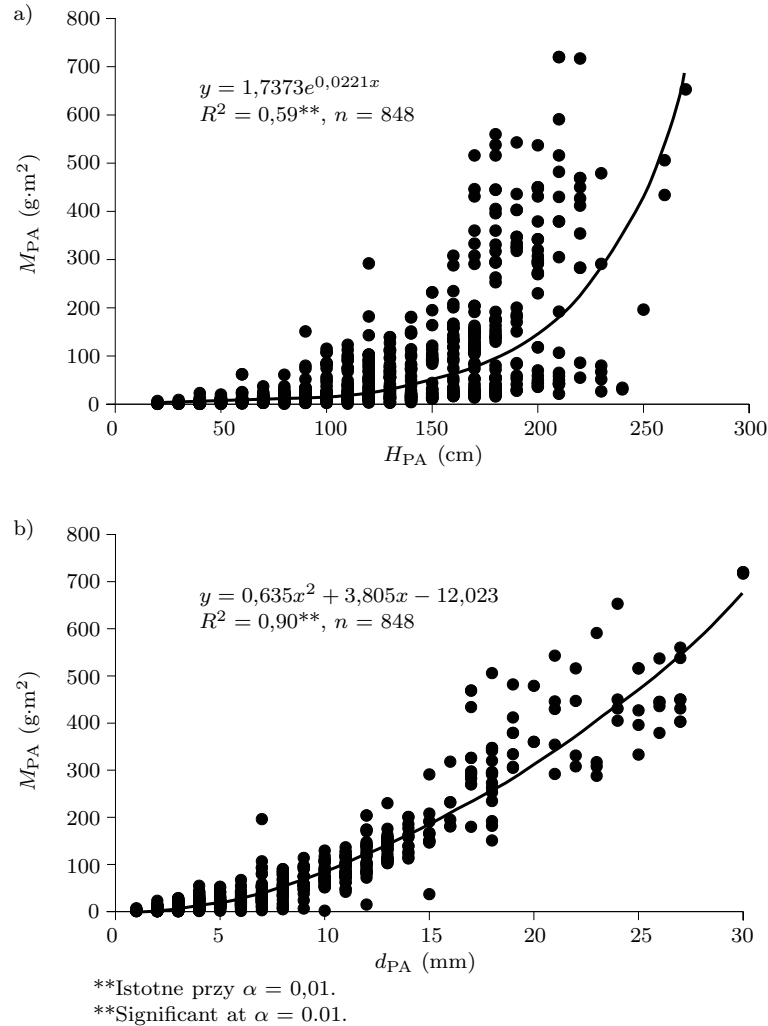
Wybór równania wynikał z założenia, że średnica pędu asymilacyjnego, a tym samym jego objętość, zmniejsza się wraz z rozgałęzieniami bocznymi i gałęziakami i jest ona rekompensowana ich objętością. Na podstawie przeprowadzonej analizy potwierdzono przyjętą hipotezę. Stwierdzono, że współczynnik korelacji pomiędzy masą pędów asymilacyjnych a ich teoretyczną objętością wynosi 0,96 i jest wysoce istotny (ryc. 11a). Analizę przeprowadzono dla pędów asymilacyjnych z doświadczeń D.1.01, D.1.02 i D.1.03, przy założeniu, że 1 cm³ pędu ma masę 1 grama (Vile i in., 2005). Masa pędów wyznaczona z teoretycznej ich objętości (M_{PA_0}) była większa niż ich rzeczywista masa (M_{PA}) średnio o 177,8%. Aby przeliczyć M_{PA_0} na M_{PA} , dla każdego pędu asymilacyjnego wyznaczono współczynnik korygujący według wzoru:

$$WS_k = \frac{M_{PA}}{M_{PA_0}}$$

Na podstawie analizy korelacji pomiędzy WS_k a d_{PA} oraz WS_k a H_{PA} , wykazano, że WS_k zależał od średnicy pędu (ryc. 11b). Zależność ta była krzywoliniowa w zakresie średnicy od 1 mm do 5 mm i prostoliniowa, jeżeli średnica pędów wynosiła więcej niż 5 mm ($WS_k = -0,0133 \cdot d_{PA} + 0,847$; $R^2 = 0,756^{**}$, $n = 23$). Wpływ d_{PA} na WS_k w całym analizowanym zakresie średnic pędów (od 1 mm do 30 mm) został opisany równaniem wyznaczonym z użyciem programu TableCurve 2D firmy SPSS Inc. (ryc. 6b):

$$WS_k = 0,871 - 0,0145 \cdot d_{PA} + 9,74 \cdot \exp(-d_{PA})$$

Przy średnicy pędu asymilacyjnego wynoszącej 4,2 mm WS_k było równe 1. Jeżeli średnica była mniejsza niż 4,2 mm, wartości WS_k były większe niż 1, a przy $d_{PA} > 4,2$ mm wartości WS_k były mniejsze niż 1. Przypuszczalnie u młodych pędów asymilacyjnych, u których średnica jest mała, masa pędów bocznych i gałęziaków była większa niż pędu głównego, natomiast u starszych pędów średnica



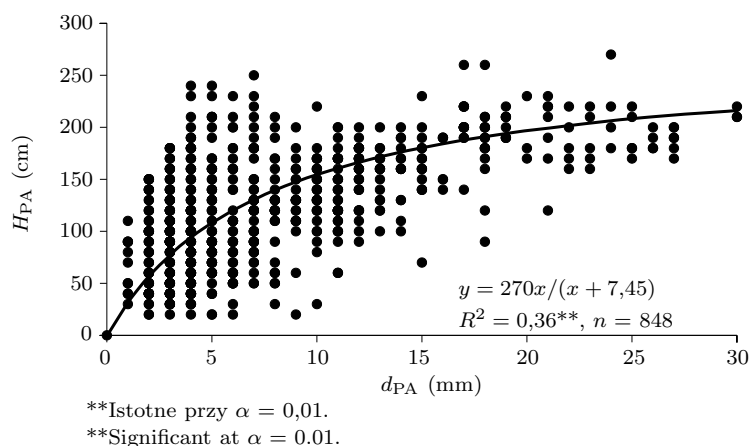
Ryc. 9. Masa pędu asymilacyjnego (M_{PA}) w zależności od: a) jego wysokości (H_{PA}), b) średnicy łodygi (d_{PA}) w doświadczeniach D.1.01, D.1.02 i D.1.03
 Fig. 9. The summer stalk weight (M_{PA}) in relation to: a) its height (H_{PA}), b) stem diameter (d_{PA}) in experiments D.1.01, D.1.02 and D.1.03

była zazwyczaj większa, co powodowało mniejszy udział masy pędów bocznych i gałęziaków. Potwierdzają to badania Inagaki i in. (1989), którzy stwierdzili większy udział masy pędów z gałęziakami w masie całego pędu u roślin jednorocznych niż u roślin trzyletnich.

Po uwzględnieniu WS_k wzór na obliczenie M_{PA} ma postać:

$$M_{PA} = 0,00785 \cdot d_{PA}^2 \cdot H_{PA} \cdot (0,871 - 0,0145 \cdot d_{PA} + 9,74 \cdot \exp(-d_{PA}))$$

Poprawność równania sprawdzono z wykorzystaniem danych użytych do jego wyznaczenia z doświadczeń polowych D.1.01, D.1.02 i D.1.03, jak również po-



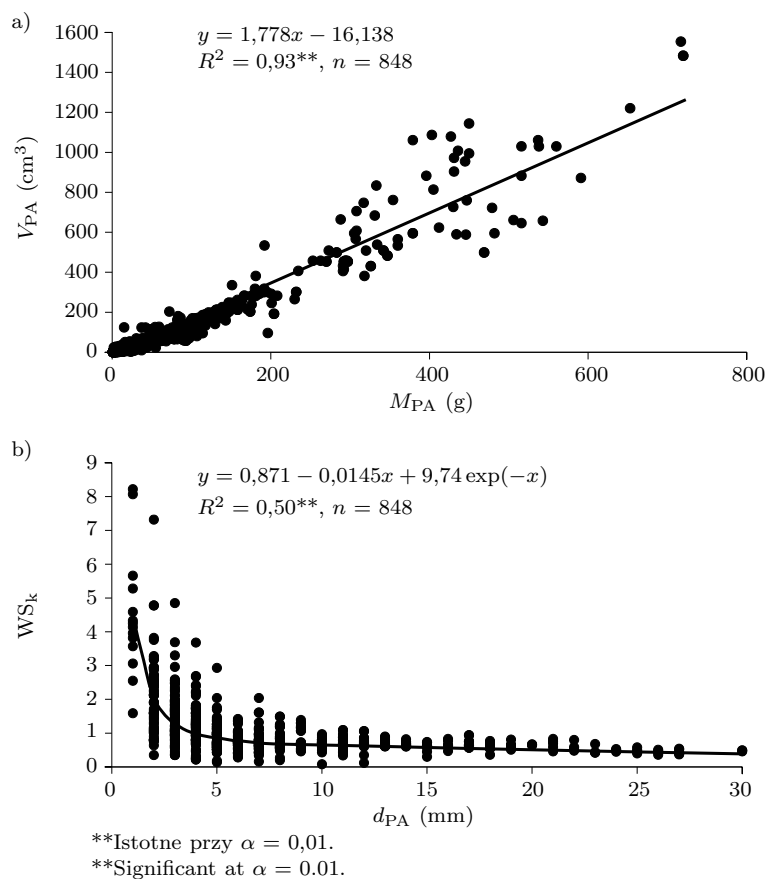
Ryc. 10. Wysokość pędów asymilacyjnych (H_{PA}) a ich średnica (d_{PA}) w doświadczeniach D.1.01, D.1.02 i D.1.03
 Fig. 10. The summer stalk height (H_{PA}) vs. its diameter (d_{PA}) in experiments D.1.01, D.1.02 and D.1.03

miarów z doświadczeń prowadzonych w warunkach kontrolowanych (dośw. D.2.01, D.2.02 i D.2.03). Stwierdzono, że opracowane równanie wyjaśniało 95% zmienności masy pędów asymilacyjnych w doświadczeniach polowych i 78% w doświadczeniach w warunkach kontrolowanych (ryc. 12).

W literaturze brak jest doniesień na temat zależności pomiędzy masą pędów asymilacyjnych a ich średnicą mierzoną u podstawy i ich wysokością. Yen i in. (1996) stwierdzili, że temperatura powyżej 28°C powodowała zmniejszenie świeżej i suchej masy pojedynczego pędu asymilacyjnego, jak również masy wszystkich pędów asymilacyjnych na roślinie, a także zmniejszenie ich wysokości i średnicy. Krzesiński i in. (2008b) stwierdzili, że masa pędów asymilacyjnych, ich wysokość oraz średnica zmieniają się z wiekiem roślin. Młode rośliny tworzą niższe pędy asymilacyjne, o mniejszej średnicy i masie. Opracowane w ramach badań własnych równania opisują masę rośliny w zależności od ich wysokości i średnicy, niezależnie od ich wieku czy też warunków wzrostu.

W badaniach własnych w dwóch doświadczeniach, w których zróżnicowano zakończenie zbiorów (dośw. D.1.02, D.1.03), stwierdzono, że w latach 2002–2010 termin kończenia zbiorów miał wpływ na średnicę pędów asymilacyjnych, ich wysokość oraz średnią masę pojedynczego pędu asymilacyjnego (tab. 20 i 21). Odmiana miała większy wpływ na średnicę i masę pędów asymilacyjnych niż termin kończenia zbiorów, natomiast wysokość pędów zależała przede wszystkim od terminu kończenia zbiorów. Z odmianą związane było 19,2% w całkowitej zmienności średnicy pędów w doświadczeniu, 2,1% zmienności w wysokości pędów i 15,2% zmienności masy pędów asymilacyjnych, a z terminem kończenia zbiorów odpowiednio 4,9%, 15,9% i 9,1%.

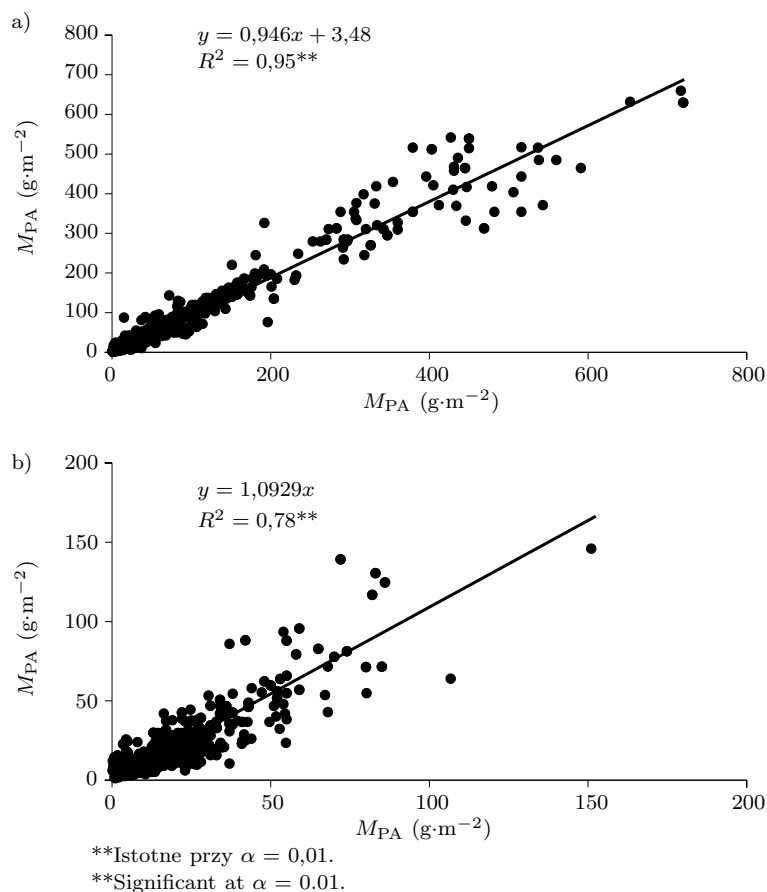
Największą średnią wysokość, średnicę i masę pojedynczego pędu asymilacyjnego miały rośliny, u których zbiór wypustek szparaga trwał do 10 czerwca, a najmniejszą przy wydłużonym zbiorze do 30 czerwca (tab. 20 i 21). Odmiana 'Backlim'



Ryc. 11. Wpływ masy pędów asymilacyjnych (M_{PA}) na ich teoretyczną objętość (V_{PA}) (a) oraz wpływ średnicy pędu (d_{PA}) na współczynnik korygujący masę pędów asymilacyjnych (WS_k) (b) w doświadczeniach D.1.01, D.1.02 i D.1.03

Fig. 11. The influence of the weight of summer stalks on their theoretical volume (V_{PA}) (a) and the influence of the diameter of summer stalks (d_{PA}) on the correction coefficient of the summer stalk weight (WS_k) (b) in experiments D.1.01, D.1.02 and D.1.03

tworzyła pędy asymilacyjne o większej średnicy, wysokości i masie niż odmiana 'Gijnlim'. Nie stwierdzono wpływu interakcji pomiędzy terminem kończenia zbiorów a odmianą na analizowane cechy pędów asymilacyjnych. W doświadczeniu D.1.03, najmniejszą wysokość, średnicę i masę pędów asymilacyjnych wykazano przy najdłuższym okresie zbiorów (tab. 21), z wyjątkiem wysokości przy tradycyjnym terminie zbiorów do 20 czerwca, w którym wysokość pędów była większa niż przy najdłuższym okresie zbiorów, jednak nie potwierdzono tego statystycznie. Wcześniejsze zakończenie zbiorów wydłużyło okres asymilacji. Dzięki temu rośliny miały więcej światła i czasu, aby wytworzyć grubsze i wyższe pędy asymilacyjne, gdyż tylko część produkowanych cukrów magazynowana była w korzeniach, reszta pozostawała w pędach asymilacyjnych (Hikasa i Imada, 1995).



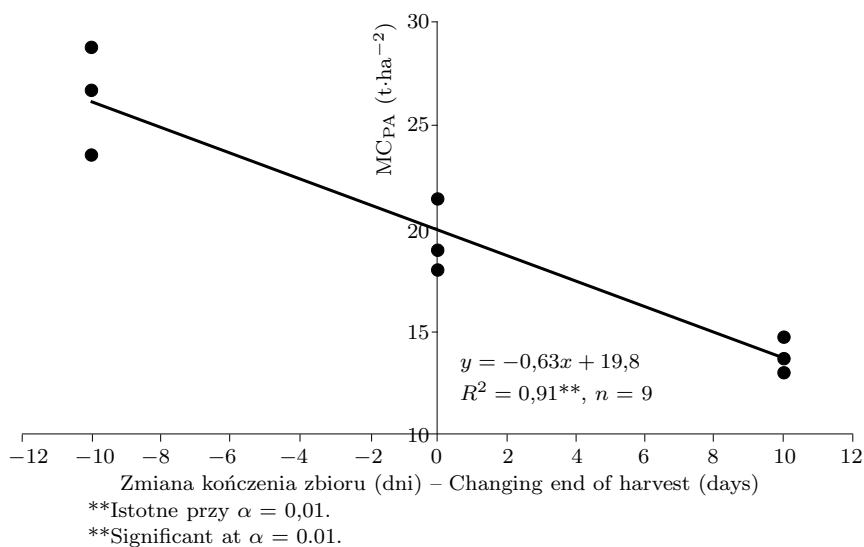
Ryc. 12. Porównanie rzeczywistej masy pędów i obliczonej na podstawie ich średnicy i wysokości z wykorzystaniem pomiarów z doświadczeń: a) D.1.01, D.1.02 i D.1.03, b) D.2.01, D.2.02 i D.2.03

Fig. 12. The actual summer stalk weight vs calculations based on the summer stalk height and diameter measured in experiments: a) D.1.01, D.1.02 and D.1.03, b) D.2.01, D.2.02 and D.2.03

3.3.2. Całkowita masa pędów asymilacyjnych

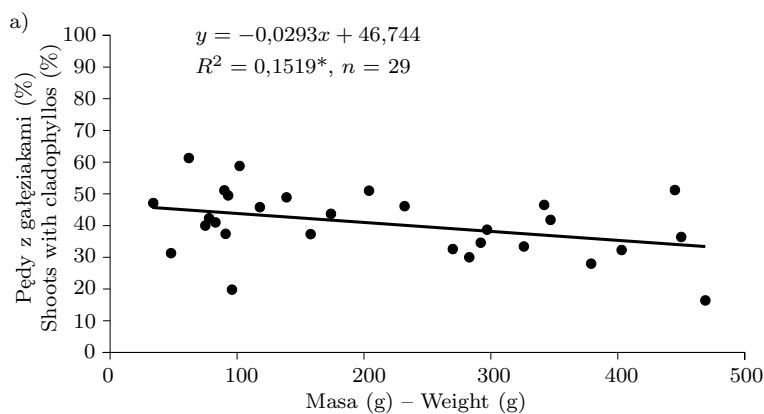
W doświadczeniu D.1.02 nie stwierdzono wpływu odmiany oraz interakcji pomiędzy odmianą a terminem kończenia zbiorów na całkowitą masę pędów asymilacyjnych (tab. 22). Masa ta zależała tylko od terminu kończenia zbiorów. Z terminem kończenia zbiorów związane było 39,2% zmienności masy pędów asymilacyjnych. Największą masę stwierdzono przy kończeniu zbiorów 10 czerwca, a najmniejszą przy opóźnionym terminie kończenia zbiorów do 30 czerwca. W doświadczeniu D.1.03 najmniejszą całkowitą masę pędów asymilacyjnych wykazano również przy najdłuższym okresie zbiorów wypustek (tab. 23). Całkowita masa pędów asymilacyjnych przy kończeniu zbiorów 10 i 20 czerwca nie różniła się sta-

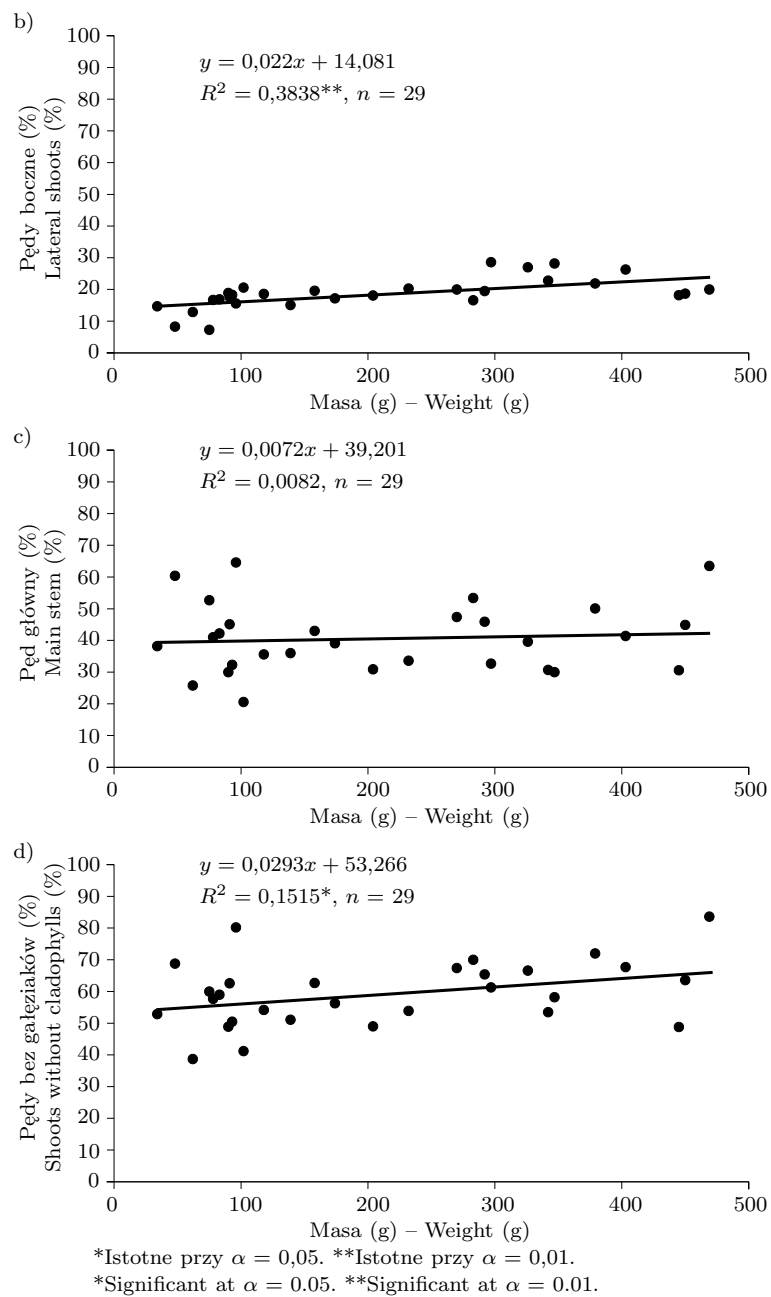
tystycznie. W badaniach własnych w obydwu doświadczeniach, wydłużenie okresu zbiorów o 1 dzień spowodowało zmniejszenie masy pędów asymilacyjnych średnio o $0,63 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (ryc. 13). Również Wilson i in. (2002b) stwierdzili, że wydłużenie okresu zbiorów wypustek powodowało zmniejszenie całkowitej masy pędów asymilacyjnych. Wielkość pędów asymilacyjnych zależy także od temperatury (Yen i in., 1996). Mimo, że w wysokich temperaturach pędy asymilacyjne rosną szybko, to ostateczne ich rozmiary są mniejsze od pędów roślin rosnących w niższych temperaturach.



Ryc. 13. Wpływ zmiany terminu końca zbiorów na całkowitą masę pędów asymilacyjnych (MC_{PA}) na podstawie danych z doświadczeń D.1.02 i D.1.03. Za dzień zerowy przyjęto 20 czerwca

Fig. 13. The influence of change of the harvest end date on the total weight of summer stalks (MC_{PA}), based on data from experiments D.1.02 and D.1.03. June 20 was assumed as day zero





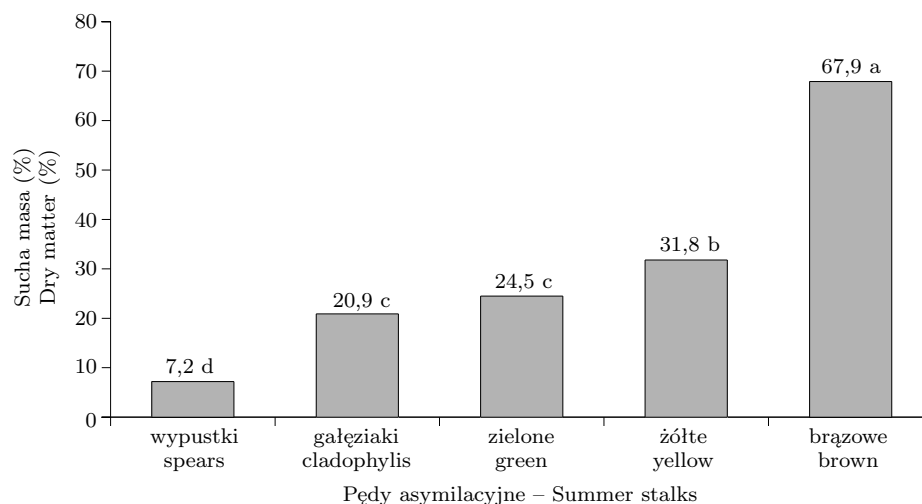
Ryc. 14. Procentowy udział masy pędów z gałęziakami (a), pędów bocznych (b), pędu głównego (c) i pędu głównego wraz z pędami bez gałęziaków (d) w masie całego pędu asymilacyjnego ($n = 29$)

Fig. 14. The percentage of shoots with cladophylls (a), lateral shoots (b), main stem (c) and stem with shoots without cladophylls (d) in the total summer stalk weight ($n = 29$)

W badaniach własnych stwierdzono, że udział masy pędów z gałęziakami, pędów bocznych i wszystkich pędów bez gałęziaków zależał od całkowitej masy pędu, nie miał jednak wpływu na udział masy pędu głównego w całkowitej masie pędu asymilacyjnego (ryc. 14). Im większa była całkowita masa pędów asymilacyjnych, tym mniejszy był udział masy pędów z gałęziakami i większy udział pędów bocznych i wszystkich pędów bez gałęziaków. Udział masy pędów z gałęziakami wahał się średnio od 33,0% do 46,7% całej masy pędu asymilacyjnego, a pędów bocznych bez gałęziaków od 14,0% do 24,4% (ryc. 14). Potwierdzają to wyniki badań prowadzonych przez Inagaki i in. (1989), którzy podają, że sucha masa pędów z gałęziakami stanowiła około 27–63% całkowitej suchej masy pędu asymilacyjnego. W tym u jednorocznych roślin masa pędów z gałęziakami wynosiła 61–63%, a u trzyletnich w zależności od terminu analizy od 27% do 48%. W tych samych badaniach wykazano również, że udział masy pędów bocznych, wynosił 13% u roślin rocznych i 36–51% całej masy pędów u roślin trzyletnich. W badaniach własnych stwierdzono, że masa pędu głównego stanowiła średnio 40,7% świeżej masy całego pędu asymilacyjnego i nie zależała od całkowitej masy pędu asymilacyjnego. Nie potwierdza to doniesień Inagaki i in. (1989), którzy podają, że masa pędu głównego w całej masie pędu asymilacyjnego zależała od wieku rośliny i wynosiła 23–25% u roślin jednorocznych o małej masie całego pędu do 16–22% u roślin trzyletnich o większej masie pędu. Inagaki i in. (1989) tłumaczyli różny udział poszczególnych rodzajów pędów ich wiekiem. Przedstawione równania regresji na rycinie 14, pozwalają stwierdzić, że to nie tyle wiek rośliny, co wielkość pędów asymilacyjnych ma wpływ na ich strukturę. Cienkie i niskie pędy asymilacyjne wyrastają nie tylko w pierwszym roku wzrostu szparaga, ale mogą występować w późniejszych latach w niekorzystnych warunkach wzrostu, lub na skutek nadmiernego eksploataowania roślin przy zbyt długim zbiorze wypustek. Zmiana udziału pędów z gałęziakami w masie całego pędu wskazuje na reakcję szparaga na osłabienie roślin, która polega między innymi na zmniejszeniu średnicy wyrastających wypustek, a po zbiorach, średnicy wyrastających pędów asymilacyjnych przy jednoczesnym zwiększeniu udziału pędów z gałęziakami w masie całego pędu. Jest to mechanizm, który umożliwia zwiększenie efektywności wykorzystania cukrów zużywanych na wzrost pędów asymilacyjnych, gdyż im cieńsze wyrosną pędy, tym większy będzie udział pędów z gałęziakami w każdym pędzie asymilacyjnym, a tym samym większa powierzchnia fotosyntetycznie aktywna, co umożliwi roślinie szybsze gromadzenie cukrów między innymi poprzez lepsze wykorzystanie światła.

3.3.3. Sucha masa pędów asymilacyjnych

Zawartość procentowa suchej masy w pędach asymilacyjnych zależała od ich fazy rozwojowej (ryc. 15). W wyrastających wypustkach zawartość suchej masy była najmniejsza i wynosiła średnio 7,2%. Gałęziaki zawierały 20,9% suchej masy, a całe zielone pędy asymilacyjne 24,5%. Wraz ze starzeniem pędów asymilacyjnych zawartość suchej masy wzrastała. Zżółknięte pędy zawierały 31,8%, a pędy zbrązowiałe, zasychające 67,9%. Nie potwierdza to doniesień z badań prowadzonych w Japonii, gdzie stwierdzono, że zawartość suchej masy w pędach asymilacyjnych



Ryc. 15. Procentowa zawartość suchej masy w pędach asymilacyjnych
 Fig. 15. The percentage of dry matter in summer stalks

szparaga zależała również od pory roku, lecz była ona największa latem, stopniowo zmniejszając się późną jesienią (Hikasa i Kamata, 1994).

W badaniach własnych średnia procentowa zawartość suchej masy w gałęziakach szparaga wynosiła 20,9% i zależała od odmiany (tab. 24). Odmiana ‘Pacific 2000’ miała istotnie mniejszą zawartość suchej masy w gałęziakach niż odmiany ‘Ercole’ i ‘Avalim’.

W doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 masa pędów asymilacyjnych na początku okresu żółknięcia zależała od terminu kończenia zbiorów i nie zależała od odmiany (tab. 25 i 26). Im później kończono zbiory, tym mniejsza była sucha masa pędów. Również Wilson i in. (2002b) stwierdzili, że wydłużenie terminu zbiorów wypustek powodowało zmniejszenie masy pędów asymilacyjnych. Chen (2015) wykazała, że zwiększenie suchej masy pędów asymilacyjnych zwiększa plon ogólny szparagów.

W badaniach własnych całkowita sucha masa pędów asymilacyjnych mieściła się w zakresie od 3,95 t·ha⁻¹ do 8,46 t·ha⁻¹ (tab. 25 i 26). Wilson i in. (2008) podają, że średnio sucha masa pędów asymilacyjnych wynosi około 6 t·ha⁻¹, co wskazuje również, że przyjęta w badaniach własnych metoda wyznaczania masy pędów asymilacyjnych na podstawie ich średnicy i wysokości jest poprawna.

3.3.4. Specyficzna powierzchnia liści (gałęziaków)

W doświadczeniu D.2.04, specyficzna powierzchnia liści (gałęziaków) (SLA) zależała od odmiany (tab. 27). Najmniejsze wartości SLA stwierdzono u odmiany ‘Guelph Millennium’, średnio 6,8 m²·kg⁻¹, a największe u odmian ‘Pacific 2000’ i ‘Vittorio’, odpowiednio 11,2 i 10,0 m²·kg⁻¹. W doświadczeniach D.1.02 i D.1.03, SLA zależała od odmiany i terminu kończenia zbiorów (tab. 28 i 29). U odmiany ‘Gijnlim’ stwierdzono większe wartości SLA niż u odmiany ‘Backlim’.

Wydłużenie okresu zbiorów u tych odmian spowodowało zwiększenie wartości SLA. U odmiany 'Thielim' najmniejszą wartość SLA stwierdzono u roślin, u których zbiory trwały do 10 czerwca. W badaniach Bai i Kelly (1999) analizowali u szparaga specyficzną masę liści (gałęziaków) (SLW – *Specific Leaf Weight*), która jest odwrotnością SLA ($SLW = 1 \cdot SLA^{-1}$). Stwierdzili oni u ośmiu genotypów szparaga, że SLW od końca lipca do końca września wahała się od $10,4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (genotyp 86Sam3) do $13,6 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (odmiana 'Franklim'), co w przeliczeniu na SLA wynosiło od 7,4 do $9,6 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$.

3.3.5. Rozkład pionowy pędów i gałęziaków

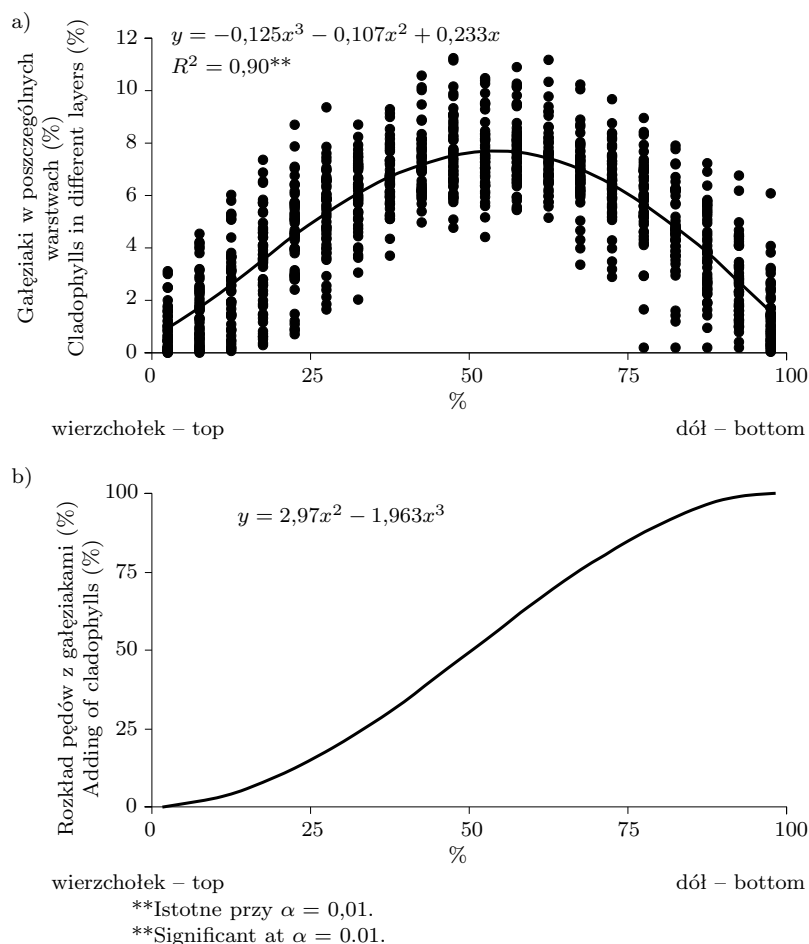
Rozkład pionowy zagęszczenia pędów z gałęziakami został określony na podstawie analizy zdjęć roślin. Wykazano, że pomimo dużego zróżnicowania wielkości roślin najmniejsze zagęszczenie pędów z gałęziakami występowało u podstawy pędów i przy wierzchołku rośliny, natomiast największe w połowie wysokości pędów (ryc. 16a). Na podstawie rozkładu pędów wyznaczono krzywą sumującą rozkład procentowy pędów z gałęziakami (ryc. 16b), która posłużyła do obliczenia pionowego rozkładu powierzchni pędów z gałęziakami (tab. 30), procentu absorbowanego światła w łanie pędów asymilacyjnych (tab. 36) i względnego natężenia światła w łanie pędów asymilacyjnych (tab. 35). Stwierdzono, że w warstwie 0–10% wysokości od wierzchołka pędów asymilacyjnych, powierzchnia pędów z gałęziakami była podobna przy różnym indeksie powierzchni liści (gałęziaków) (LAI). Im większa była odległość od wierzchołka, tym znaczniejsze były różnice w powierzchni przy różnym LAI.

3.3.6. Indeks powierzchni liści (gałęziaków)

W badaniach własnych stwierdzono, że istnieje możliwość wyznaczenia indeksu powierzchni liści (gałęziaków) (LAI) na podstawie łatwo mierzalnych cech pędów asymilacyjnych (ryc. 17). Na podstawie analizy regresji wykazano, że LAI zależał od takich cech pędów asymilacyjnych jak ich wysokość, średnica, masa i suma powierzchni poprzecznych przekrojów pędów oraz od liczby pędów asymilacyjnych. Wysokość i średnica pędów asymilacyjnych były najslabiej skorelowane z LAI.

LAI nie zależał od odmiany, lecz od terminu kończenia zbiorów (tab. 31 i 32). Im wcześniej kończono zbiory wypustek, tym większy był LAI.

Chen (2005) wykazała, że przy tradycyjnym terminie kończenia zbiorów, LAI dwuletnich roślin mieścił się w zakresie 0,7–1,2, a trzyletnich 1,5–2,3.

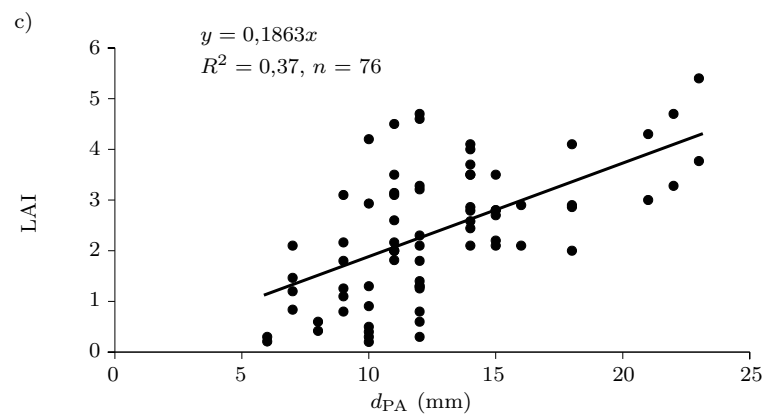
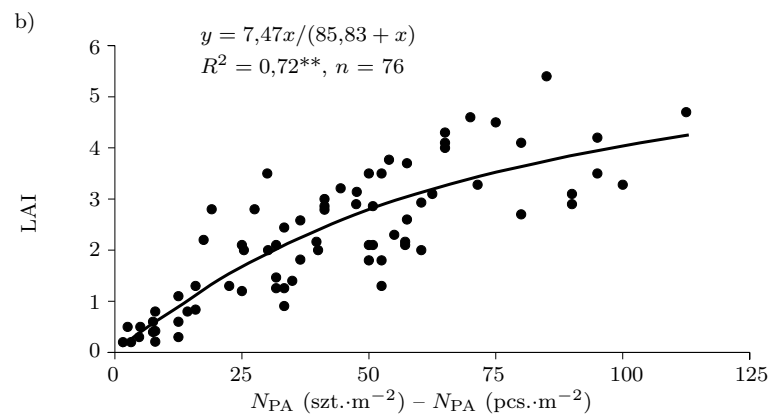
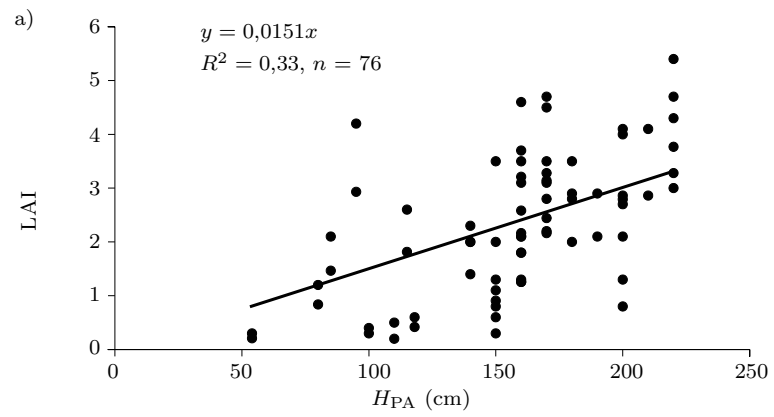


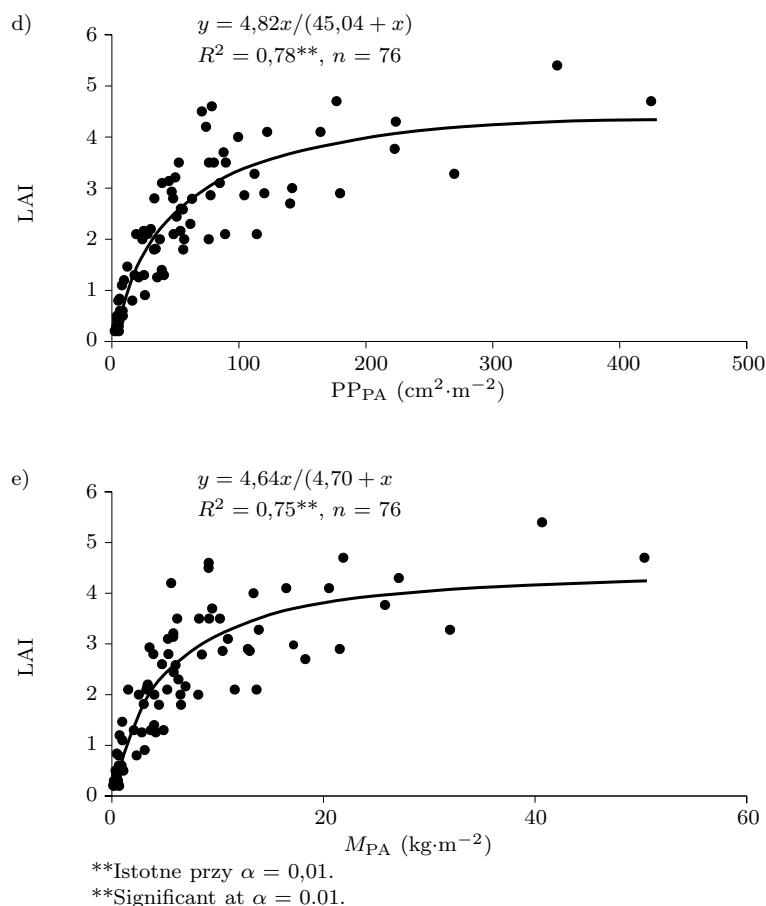
Ryc. 16. Pionowy rozkład gęstości gałęziaków na pędach asymilacyjnych: a) procent gałęziaków w poszczególnych warstwach, b) krzywa sumująca rozkład procentowy pędów z gałęziakami liczona od wierzchołka

Fig. 16. The vertical distribution of cladophyll density on summer stalks: a) the percentage of cladophylls in individual layers, b) the curve adding the percentage of cladophylls from the top of summer stalks

3.3.7. Absorpcja światła

Absorpcja promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (APAR) zależała od wysokości pędów asymilacyjnych (H_{PA}), ich liczby (N_{PA}), średnicy (d_{PA}), sumy pól powierzchni przekrojów poprzecznych pędów asymilacyjnych (PP_{PA}), masy pędów i indeksu powierzchni liści (gałęziaków) (LAI) (ryc. 18). Wszystkie te zależności były krzywoliniowe i wysoce istotne. Zostały one opisane funkcjami $y = 1 - \exp(-bx)$ lub $y = x/(b + x)$, w których wartość maksymalna wynosiła 1 (100%). Najwyższy współczynnik korelacji stwierdzono dla zależności pomiędzy LAI a APAR. Na podstawie analizy regresji wykazano, że równanie opisujące za-



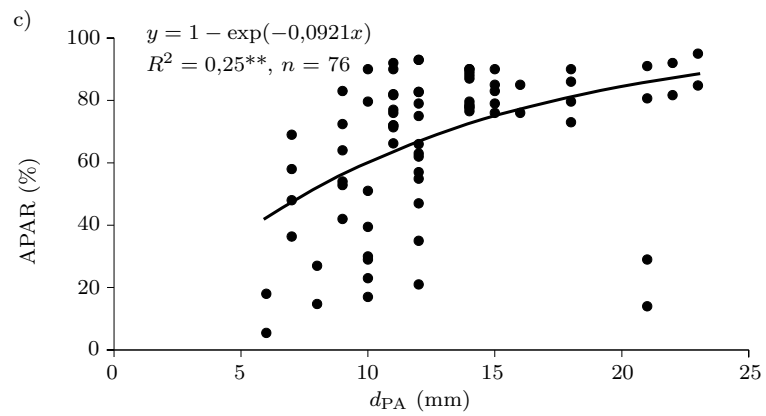
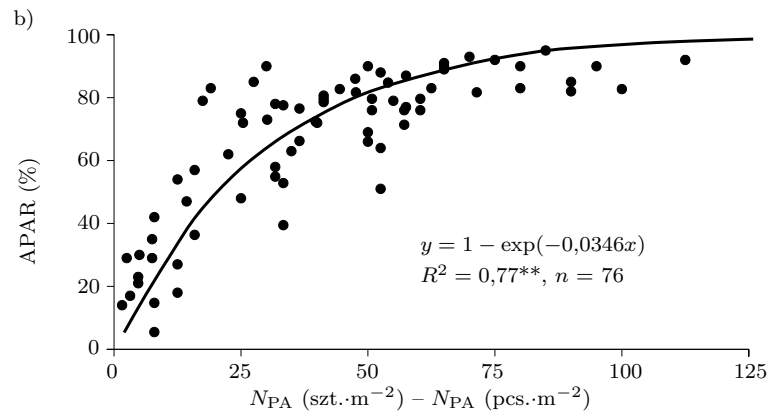
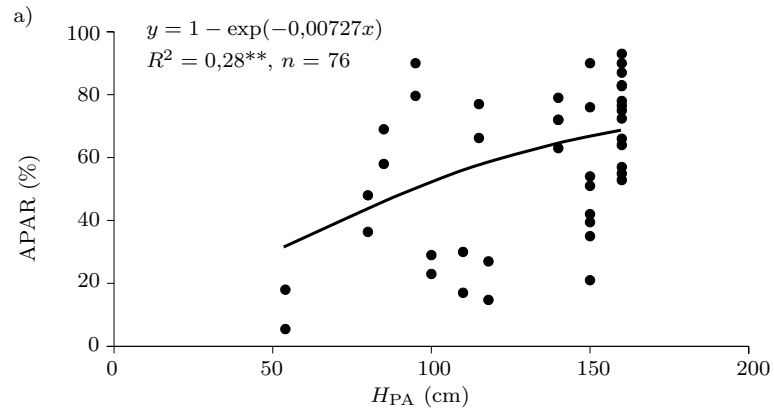


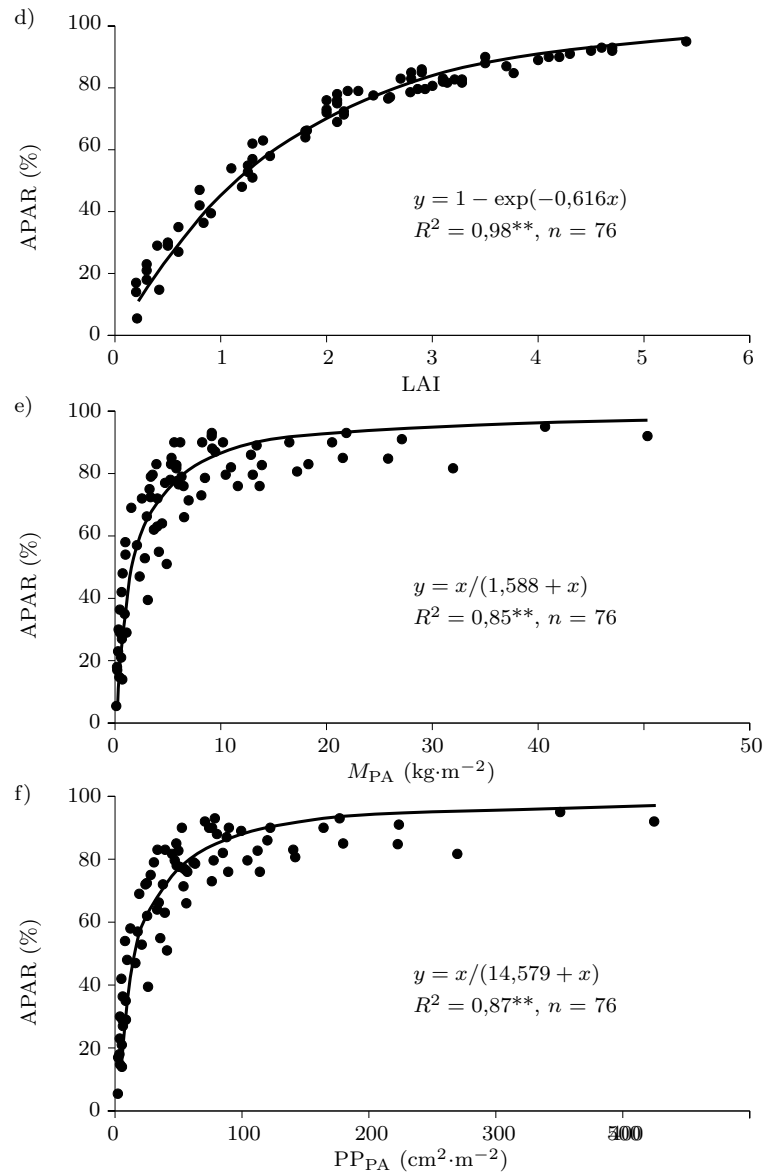
Ryc. 17. Indeks powierzchni liści (LAI) jako funkcja: a) wysokości pędów (H_{PA}), b) liczby pędów (N_{PA}), c) średniej średnicy pędów (d_{PA}), d) sumy pól powierzchni przekrojów poprzecznych pędów asymilacyjnych (PP_{PA}), e) masy pędów asymilacyjnych (M_{PA})

Fig. 17. The leaf area index (LAI) as a function of: a) the summer stalk height (H_{PA}), b) the number of stalks (N_{PA}), c) the stalk diameter (d_{PA}), d) the total cross-sectional area of stalks (PP_{PA}), e) the summer stalk weight (M_{PA})

leżność pomiędzy LAI a APAR wyjaśniało 98% zmienności APAR. Nieco mniej, bo 87% zmienności wyjaśniała PP_{PA} , M_{PA} (85%) i N_{PA} (77%). Równania regresji opisujące zależności pomiędzy H_{PA} a APAR, jak i d_{PA} a APAR, pomimo że statystycznie wysoce istotne, wyjaśniały tylko odpowiednio 28% i 25% zmienności APAR.

W doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 wykazano, że skrócenie okresu zbiorów, spowodowało zwiększenie LAI i ilości absorbowanego światła (tab. 33 i 34). Pędy asymilacyjne w tych doświadczeniach absorbowały średnio od 51% do 78,7% dochodzącego światła. Był (2013) stwierdził, że pędy asymilacyjne mogą absorbować 62,5%–90,2%. Natomiast Chen (2015) wykazała, że absorpcja światła przez pędy





**Istotne przy $\alpha = 0,01$.

**Significant at $\alpha = 0.01$.

Ryc. 18. Absorpcja promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (APAR) jako funkcja: a) wysokości pędów asymilacyjnych (H_{PA}), b) liczby pędów asymilacyjnych (N_{PA}), c) średnicy pędów asymilacyjnych (d_{PA}), d) indeksu powierzchni liści (LAI), e) masy pędów asymilacyjnych (M_{PA}), f) sumy pól powierzchni przekrojów poprzecznych pędów asymilacyjnych (PP_{PA})

Fig. 18. The absorption of photosynthetic active radiation as a function of: a) the summer stalk height (H_{PA}), b) the number of summer stalks (N_{PA}), c) the mean summer stalk diameter (d_{PA}), d) the leaf area index (LAI), e) the summer stalk weight (M_{PA}), f) the total cross-sectional area of summer stalks (PP_{PA})

asymilacyjne szparaga zależy od odmiany i wieku roślin i mieści się w zakresie od 40,6% do 83,1%.

Na podstawie rozkładu pionowego pędów z gałęziakami oraz Indeksu powierzchni liści (gałęziaków) przeanalizowano względne natężenie światła w łanie pędów asymilacyjnych oraz procent absorbowanego światła przez pędy (tab. 35 i 36). Stwierdzono, że im mniejszy był LAI, tym większe było średnie natężenie światła w łanie pędów asymilacyjnych. Przy LAI = 1 oraz 1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFd dochodzącego do roślin, natężenie światła w dolnych partiach pędów asymilacyjnych wynosiło 538–549 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFd, przy względnym natężeniu światła 53,8–54,9%, natomiast przy LAI = 3, natężenie światła wynosiło zaledwie 156–165 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFd, gdyż względne natężenie światła wynosiło 15,6–16,5%. Dzięki temu przy niskim LAI, pędy z gałęziami w łanie pędów asymilacyjnych miały większy PPFd do fotosyntezy niż rośliny, u których LAI był wysoki. Był to jeden z mechanizmów kompensujących krótszy okres asymilacji oraz mniejszy LAI przy wydłużonym zbiorze do 30 czerwca. Dlatego między innymi pomimo mniejszej ilości absorbowanego światła przez pędy asymilacyjne (tab. 36), wielkość plonu ogólnego przy wydłużonym zbiorze do 30 czerwca różniła się w niewielkim stopniu od plonu ogólnego zebranego do 10 czerwca (tab. 16 i 17).

3.4. Fotosynteza

3.4.1. Krzywe świetlne fotosyntezy

Krzywe świetlne fotosyntezy, wyznaczone na podstawie pomiarów dla czterech temperatur powietrza (15, 20, 25 i 30°C) i ośmiu odmian ('Avalim', 'Erocole', 'Gijnlim', 'Guelph Millennium', 'NJ 953', 'Pacific 2000', 'UC 157', 'Vittorio') w doświadczeniu D.2.04, przedstawiano na rycinie 19a. Stwierdzono istotny wpływ temperatury powietrza na efektywność kwantową fotosyntezy, punkt wysycenia światłem oraz punkt kompensacji świetlnej (ryc. 19). Nie stwierdzono wpływu temperatury powietrza na maksymalną fotosyntezę netto w badanym zakresie temperatury powietrza.

3.4.2. Efektywność kwantowa fotosyntezy

Efektywność kwantowa fotosyntezy zależała od odmiany i temperatury powietrza (ryc. 19b, tab. 37 i 38), mieściła się w zakresie od 0,07 do 0,209, podczas gdy w badaniach Chen (2015) efektywność kwantowa fotosyntezy była niższa niż w badaniach własnych i mieściła się w zakresie od 0,03 do 0,48.

W badaniach własnych największą średnią efektywność kwantową miały odmiany 'Guelph Millennium' i 'UC 157' (tab. 37). Nieco mniejszą, jednak nieróżniącą się statystycznie od powyższych, miały odmiany 'NJ 953', 'Pacific 2000' i 'Vittorio'. Najmniejszą efektywność kwantową miała odmian 'Gijnlim'. Wpływ

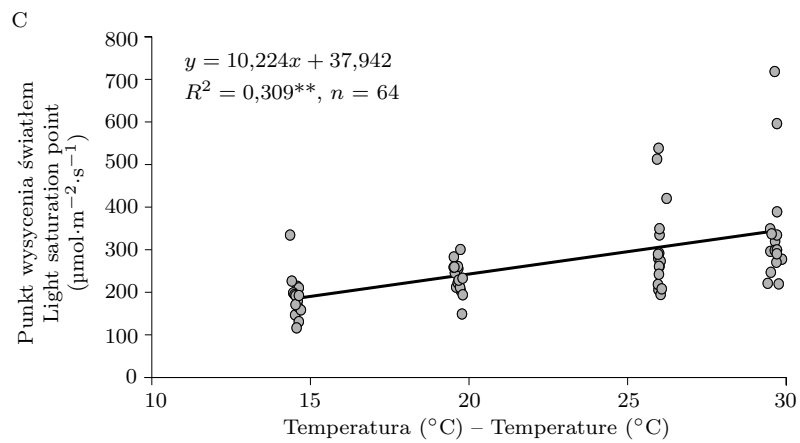
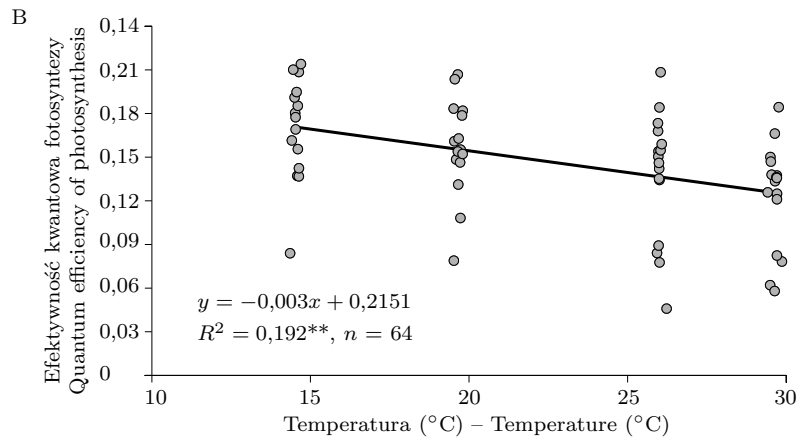
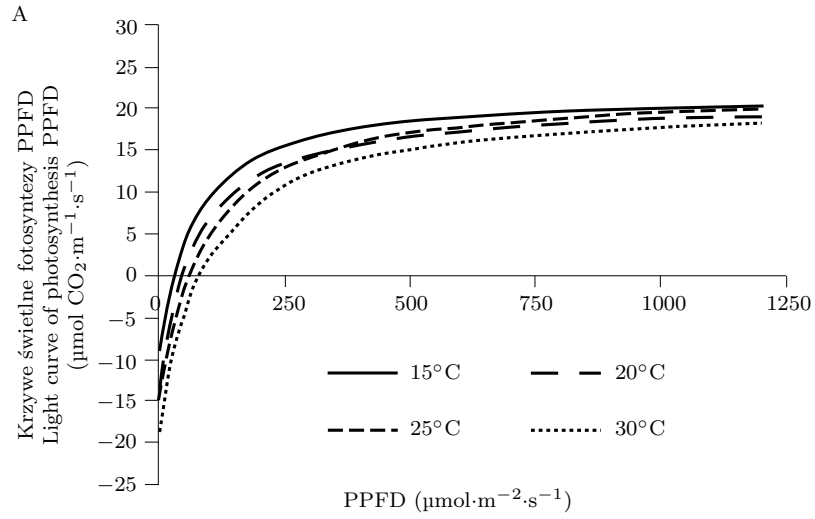
temperatury powietrza na efektywność kwantową fotosyntezy potwierdziła analiza regresji prostoliniowej, która wyjaśniła średnio dla wszystkich odmian 19,2% zmienności (ryc. 19b). Im wyższa temperatura w zakresie od 15°C do 30°C, tym mniejsza była efektywność fotosyntezy. Zwiększenie temperatury powietrza o 10°C powodowało zmniejszenie efektywności kwantowej fotosyntezy średnio dla wszystkich odmian o 3%. Efektywność kwantowa najsilniej zmniejszała się wraz ze wzrostem temperatury u odmiany ‘Gijnlim’ (tab. 38). Wzrost temperatury u tej odmiany o 10°C powodował zmniejszenie efektywności kwantowej fotosyntezy o 5,5%. Analiza regresji dla tej odmiany wyjaśniła 87,4% zmienności tej cechy.

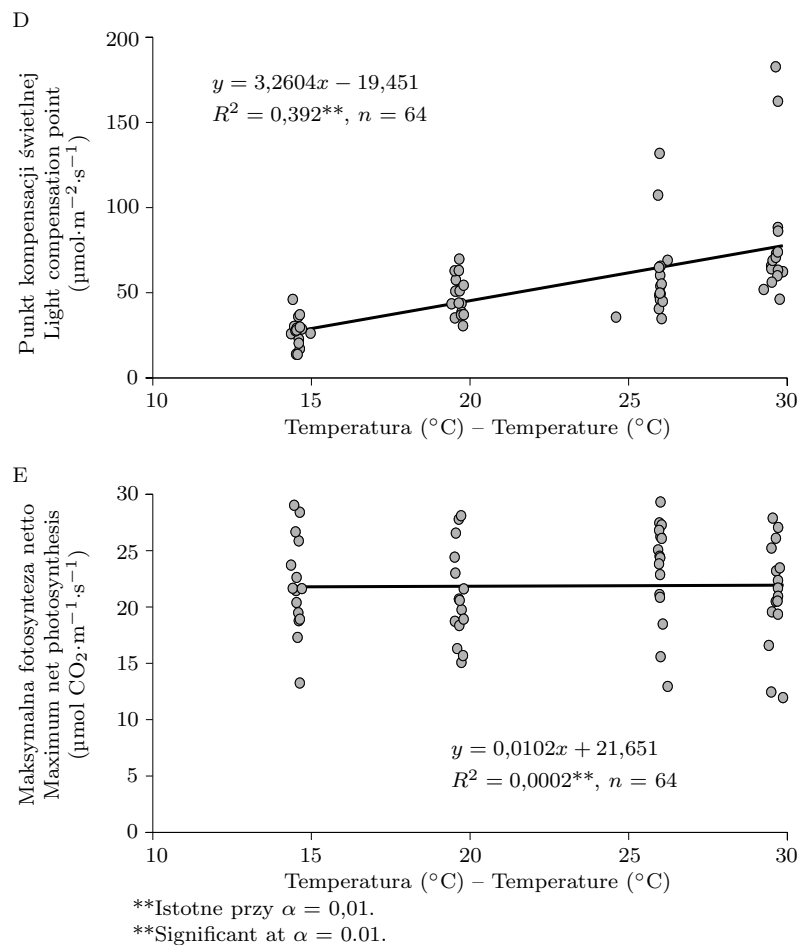
3.4.3. Punkt wysycenia światłem

Średni punkt wysycenia światłem zależał od odmiany (ryc. 19c, tab. 39 i 40). Odmiana ‘Gijnlim’ miała najwyższy punkt wysycenia światłem, a odmiany ‘Vittorio’ i ‘UC 157’ najniższy, przy czym punkt wysycenia światłem u tych odmian nie różnił się istotnie od punktu wysycenia światłem u odmian ‘Pacific 2000’, ‘Guelph Millennium’ i ‘Ercole’ (tab. 39). Temperatura powietrza miała wpływ na punkt wysycenia światłem (tab. 39 i ryc. 19c). Zwiększenie temperatury powietrza o 1°C powodowało zwiększenie punktu wysycenia światłem o 10,2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Analiza regresji prostoliniowej wyjaśniła 31% zmienności tej cechy średnio dla wszystkich odmian. Podobnie jak przy efektywności kwantowej, również w przypadku punktu wysycenia światłem u odmiany ‘Gijnlim’, stwierdzono najsilniejszą reakcję na temperaturę (tab. 40). U odmiany tej zwiększenie temperatury o 1°C powodowało wzrost punktu wysycenia światłem o 35,4 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ przy 94,6% wyjaśnionej zmienności.

3.4.4. Punkt kompensacji świetlnej

Punkt kompensacji świetlnej zależał od odmiany i temperatury powietrza (tab. 41, 42 i ryc. 19d). Najwyższy średni punkt kompensacji świetlnej stwierdzono u odmiany ‘Gijnlim’. U tej odmiany punkt ten najszybciej wzrastał również wraz z temperaturą, średnio o 10,0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ na 1°C (tab. 41). Średnio dla wszystkich odmian zwiększenie temperatury o 1°C powodowało wzrost punktu kompensacji o 3,2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (ryc. 19d). W badaniach własnych punkt kompensacji świetlnej mieścił się w zakresie od 20 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ do 173 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, co jest znacznie szerszym zakresem w porównaniu z tym, który podają Inagaki i in. (1989). Stwierdzili oni, że punkt kompensacji świetlnej dla szparaga mieścił się w zakresie od 1,2 klx do 2 klx, co w przeliczeniu wynosiło 28–37 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. W badaniach własnych wykorzystano jednak więcej odmian, a pomiary wykonano w szerszym zakresie temperatury.





Ryc. 19. Wpływ temperatury powietrza na krzywe świetlne fotosyntezy (A) oraz ich parametry średnio z ośmiu odmian ('Avalim', 'Erocole', 'Gijnlim', 'Guelpth Millennium', 'NJ 953', 'Pacific 2000', 'UC 157', 'Vittorio'): efektywność kwantowa fotosyntezy (B), punkt wysycenia światłem (C), punkt kompensacji świetlnej (D), maksymalna fotosynteza netto (E) w doświadczeniu D.2.04

Fig. 19. The influence of the air temperature on photosynthesis light curves (A) and their average parameters in eight cultivars ('Avalim', 'Erocole', 'Gijnlim', 'Guelpth Millennium', 'NJ 953', 'Pacific 2000', 'UC 157', 'Vittorio'): quantum efficiency of photosynthesis (B), the light saturation point (C), the light compensation point (D), the maximum net photosynthesis (E) in experiment D.2.04

3.4.5. Maksymalna fotosynteza netto

W doświadczeniu D.2.04 wykazano, że maksymalna fotosynteza netto zależała od odmiany i temperatury powietrza (ryc. 19f, tab. 43 i 44). Największą średnią wartość maksymalnej fotosyntezy netto stwierdzono u odmian 'NJ 953' ($27,1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) i 'Guelph Millennium' ($26,2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), a najmniejszą u 'Avalim' ($16,3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) i 'Vittorio' ($18,6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (tab. 43). Potwierdza to wcześniejsze doniesienia o zróżnicowaniu maksymalnej fotosyntezy netto w zależności od odmiany szparaga (Guo, 2001). Autor ten wykazał, że odmiana ASP-69 miała istotnie wyższy poziom maksymalnej fotosyntezy netto niż odmiana ASP-03. Maksymalna fotosynteza netto uzyskana w badaniach własnych była wyższa niż podają Guo i in. (2002b) oraz Chen (2015).

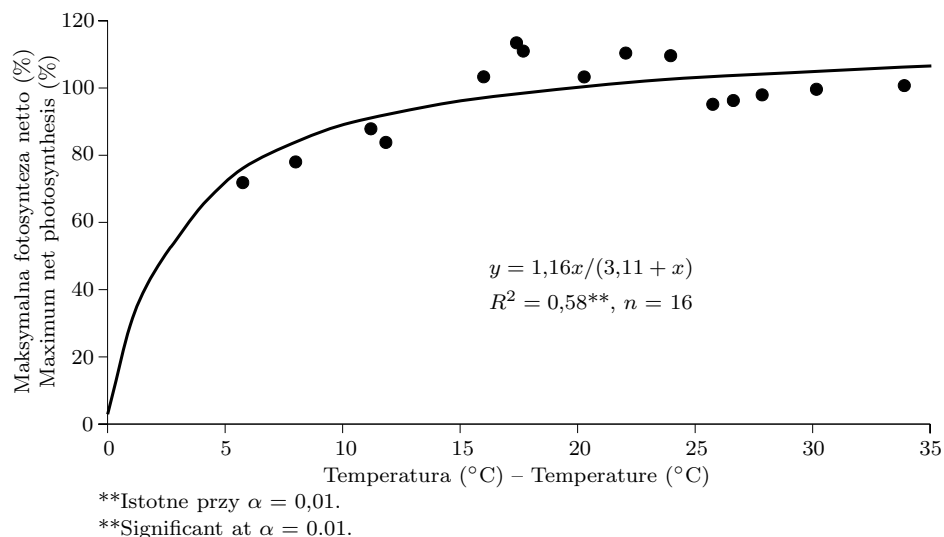
W analizie regresji obejmującej wszystkie odmiany, nie stwierdzono istotnego wpływu temperatury na maksymalną fotosyntezę netto (ryc. 19f). Wpływ temperatury na tę cechę był istotny tylko dla odmian 'Avalim' i 'Guelph Millennium'. U obydwu tych odmian maksymalna intensywność fotosyntezy netto malała wraz ze wzrostem temperatury od 15°C do 30°C , odpowiednio o $5,9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ i $3,4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ na każde 10°C (tab. 44). Sawada i in. (1962), stwierdzili, że asymilacja CO_2 w temperaturze 18°C jest bardziej efektywna niż w temperaturze 13°C i 28°C . Inni autorzy wykazali, że optymalna temperatura dla procesu fotosyntezy wynosiła poniżej 20°C . W wyższych temperaturach natężenie asymilacji szybko spadało (Yen i in., 1993). Potwierdza to częściowo wyniki uzyskane w badaniach własnych, w których dla dwóch odmian wraz ze wzrostem temperatury uzyskano zmniejszenie maksymalnej fotosyntezy netto.

Natężenie fotosyntezy i oddychania pędów asymilacyjnych według Lin i Hunga (1978) zmienia się wraz ze wzrostem i rozwojem pędów asymilacyjnych, warunkami środowiska oraz odmianą, a nawet płcią rośliny. Autorzy ci stwierdzili, że oddychanie przeważa nad asymilacją CO_2 od początku wzrostu pędów asymilacyjnych do początku tworzenia gałązek i że w tej fazie od 50% do 65% CO_2 wydalanego w czasie oddychania może być ponownie wykorzystane w procesie fotosyntezy. Największe natężenie asymilacji netto CO_2 stwierdzili oni u zupełnie wyrosniętych, zdrowych, zielonych, trzymiesięcznych pędów asymilacyjnych.

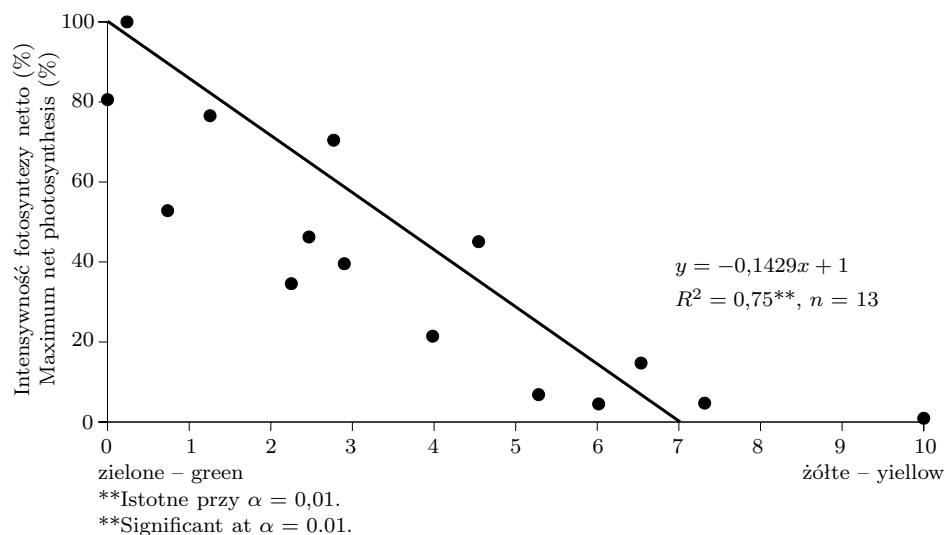
Względna maksymalna fotosynteza netto w doświadczeniach D.2.01, D.2.02, D.2.03 zależała od temperatury powietrza (ryc. 20). Analiza regresji krzywoliniowej wyjaśniła 58% zmienności tej cechy. Za 100% przyjęto fotosyntezę w temperaturze 20°C , która wynosiła średnio $19,4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Wartości względnej maksymalnej fotosyntezy netto od temperatury 0°C do $5,7^{\circ}\text{C}$, zostały ekstrapolowane przy założeniu, że w temperaturze 0°C , wydajność fotosyntezy netto równa się $0 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Stwierdzono liniową zależność pomiędzy stopniem żółknięcia pędów z gałązkami a względną maksymalną fotosyntezą netto (ryc. 21). Stopień żółknięcia określano w skali od 0 do 10, w której 0 oznaczało zielone pędy z gałązkami, a 10 – żółte. Zwiększenie żółknięcia o jeden stopień powodowało zmniejszenie względnej intensywności fotosyntezy netto o 14,3%.

U szparaga zielone pędy asymilacyjne utrzymują się w Polsce do początku września, a następnie zaczynają one stopniowo żółknąć. Wraz z ich żółknięciem



Ryc. 20. Wpływ temperatury powietrza na względną maksymalną fotosyntezę netto pędów z gałęziakami w doświadczeniach D.2.01, D.2.02 i D.2.03
Fig. 20. The influence of the air temperature on the relative maximum net photosynthesis in experiments D.2.01, D.2.02 and D.2.03



Ryc. 21. Wpływ stopnia żółknięcia pędów na względną intensywność fotosyntezy netto w doświadczeniach D.2.01, D.2.02 i D.2.03
Fig. 21. The influence of the degree of summer stalk yellowing on the relative maximum net photosynthesis in experiments D.2.01, D.2.02 and D.2.03

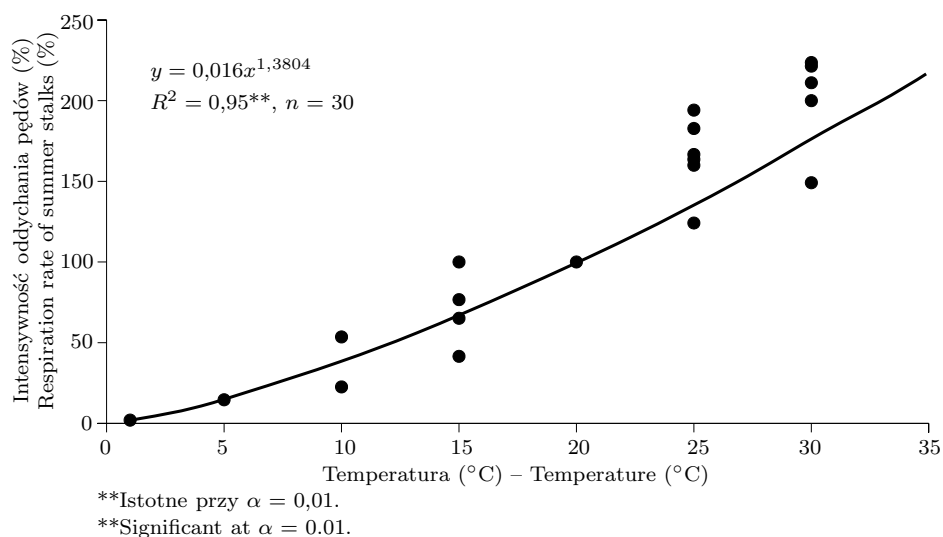
natężenie fotosyntezy zmniejsza się. W końcu września większość pędów asymilacyjnych jest żółknięta, co jak wykazano w niniejszej pracy, kończy okres asymilacji CO₂. Pomijając okresy wyrastania pędów asymilacyjnych oraz ich żółknięcia, intensywne asymilacja trwa w warunkach Polski około 60 dni. Ścinanie żółkniętych pędów asymilacyjnych jest niewskazane ze względu na transport cukrów i substancji mineralnych z zamierających pędów asymilacyjnych do korzeni, czego dowodem może być duże natężenie oddychania. Wycięcie w tym okresie pędów asymilacyjnych może prowadzić do zmniejszenia plonów w roku następnym.

Według Lin i Hunga (1978) natężenie fotosyntezy i oddychania pędów asymilacyjnych zmienia się wraz z ich wzrostem i rozwojem, jak również z warunkami środowiska, odmianą i płcią rośliny.

3.5. Oddychanie

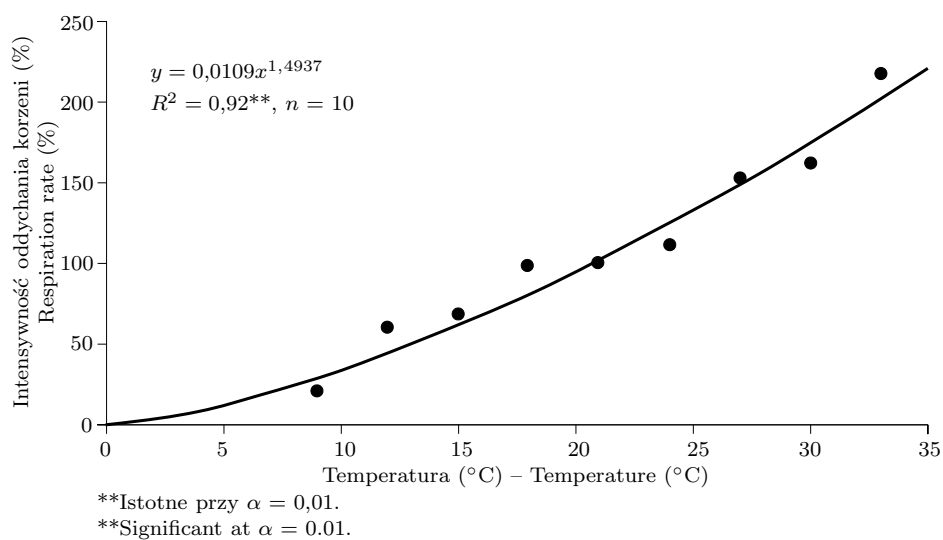
Na podstawie doświadczeń prowadzonych w warunkach kontrolowanych (doświadczenie D.2.01, D.2.02 i D.2.03) wyznaczono względną intensywność oddychania pędów asymilacyjnych w temperaturze od 0°C do 30°C (ryc. 22). Za 100% przyjęto oddychanie w temperaturze 20°C. Średnia zmierzona intensywność oddychania w tej temperaturze wynosiła 1,34 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (212 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹), co przy SLA wynoszącym 9,3 m²·kg⁻¹ odpowiadało 12,4 $\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ s.m. Podwojenie temperatury powodowało zwiększenie względnej intensywności oddychania pędów asymilacyjnych w ciemności średnio o 2,6-raza. Intensywność oddychania przy 20°C jest niższa niż uzyskali Woolley i in. (1996), którzy stwierdzili w swoich badaniach, że natężenie oddychania w tej temperaturze wynosiło ok. 19,5 $\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ s.m. (2,1 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ przy SLA 9,3 m²·kg⁻¹). W badaniach tych podwojenie temperatury powodowało zwiększenie intensywności oddychania 3,5-raza. Natomiast Guo i in. (2002b) podają, że w swoich badaniach uzyskali intensywność oddychania pędów asymilacyjnych w temperaturze 25°C na poziomie od 0,22 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ w okresie starzenia się pędów asymilacyjnych do 0,94 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ u pędów młodych w pełni rozwiniętych. Chen (2015) wskazuje, że średnie oddychanie w ciemności w temperaturze 20°C pędów asymilacyjnych z gałęziakami wynosiło od 0,3 do 0,9 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

W doświadczeniach D.2.01, D.2.02 i D.2.03 prowadzonych w uprawie hydroponicznej stwierdzono, że oddychanie korzeni w temperaturze 20°C wynosiło średnio 0,61 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ s.m. (96,6 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ s.m.). Intensywność oddychania zależała od temperatury. Wykazano krzywoliniową zależność pomiędzy temperaturą a względnym natężeniem oddychania korzeni. Zależność tą opisano funkcją potęgową (ryc. 23). Podwojenie temperatury powodowało zwiększenie intensywności oddychania korzeni o 2,8-raza. Chen (2015) stwierdziła, że podwojenie temperatury powodowało zwiększenie intensywności oddychania korzeni średnio 3,5-krotnie. W oparciu o zawartość węgla w CO₂ i w cukrach wyznaczono ilość cukrów jaka została zużyta w czasie oddychania bytowego korzeni. Stwierdzono, że



Ryc. 22. Wpływ temperatury powietrza na względną intensywność oddychania pędów z gałązkami w doświadczeniach D.2.01, D.2.02 i D.2.03

Fig. 22. The influence of the air temperature on relative respiration rate of summer stalks in experiments D.2.01, D.2.02 and D.2.03



Ryc. 23. Wpływ temperatury na względną intensywność oddychania korzeni szparaga w doświadczeniach D.2.01, D.2.02 i D.2.03

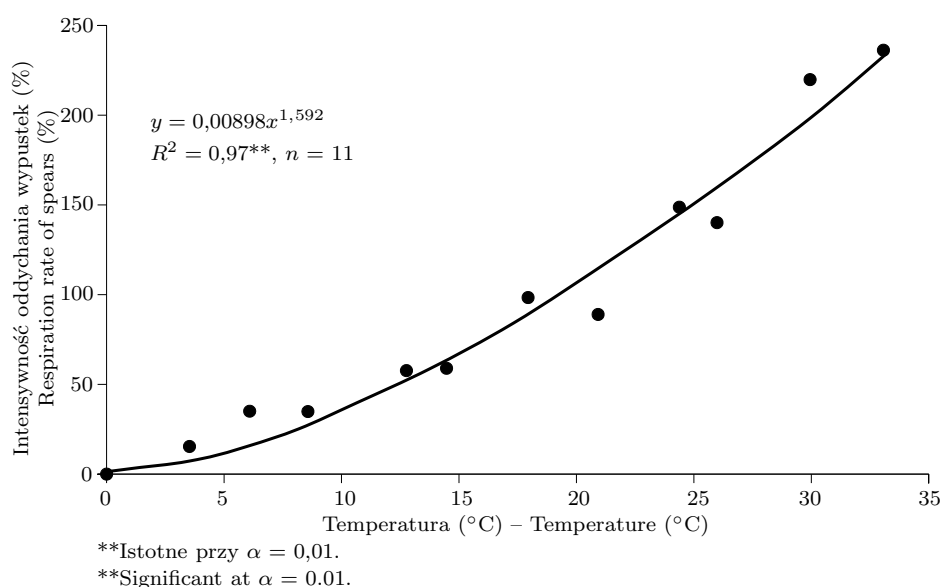
Fig. 23. The influence of temperature on the relative respiration rate in experiments D.2.01, D.2.02 and D.2.03

w ciągu doby rośliny szparaga zużywały na potrzeby oddychania 1,59 g cukrów na 1 kg suchej masy korzeni. Po uwzględnieniu wpływu temperatury na względną intensywność oddychania korzeni wyznaczono równanie umożliwiające obliczenie zapotrzebowania na cukry zużywane w procesie oddychania korzeni szparaga w temperaturze od 0°C do 35°C:

$$R_{KA} = 1,59 \cdot (0,0109 \cdot T^{2,938})$$

Równanie to zostało użyte do obliczenia ilości cukrów zużywanych do oddychania bytowego karp szparaga w okresie asymilacji.

Wykazano istotny wpływ temperatury na oddychanie wypustek szparaga w doświadczeniach D.2.01 i D.2.02 (ryc. 24). Stwierdzono, że oddychanie wypustek szparaga w temperaturze 20°C wynosiło 1,42 $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ CO₂ (225 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹).



Ryc. 24. Wpływ temperatury powietrza na względną intensywność oddychania wypustek w doświadczeniach D.2.01 i D.2.02

Fig. 24. The influence of the air temperature on the relative respiration rate of spears in experiments D.2.01 and D.2.02

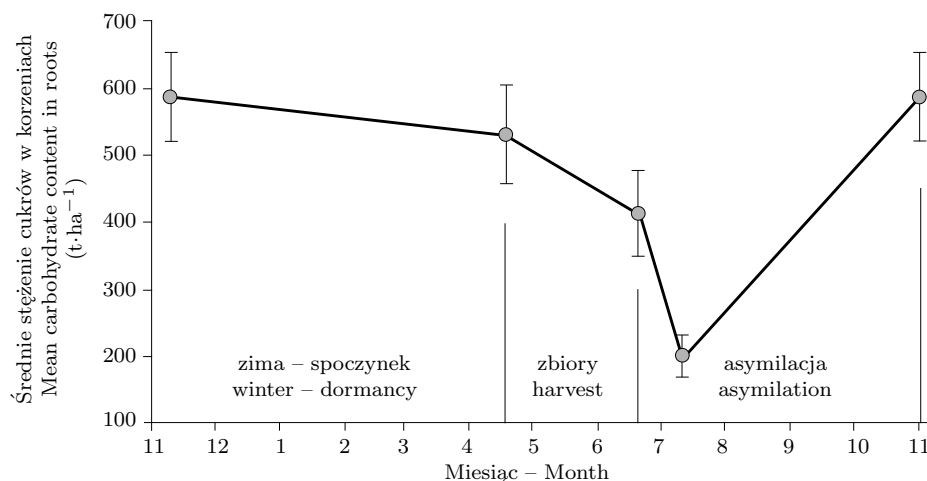
3.6. Cukry

3.6.1. Stężenie cukrów w korzeniach

Średnie stężenie cukrów w ciągu roku w badaniach własnych przedstawiono na rycinie 25. Największe stężenie cukrów występowało jesienią po zakończeniu okresu asymilacji, średnio 587 mg·g⁻¹ s.m. Nie stwierdzono w tym okresie istotnego wpływu odmiany i terminu kończenia zbiorów na stężenie cukrów. W okresie

zimy stężenie cukrów stopniowo się zmniejszało, średnio o 9,5%, w porównaniu ze stężeniem cukrów jesienią. Straty cukrów zgromadzonych w korzeniach w tym okresie spowodowane były oddychaniem bytowym i zależały od temperatury. Straty te zazwyczaj są tym większe, im cieplejsza jest zima i mogą dochodzić nawet do 30% ilości cukrów zgromadzonych w karpach (Haynes, 1987; Pressman i in., 1993; Guo, 2001). Wraz ze spadkiem stężenia fruktanów w okresie zimowym, wzrasta poziom cukrów niskocząsteczkowych, który może być reakcją na niskie temperatury (Martin i Hartmann, 1990), jako że łatwe przystosowywanie się do warunków stresu termicznego jest typową reakcją roślin magazynujących fruktany. Podobna reakcja została zaobserwowana przy deficycie wody (Pressman i in., 1989), która również powoduje spadek stężenia omawianych związków w korzeniach spichrzowych szparaga. Przy chłodnych zimach, w czasie kiedy roślina pozostaje w stanie uśpienia, stężenie cukrów zasadniczo się nie zmienia (Scott i in., 1939; Shelton i Lacy, 1980; Robb, 1984; Haynes, 1987; Martin i Hartmann, 1990).

Średnie stężenie cukrów wiosną przed rozpoczęciem zbiorów wypustek wynosiło $531 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m. (ryc. 25). Stężenie to nie zależało od odmiany i terminu kończenia zbiorów. Podobne stężenie cukrów ($450\text{--}550 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.) stwierdzili Wilson i in. (2008). W badaniach własnych w okresie plonowania stężenie cukrów zmniejszało się znacznie szybciej niż zimą ze względu na wyższą temperaturę powietrza oraz wyrastanie wypustek. W badaniach własnych stwierdzono, że po zakończeniu zbiorów wypustek stężenie cukrów było mniejsze o 29,6% niż jesienią.



Ryc. 25. Średnie stężenie cukrów w korzeniach szparaga w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03
Fig. 25. The mean carbohydrate content in asparagus roots in experiment D.1.02 and D.1.03

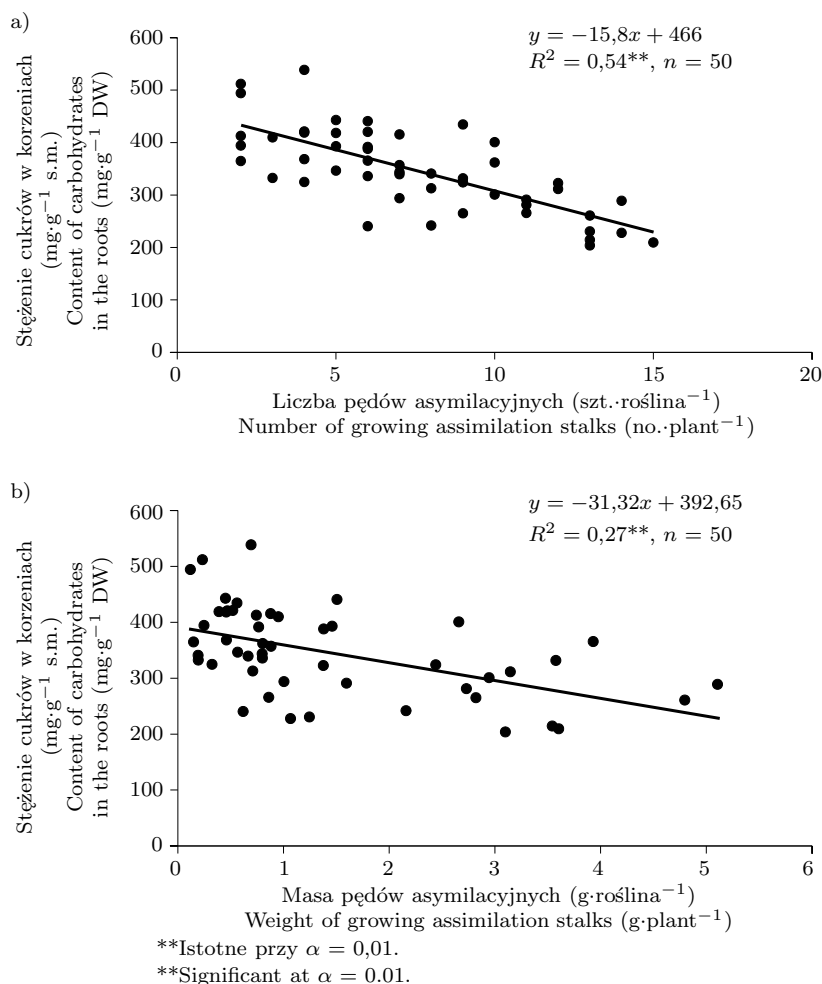
Średnie stężenie cukrów w korzeniach szparaga po zakończeniu zbiorów wynosiło $413 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m. (ryc. 25). Stwierdzono istotny wpływ odmiany i terminu kończenia zbiorów na stężenie cukrów w korzeniach po zakończeniu zbiorów. Największe stężenie cukrów w korzeniach w tym okresie odnotowano, gdy zbiory wypustek kończono 10 czerwca, a najniższe przy zbiorach do 30 czerwca (tab. 45 i 46). Biorąc pod uwagę wielkość plonu ogólnego zebranego do 10 czerwca (tab. 16)

oraz stężenie cukrów po zakończeniu zbiorów (tab. 45), należy stwierdzić, że przy zbiorach do 10 czerwca rośliny w niewielkim stopniu wykorzystywały cukry w okresie plonowania. Stężenie cukrów w korzeniach po zakończeniu zbiorów wypustek odmiany 'Backlim' było większe niż odmiany 'Gijnlim'. Najmniejsze stężenie cukrów w korzeniach wykazano u odmiany 'Thielim', gdy zbiory kończono 30 czerwca ($334 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.). Jest to stężenie nieco większe od tego, które podają Wilson i in. (2008). Autorzy ci stwierdzili, że po zakończeniu zbiorów w korzeniach szparaga jest około $300 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m. cukrów.

Uzyskane w badaniach własnych wyniki potwierdzają wcześniejsze doniesienia i wskazują, że w trakcie zbiorów obserwuje się spadek stężenia węglowodanów w korzeniach spichrzowych, gdyż są one zużywane na tworzenie wypustek (Shelton i Lacy, 1980; Taga i in., 1980; McGrady i Tilt, 1990) i nowych korzeni (Tiedjens, 1924). Na spadek stężenia fruktanów w tym okresie (wiosną) mogą mieć również wpływ takie czynniki środowiska, jak niska temperatura oraz susza, które powodują, że znaczna ilość substancji zapasowych wykorzystywana jest w procesie oddychania. W klimacie zarówno umiarkowanym, jak i subtropikalnym akumulacja cukrów w wypustkach szparaga jest uzależniona od temperatury, która stanowi także ważny czynnik wywierający wpływ zarówno na wielkość plonu, jak i jego jakość (Alam i in., 1998).

Po zakończeniu zbiorów stężenie cukrów malało przez okres 2–3 tygodni do około $204 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m. Stężenie cukrów w korzeniach szparaga w okresie wyrastania pędów asymilacyjnych (21 dni od zakończenia zbiorów) zależało od liczby i masy wyrastających pędów asymilacyjnych (ryc. 26). Im więcej wyrastało pędów asymilacyjnych oraz im większa była ich masa, tym mniejsze było stężenie cukrów w korzeniach. Stężenie cukrów zmniejszało się o $15,8 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m. na każdy pęd asymilacyjny oraz o $31,3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m. na każdy 1 kilogram świeżej masy pędów. Jak podają Wilson i in. (2008) stężenie cukrów w korzeniach szparaga w okresie wyrastania pędów asymilacyjnych spada do około $200 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m. W badaniach własnych najmniejsze stężenie cukrów w korzeniach było zbliżone do podawanego przez tych autorów i wynosiło $204 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m. Do analizy wykorzystano pomiary z roślin o masie karpki od 1,2 kg do 19,7 kg. Pomimo tego nie stwierdzono istotnej korelacji pomiędzy masą karpki a liczbą i masą wyrastających pędów asymilacyjnych, jak również pomiędzy całkowitą ilością cukrów w karpce a liczbą i masą wyrastających pędów. Prawdopodobnie wykorzystanie większej ilości cukrów mogło być ograniczone ilością pąków na kłęczu oraz możliwościami transportu cukrów z korzeni do wyrastających pędów.

Spadek stężenia cukrów w korzeniach w okresie wyrastania pędów asymilacyjnych przez pierwsze 2–4 tygodnie jest zgodny z doniesieniami zawartymi w niektórych publikacjach (Downton i Törökfalvy, 1975; McGrady i Tilt, 1990; Wilson i in., 2008). Od chwili, kiedy produkcja cukrów w pędach asymilacyjnych przekroczy ich zapotrzebowanie na cukry rozpoczyna się wzrost stężenia cukrów w korzeniach. W korzeniach wzrasta nie tylko stężenie cukrów, lecz również stopień ich polimeryzacji (Shelton i Lacy, 1980; Wilcox-Lee i Drost, 1991; Pressman i in., 1993). Shiomi (1992) wykazał, że w okresie aktywności fotosyntetycznej jako pierwsza magazynowana jest sacharoza, następnie tri- i tetrasacharydy, a po nich wyższe fruktooligosacharydy z dominującą 1-kestozą. Przemiany te nie zostały



Ryc. 26. Wpływ liczby (a) i masy (b) wyrastających pędów asymilacyjnych na stężenie cukrów w korzeniach w ciągu 21 dni od zakończenia zbiorów w doświadczeniu D.1.03 w roku 2005

Fig. 26. The influence of the number (a) and weight (b) of growing summer stalks on the content of carbohydrates in the roots within 21 days after the end of the harvest in experiment D.1.03 conducted in 2005

jednak uwzględnione w modelu opracowanym w niniejszej pracy. Shelton i Lacy (1980) stwierdzili, że po wyrośnięciu pędów asymilacyjnych w okresie dalszych trzech miesięcy, stężenie węglowodanów zapasowych w korzeniach spichrzowych wzrasta i zostaje przywrócona do poziomu sprzed zbioru wypustek. Poziom stężenia cukrów po zakończeniu okresu asymilacji zależy od warunków klimatycznych. Według Scotta (1954) wzrost nowych pąków i pędów asymilacyjnych w wysokich temperaturach jest ograniczony ze względu na duże natężenie oddychania. Wiązał on te wahania z tworzeniem nowych pędów asymilacyjnych, korzeni spichrzowych oraz pąków.

W karpach o dużej masie cukry produkowane w okresie asymilacji rozkładają się na silnie rozrośnięty system korzeniowy, powodując niewielki wzrost stężenia cukrów w pojedynczych korzeniach. Potwierdzają to liczne badania wykonane w ostatnich latach (Fiala i in., 1982; Pressman i in., 1989; Martin i Hartmann, 1990; Siomos i Pontikidou, 2000).

Wiek roślin ma również wpływ na zmiany stężenia węglowodanów w korzeniach spichrzowych szparaga (Fiala i Jolivet, 1979; Haynes, 1987; Dogras i Itskos, 1992). Młode rośliny wykazują znacznie większe zróżnicowanie pomiędzy zimowym (wysokim) a wiosennym (niskim) poziomem stężenia cukrów, niż to ma miejsce u roślin starszych (Fiala i Jolivet, 1979).

3.6.2. Ilość cukrów w korzeniach szparaga z jednostki powierzchni

Ilość cukrów w karpach szparaga z jednostki powierzchni zmieniała się w ciągu roku i zależała od odmiany i terminu kończenia zbiorów (ryc. 27). Najwięcej cukrów jesienią stwierdzono u odmiany 'Gijnlim', a najmniej u odmiany 'Backlim'. Wydłużenie zbiorów do 30 czerwca powodowało zmniejszenie ilości cukrów w korzeniach, a skrócenie okresu zbiorów ich zwiększenie. Różnice w ilości cukrów występujących w korzeniach jesienią wynikały przede wszystkim z wielkości karp, a nie ze stężenia cukrów. W okresie zimy ilość cukrów zmniejszała się ze względu na oddychanie bytowe (Haynes, 1987; Pressman i in., 1993; Guo, 2001). Przed zbiorami wypustek w karpach szparaga było od $3,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ cukrów u odmiany 'Backlim' przy kończeniu zbiorów 30 czerwca do $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ u odmiany 'Gijnlim', gdy zbiory kończono 10 czerwca. Wilson i in. (2008) podają, że ilość cukrów przed rozpoczęciem zbiorów wyniosła 4,4 do $8,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$.

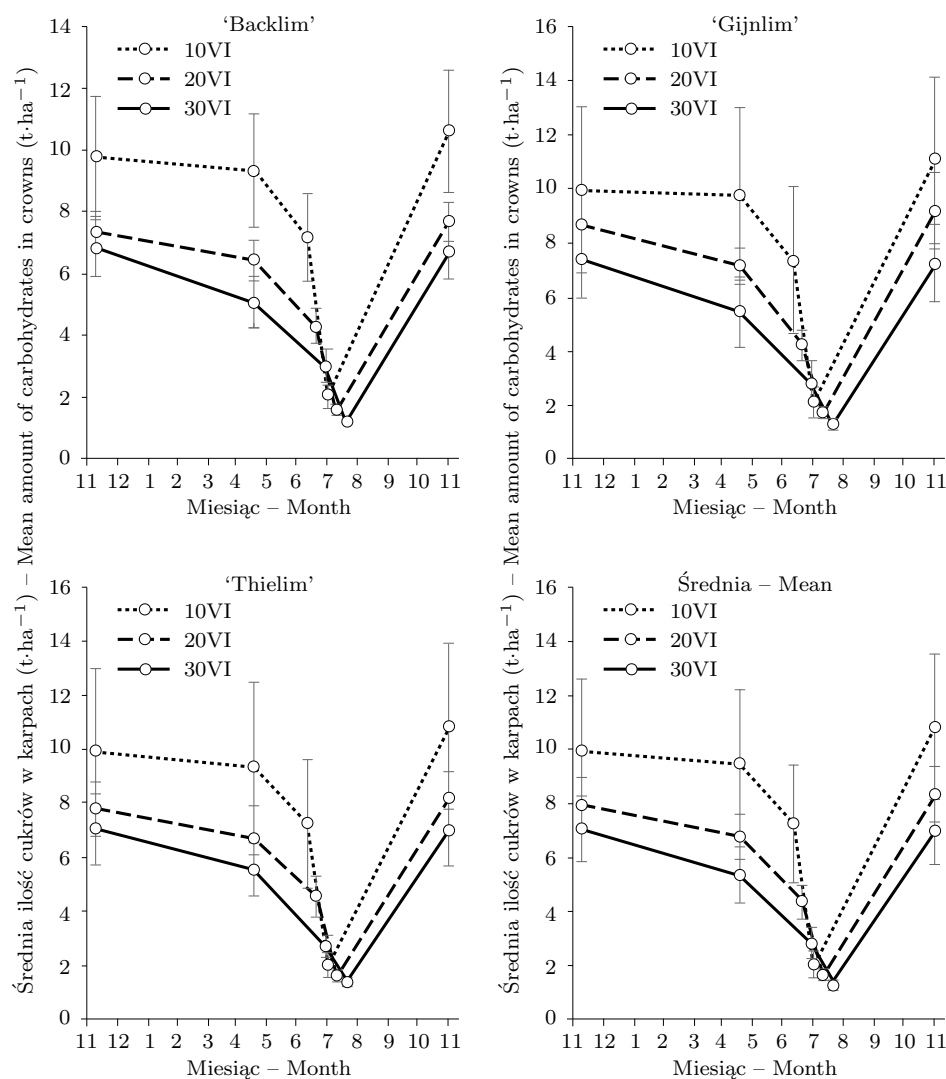
W badaniach własnych w okresie zbiorów wypustek oraz wyrastania pędów asymilacyjnych ilość cukrów szybko malała ze względu na oddychanie bytowe korzeni i wzrostowe wypustek i pędów asymilacyjnych (ryc. 27). Po zbiorach pozostało w karpach od $2,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ cukrów u odmiany 'Thielim' przy kończeniu zbiorów 30 czerwca do $7,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ u odmiany 'Gijnlim', gdy zbiory kończono 10 czerwca. W badaniach Wilsona i in. (2008) w analogicznym okresie pozostało $1,6\text{--}4,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ cukrów. Najmniej cukrów w badaniach własnych, bo tylko średnio $1,3\text{--}2,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, stwierdzono po około 3 tygodniach od zakończenia zbiorów.

Przy wcześniejszym kończeniu zbiorów wypustek było więcej cukrów i zbierano grubsze wypustki, co potwierdza wcześniejsze wyniki badań wskazujące, że duża ilość cukrów sprzyja z kolei wyrastaniu grubych wypustek (Robb, 1984).

3.6.3. Bilans cukrów

3.6.3.1. Produkcja cukrów

Ilość cukrów wytworzonych w okresie asymilacji zależała od terminu kończenia zbiorów i nie zależała od odmiany (tab. 47 i 48). Najwięcej cukrów zostało



Ryc. 27. Średnia ilość cukrów w karpach w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 w latach 2002–2010
 Fig. 27. The mean content of carbohydrates in asparagus crowns in experiments D.1.02 and D.1.03 conducted between 2002 and 2010

wyprodukowanych, gdy zbiory kończono 10 czerwca, a najmniej przy kończeniu zbiorów do 30 czerwca. Przy zbiorach trwających do 10 czerwca rośliny produkowały około dwa razy więcej cukrów, niż rośliny, z których zbiory prowadzono do 30 czerwca. Według Wilsona i in. (2008), potencjalna produkcja cukrów przez okres 60 dni wynosi 13,5 t·ha⁻¹, a całkowite zapotrzebowanie na cukry zależy od wielkości plonu i waha się od 11,7 do 13,7 t·ha⁻¹.

Dzienna maksymalna produkcja cukrów dochodziła do 47 g cukrów z 1 m² powierzchni pola. Średnia dzienna całkowita produkcja cukrów w okresie asymilacji

była znacznie niższa i wynosiła 13,3 g cukrów z 1 m². Cukry te były wykorzystywane do oddychania bytowego pędów asymilacyjnych i korzeni, jak również magazynowane w korzeniach. Guo (2001) podaje, że maksymalny eksport cukrów z gałęziaków dochodził do 581 mg m²·h⁻¹, co przy LAI = 2 i 12-godzinnym dniu pozwalało na wyeksportowanie około 12,9 g cukrów z 1 m² pola.

3.6.3.2. Zużycie cukrów na potrzeby oddychania wzrostowego

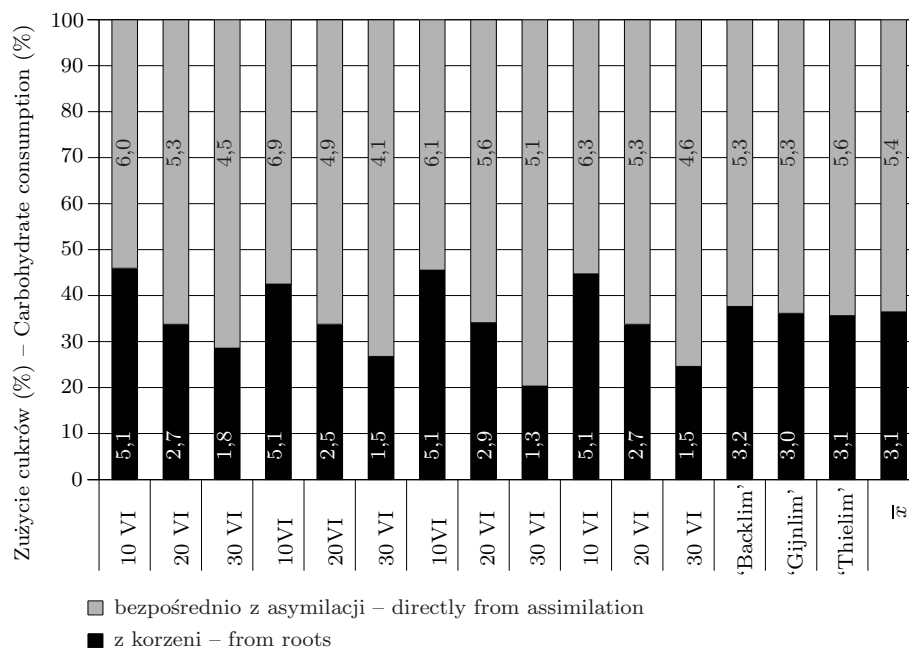
Oddychanie wzrostowe wypustek zależało od odmiany i terminu kończenia zbiorów (tab. 49). Oddychanie to u odmiany 'Gijnlim' było większe niż u odmiany 'Backlim'. U odmiany 'Gijnlim', stwierdzono większe oddychanie wzrostowe, gdy zbiory kończono 10 czerwca niż przy późniejszym kończeniu zbiorów. U odmiany 'Backlim' nie odnotowano wpływu terminu kończenia zbioru na ilość cukrów potrzebnych do oddychania wzrostowego, zaś u odmiany 'Thielim' oddychanie wzrostowe było większe przy tradycyjnym terminie zbiorów do 20 czerwca od oddychania przy przedłużonym terminie zbiorów do 30 czerwca. Cukry strukturalne stanowiły 79,4% wszystkich cukrów zużytych na oddychanie wzrostowe. W badaniach Wilsona i in. (2018) szparagi zużywały 2,3–2,7 t·ha⁻¹ cukrów do wytworzenia wypustek.

Stwierdzono, że całkowita ilość cukrów potrzebna do oddychania wzrostowego pędów asymilacyjnych zależała od terminu kończenia zbiorów wypustek, nie miała na nią wpływu natomiast odmiana szparaga (tab. 49–50). Najwięcej pędów asymilacyjnych oraz największa ich masa występowała, gdy zbiory kończono 10 czerwca. Do ich wytworzenia było potrzebnych również najwięcej cukrów, średnio od 11,07 t·ha⁻¹ u odmiany 'Backlim' do 12,01 t·ha⁻¹ u odmiany 'Gijnlim'. Im później kończono zbiory, tym rośliny tworzyły mniejszą masę pędów asymilacyjnych i tym mniej cukrów było potrzebnych do ich wytworzenia. Najmniej cukrów, bo tylko 5,6 t·ha⁻¹, potrzebnych było do wytworzenia pędów asymilacyjnych odmiany 'Gijnlim', gdy zbiory trwały do 30 czerwca. U odmiany 'Thielim', do wytworzenia pędów asymilacyjnych potrzebnych było 6,42 t·ha⁻¹ cukrów.

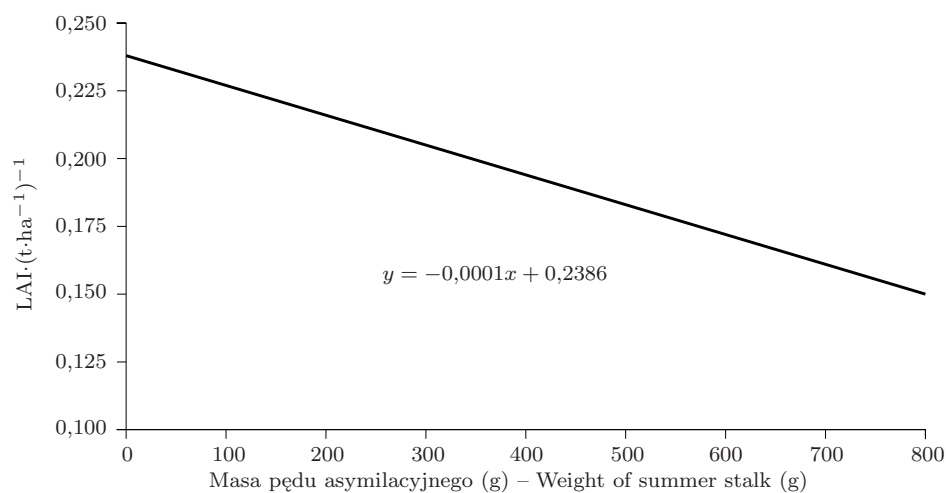
Cukry pozostałe w karpie po zakończeniu zbiorów zostały zużyte w dużej części na oddychanie wzrostowe pędów asymilacyjnych. Stwierdzono, że średnio do 35% wszystkich cukrów potrzebnych na pokrycie oddychania wzrostowego pędów asymilacyjnych mogło pochodzić z karpki (ryc. 28). Udział cukrów z karpki wykorzystanych do oddychania wzrostowego pędów asymilacyjnych nie zależał od odmiany, lecz od terminu kończenia zbiorów. Im później kończono zbiory tym mniej cukrów pochodzących z karpki mogło zostać wykorzystanych do oddychania wzrostowego pędów.

Cukry zużywane na potrzeby oddychania wzrostowego w 79,4% stanowiły cukry strukturalne, czyli takie, z których węgiel był wbudowywany w suchą masę pędów asymilacyjnych. Pozostałe cukry (20,6%) stanowiły źródło energii dla wzrostu.

Ilość cukrów potrzebna do wytworzenia pędów asymilacyjnych w badaniach własnych była większa, niż podają Wilson i in. (2008), którzy stwierdzili, że potrzeba około 6 t·ha⁻¹ cukrów do wytworzenia pędów asymilacyjnych, przy czym 0,5–1,3 t·ha⁻¹ (8,3–21,7%) potrzebnych cukrów do wzrostu pędów asymilacyjnych



Ryc. 28. Zużycie cukrów na potrzeby oddychania wzrostowego pędów asymilacyjnych ($t \cdot ha^{-1}$) w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 w latach 2002–2010
 Fig. 28. The consumption of carbohydrates for the growth respiration of summer stalks ($t \cdot ha^{-1}$) in experiments D.1.02 and D.1.03 conducted between 2002 and 2010



Ryc. 29. Wpływ masy pojedynczego pędu asymilacyjnego na indeks powierzchni liści (LAI) wytworzony z 1 tony cukrów na 1 ha w doświadczeniach D.1.02 i D.2.03
 Fig. 29. The influence of the weight of an individual summer stalk on the leaf area index (LAI) generated from 1 tonne of carbohydrates per 1 ha in experiments D.1.02 and D.2.03

pochodziło z karp szparaga. Cukry te nie zostały wykorzystane w okresie zbiorów i posłużyły do rozpoczęcia wzrostu pędów asymilacyjnych.

Ilość cukrów potrzebnych do oddychania wzrostowego korzeni zależała od odmiany i terminu kończenia zbiorów (tab. 49 i 50). Najmniej cukrów do oddychania wzrostowego korzeni potrzeba było u odmiany 'Thielim', a najwięcej u odmiany 'Gijnlim'. Im wcześniej kończony był zbiór, tym więcej rośliny zużywały cukrów na oddychanie wzrostowe korzeni. Najmniej cukrów na oddychanie wzrostowe korzeni było wykorzystywanych, gdy zbiory kończono 30 czerwca ($0,05 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ u odmiany 'Backlim'), a najwięcej przy kończeniu zbiorów 10 czerwca ($1,48 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ u odmiany 'Gijnlim'). Wyniki uzyskane w badaniach własnych potwierdzają doniesienia Wilsona i in. (2008).

3.6.3.3. Zużycie cukrów na potrzeby oddychania bytowego

Ilość cukrów zużywanych w okresie zimy na potrzeby oddychania bytowego zależała od odmiany i terminu kończenia zbiorów (tab. 51 i 52). Rośliny odmiany 'Gijnlim' zużywały więcej cukrów niż rośliny odmiany 'Backlim'. U odmian 'Backlim' i 'Thielim' ilość cukrów zużywana w oddychaniu bytowym nie zależała od terminu kończenia zbiorów. U odmiany 'Gijnlim' wykazano, że w okresie zimy rośliny zużywały mniej cukrów, gdy zbiory kończono 10 czerwca. Głównym czynnikiem wpływającym na ilość zużywanych cukrów w okresie zimy jest temperatura, która ma duży wpływ na poziom oddychania bytowego (Haynes, 1987; Pressman i in., 1993; Guo, 2001).

Nie stwierdzono wpływu odmiany i terminu kończenia zbiorów na zużycie cukrów na potrzeby oddychania bytowego korzeni szparaga w okresie zbiorów wypustek (tab. 51 i 52). Uzyskane wyniki potwierdzają doniesienia Wilsona i in. (2008). Autorzy ci podają, że na potrzeby oddychania bytowego korzeni w okresie plonowania szparaga zużywanych jest $0,5\text{--}1,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów. Marcelis i in. (1998) podkreślają, że wyznaczenie ilości cukrów zużywanych na potrzeby oddychania bytowego to trudne zadanie. W przypadku szparaga w okresie zbiorów wypustek jest to stosunkowo proste, gdyż ilość ta może być stosunkowo łatwo wyznaczona z bilansu cukrów (Wilson i in., 2008). W badaniach własnych ilość cukrów zużywanych na potrzeby oddychania bytowego korzeni w okresie zbiorów wypustek została obliczona na podstawie równań prezentowanych na rycinie 23 i wynosiła $1,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Natomiast ilość cukrów wyznaczana z bilansu cukrów wynosiła $1,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, co potwierdza prawidłowość przyjętej metody obliczania ilości cukrów zużywanych na potrzeby oddychania bytowego korzeni. Dzięki temu wyznaczono ilości cukrów na potrzeby oddychania bytowego korzeni w okresie asymilacji, co nie było możliwe z bilansu cukrów w tym okresie.

W okresie asymilacji pędy asymilacyjne zużywały cukry w procesie oddychania bytowego (tab. 51 i 52). Stwierdzono, że na ilość cukrów w całym okresie asymilacji miał wpływ termin kończenia zbiorów, od którego jednocześnie zależała długość okresu asymilacji. Im dłuższy był ten okres, tym więcej cukrów zużywano. Przy kończeniu zbiorów 10 czerwca pędy asymilacyjne zużywały od $2,17 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ u odmiany 'Backlim' do $2,34 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ u odmiany 'Gijnlim'. Najmniej cukrów zostało zużytych na oddychanie, gdy zbiory kończono 30 czerwca. W literaturze brak jest

doniesień na temat ilości cukrów zużywanych w procesie oddychania przez pędy asymilacyjne.

3.6.3.4. Zestawienie cukrów produkowanych i zużywanych

W doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 rośliny szparaga produkowały i zużywały średnio w ciągu roku $16,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów (tab. 53). Stwierdzono niewielkie różnice w ilości cukrów produkowanych i zużywanych na potrzeby oddychania bytowego i wzrostowego dla poszczególnych odmian i terminów kończenia zbiorów. Wynikały one z przyjętych metod ich wyznaczania, w których ilość cukrów produkowanych i zużywanych były wyznaczane niezależnie od siebie. Ilość produkowanych cukrów obliczono z ilości światła absorbowanego z uwzględnieniem temperatury i żółknięcia pędów, natomiast ilość cukrów zużywanych na podstawie oddychania wzrostowego i bytowego. W oddychaniu wzrostowym uwzględniono ilość cukrów wykorzystanych dla przyrostu masy wypustek, korzeni i pędów asymilacyjnych, natomiast ilość cukrów zużywana na potrzeby oddychania bytowego została wyznaczona na podstawie masy organów i temperatury. Wysoce istotny współczynnik korelacji pomiędzy ilością cukrów produkowanych i zużywanych (0,99) oraz zgodność z danymi literaturowymi (Wilson in., 2008) świadczą, że metody przyjęte w ramach badań własnych były prawidłowe. Dotychczas w literaturze tylko jeden artykuł dotyczył bilansu cukrów w okresie wzrostu i plonowania szparaga (Wilson i in., 2008). Bilans cukrów opracowany w ramach badań własnych jest jednak bardziej szczegółowy, gdyż uwzględnia oddychanie bytowe korzeni i pędów asymilacyjnych nie tylko w okresie zimy i zbiorów wypustek, lecz również w okresie asymilacji, czego zabrakło w bilansie opracowanym u powyższych autorów. Ponadto Wilson i in. (2008) część obliczeń oparli na założeniach nie potwierdzonych wynikami badań, lecz na podstawie swojej wiedzy i doświadczenia na temat uprawy szparaga.

Stwierdzono wpływ terminu kończenia zbiorów wypustek na ilość cukrów produkowanych i zużywanych, w tym na zużycie cukrów na potrzeby oddychania bytowego i wzrostowego, jak również zużycie cukrów w okresie asymilacji i spoczynku, a także całkowite zużycie cukrów przez pędy asymilacyjne i korzenie (tab. 53, 54 i 55). Im krócej zbierano wypustki, tym więcej cukrów było produkowanych i zużywanych z wyjątkiem samego okresu zbiorów, w którym ilość zużywanych cukrów na potrzeby oddychania wzrostowego wypustek i oddychania bytowego korzeni była podobna (tab. 55). Różnice pomiędzy odmianami w ilości cukrów produkowanych i zużywanych były stosunkowo niewielkie. Najwięcej cukrów było zużywanych w okresie asymilacji, średnio $13,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, a najmniej w okresie spoczynku zimowego $0,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (tab. 53). W okresie zbiorów wypustek rośliny zużywały średnio $2,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów. W ciągu całego roku na potrzeby oddychania bytowego zużywanych było średnio $5,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów i $10,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów na potrzeby oddychania wzrostowego. Najwięcej cukrów zużywanych było przez pędy asymilacyjne, średnio $9,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, a najmniej przez wypustki szparaga ($1,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$). Korzenie roślin szparaga zużywały średnio w ciągu roku $5,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów. Z średnio $16,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ produkowanych cukrów, średnio $8,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ było magazynowane w korzeniach szparaga, a reszta produkowanych cukrów zużywana było bezpośrednio w okresie asymilacji.

Na podstawie bilansu cukrów obliczono procent zużywanych cukrów na potrzeby oddychania bytowego i wzrostowego w poszczególnych okresach w ciągu roku (tab. 54). Stwierdzono, że od terminu kończenia zbiorów zależał procent zużywanych cukrów w okresie spoczynku i zbiorów wypustek oraz procent cukrów magazynowanych w korzeniach (tab. 55). Im dłużej trwał okres zbiorów, tym większy odsetek wyprodukowanych cukrów był magazynowany w korzeniach, a następnie zużywany zarówno na potrzeby oddychania bytowego korzeni w okresie spoczynku i zbiorów wypustek, jak i oddychania wzrostowego wypustek. Procent cukrów zużywanych na potrzeby oddychania bytowego i wzrostowego oraz procent cukrów zużywanych przez pędy asymilacyjne oraz korzenie nie zależały od terminu kończenia zbiorów. Im dłużej prowadzono zbiory wypustek, tym mniejszy odsetek cukrów zużywany był w okresie asymilacji na potrzeby oddychania wzrostowego korzeni i pędów asymilacyjnych. Średnio 4,8% cukrów zużywanych było w okresie spoczynku, 13,6% w okresie zbiorów i 81,6% w okresie asymilacji (tab. 54). Na potrzeby oddychania bytowego rośliny zużywały średnio 36,4% produkowanych cukrów, a resztę do oddychania wzrostowego (63,6). Średnio 54,2% produkowanych cukrów było magazynowanych w korzeniach, a 45,8% zużyto bezpośrednio w okresie asymilacji.

W sumie do korzeni było eksportowanych 75% cukrów z $16,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ produkowanych, w tym średnio $2,6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ do oddychania bytowego, $0,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ na potrzeby oddychania wzrostowego nowych korzeni i $8,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów było zmagazynowanych w korzeniach. Procent eksportowanych cukrów do korzeni zależał od odmiany i nie zależał od terminu kończenia zbiorów. Najwięcej cukrów eksportowanych było do korzeni odmiany 'Gijnlim' (średnio 78%), a mniej u odmian 'Backlim' i 'Thielim' (73%). Potwierdza to doniesienia Guo i in. (2002a), którzy podają, że średnio 74% asymilowanego węgla było eksportowanych do korzeni.

3.7. Podsumowanie

Wydłużenie okresu zbiorów do 30 czerwca zwiększyło wielkość plonu ogólnego w pierwszych trzech latach zbiorów wypustek. W kolejnych latach zbierany plon był coraz mniejszy, gdyż dłuższy okres zbiorów wiązał się ze skróceniem okresu asymilacji, co doprowadziło do osłabienia roślin w porównaniu z tradycyjnych i skróconym okresem zbiorów. Osłabione rośliny miały mniejsze pędy asymilacyjne i produkowały mniej cukrów niż rośliny, u których zbiór był skrócony. Pomimo wydłużenia okresu asymilacji, zwiększona produkcja cukrów w niewielkim stopniu przełożyła się na średnią wielkość plonu ogólnego ze wszystkich lat zbiorów. Przy kończeniu zbioru 10 czerwca i wydłużeniu okresu asymilacji o 20 dni produkcja cukrów zwiększyła się o 91%, natomiast wielkość plonu ogólnego była większa średnio o 9,7%. Krótszy okres asymilacji, przy zbiorach do 30 czerwca, był przez rośliny szparaga kompensowany między innymi poprzez zmianę pokroju pędów asymilacyjnych umożliwiającą lepsze wykorzystanie światła, bardziej efektywne wykorzystanie produkowanych cukrów do wzrostu nowych organów i mniej-

sze zużycie cukrów na potrzeby oddychania bytowe związane z podtrzymaniem życia już istniejących organów rośliny.

Rośliny, u których zbiory kończono 30 czerwca, tworzyły pędy asymilacyjne o mniejszej średnicy, wysokości i masie, ale z większym udziałem pędów z gałęziakami oraz większą powierzchnią gałęziaków (SLA). Zwiększyło to powierzchnię asymilacyjną w przeliczeniu na ilość zużytych cukrów potrzebnych do ich wytworzenia. Rośliny te nie zużywały cukrów na wytworzenie pędów asymilacyjnych o grubych łodygach, dzięki czemu z jednej strony ograniczały oddychanie bytowe tych pędów, a z drugiej strony mogły przeznaczyć więcej pozostałych cukrów na wzrost gałęziaków, które mają największe znaczenie dla asymilacji CO₂ i produkcji cukrów (Sawada i in., 1962; Inagaki i in., 1989). Przy zbiorach do 10 czerwca rośliny szparaga zużywały o 88% więcej cukrów na wytworzenie pędów asymilacyjnych niż rośliny, u których zbiory trwały do 30 czerwca. Pomimo tego, rośliny te absorbowwały tylko o 42% więcej światła. Procent absorbowanego światła w przeliczeniu na ilości cukrów wykorzystanych do wytworzenia pędów asymilacyjnych, był większy u roślin, u których zbiór wypustek przedłużono do 30 czerwca, niż u roślin, u których zbiory kończyły się 10 czerwca (tab. 56). Na podstawie analizy regresji wykazano, że wydłużenie okresu zbiorów o 1 dzień zwiększało o 0,11% ilość absorbowanego światła w przeliczeniu na masę cukrów wymaganych do wytworzenia pędów asymilacyjnych. Świadczy to o większej efektywności wykorzystania cukrów do tworzenia pędów asymilacyjnych u roślin mniejszych i słabszych, u których po zakończeniu zbiorów pozostało stosunkowo niewiele dostępnych cukrów. Nieco mniejszy LAI u roślin, u których zbiory trwały do 30 czerwca, z jednej strony powodował mniejszą absorpcję światła, ale z drugiej zwiększał ilość światła wewnątrz lanu roślin, przez co nawet gałęziaki w dolnej części pędów miały stosunkowo dużo światła w porównaniu do roślin, u których pędy asymilacyjne były silnie zagęszczone. Dzięki temu gałęziaki w dolnej części rośliny mogły asymilować więcej CO₂ niż podobnie położone gałęziaki u roślin z dużą liczbą pędów asymilacyjnych. Powyższe mechanizmy umożliwiły skompensowanie w pewnym stopniu skutków krótszego okresu asymilacji i mniejszego LAI. Ilość produkowanych cukrów w okresie asymilacji była mniejsza o 47,9% przy zbiorach do 30 czerwca niż przy zbiorach do 10 czerwca. Przy zbiorach wypustek do 30 czerwca rośliny produkowały 11,2 t·ha⁻¹ cukrów, gdy tymczasem przy skróconym okresie zbiorów 21,5 t·ha⁻¹ cukrów. Z tych cukrów tylko część została zmagazynowana w karpie szparaga i tutaj pojawia się następny mechanizm kompensujący krótszy okres asymilacji. Przy zbiorach do 10 czerwca zmagazynowane było średnio 10,8 t·ha⁻¹ cukrów, natomiast przy wydłużonym okresie zbiorów 7,0 t·ha⁻¹, co stanowi odpowiednio 50,7% i 59,9% wszystkich wyprodukowanych cukrów. Wynika to z większego zapotrzebowania na cukry w okresie asymilacji roślin. Rośliny przy krótkim okresie zbiorów do 10 czerwca miały większe zapotrzebowanie na cukry do wzrostu pędów asymilacyjnych i nowych korzeni, a jednocześnie zużywały więcej cukrów na oddychanie bytowe ze względu na większą wytworzoną masę korzeni i pędów (tab. 53). Dodatkowo część z tych cukrów została zużyta na potrzeby oddychania bytowego w spoczynku od jesieni do rozpoczęcia zbiorów na wiosnę. Wilson i in. (2008) podają, że na początku zbiorów rośliny miały od 4,4 do 8,1 t·ha⁻¹ cukrów.

Wpływ odmiany i terminu kończenia zbiorów na wielkość plonu ogólnego wynikał z różnej ilości cukrów zgromadzonych w korzeniach szparaga oraz różnej sumy temperatury w okresie zbiorów. Cukry zgromadzone w karpach zużywane były w okresie zbiorów wypustek na potrzeby oddychania bytowego i wzrostowego. W okresie zbiorów rośliny wykorzystywały średnio 13,6% wszystkich wyprodukowanych cukrów (tab. 54). Zużycie cukrów w tym okresie było zbliżone we wszystkich kombinacjach. Przy zbiorze do 10 czerwca rośliny zużywały $2,25 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów, a przy wydłużonym okresie do 30 czerwca $2,11 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Analiza regresji wykazała, że efektywność wykorzystania cukrów do wzrostu wypustek (CUE), czyli masa wypustek wytworzona z $1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów, nie zależała od terminu kończenia zbioru (tab. 56). Oznacza to, że wielkość zbieranego plonu wynosiła $4,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ na każdą $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ zużywanych cukrów, niezależnie od tego, czy karpy były duże, czy małe oraz czy ilość cukrów w karpach była większa, czy mniejsza. Współczynnik ten zależał w niewielkim stopniu od odmiany. U odmiany 'Gijnlim' CUE był wyższy niż u odmian 'Backlim' i 'Thielim' i wynosił średnio $5,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ wypustek na $1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów. Również Wilson i in. (2008) stwierdzili podobną zależność i wykazali, że w okresie zbiorów wypustek potrzeba $2,8\text{--}3,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów, przy plonie ogólnym $16,0\text{--}19,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Odpowiada to $5\text{--}5,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ wypustek z $1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ cukrów.

W okresie zbiorów tempo wyrastania wypustek zależało od odmiany i terminu kończenia zbiorów. Im wcześniej kończono zbiory wypustek, tym więcej było cukrów i tym szybciej wyrastały wypustki, przez co zbierano większy plon ogólny w przeliczeniu na sumę temperatury. Wykazano, że przy kończeniu zbiorów 10 czerwca plon ogólny wynosił $5,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 100^\circ\text{Cd}^{-1}$, natomiast przy zbiorach do 30 czerwca tylko $2,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 100^\circ\text{Cd}^{-1}$ (tab. 56). U odmiany 'Gijnlim' średni plon ogólny w przeliczeniu na sumę temperatury był największy i wynosił $4,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 100^\circ\text{Cd}^{-1}$, a u odmiany 'Backlim' najmniejszy – $3,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 100^\circ\text{Cd}^{-1}$. Wydłużenie okresu zbiorów o 1 dzień powodowało zmniejszenie plonu o $0,12 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 100^\circ\text{Cd}^{-1}$. Stwierdzono, że tempo uwalniania cukrów było ściśle skorelowane z ilością cukrów w karpach przed rozpoczęciem okresu zbiorów i wynosiło średnio 11% cukrów zgromadzonych w korzeniach spichrzowych szparaga na każde 100°Cd , niezależnie od terminu kończenia zbiorów (tab. 56). Tempo uwalniania cukrów było prawdopodobnie związane z wczesnością odmiany. U odmiany wczesnej 'Gijnlim' uwalnianych było najwięcej cukrów (11,6% cukrów przed zbiorem na 100°Cd^{-1}), a najmniej u odmiany późnej 'Backlim' (10,5% cukrów przed zbiorem na 100°Cd^{-1}).

TABELE DO ROZDZIAŁU 3

Tabela 8. Warunki środowiskowe w pierwszych latach po posadzeniu bez zbiorów w doświadczeniu D.1.01

Table 8. Environmental conditions in the first years after planting without harvest in experiment D.1.01

Parametr Parameter	Rok sadzenia Planting years			Lata asymilacji bez zbiorów Assimilation years without harvest			
	1994	1995	1996	1995	1996	1997	1998
Liczba dni Number of days	54	62	52	174	163	167	184
Suma temperatury (°Cd)* Total temperature (°Cd)*	325	188	370	1 034	754	957	857
Opady (mm) Rainfall (mm)	77	152	71	304	444	464	366
Radiacja (MJ·m ⁻²) Radiation (MJ·m ⁻²)	1 099	1 101	1 098	2 777	2 380	2 710	2 730

*Powyżej 10°C.

*Above 10°C.

Tabela 9. Warunki środowiska w latach zbiorów w doświadczeniu D.1.01

Table 9. Environmental conditions in the harvest years in experiment D.1.01

Parametr Parameter	Rok – Year							Średnia Mean
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	
Okres zbiorów – Harvest period								
Liczba dni Number of days	54	62	52	48	49	49	52	52
Suma temperatury (°Cd)* Total temperature (°Cd)*	325	188	370	210	307	363	297	297
Opady (mm) Rainfall (mm)	77	152	71	36	94	36	78	78
Radiacja (MJ·m ⁻²) Radiation (MJ·m ⁻²)	1 099	1 101	1 098	879	916	1 045	1 023	1 023
Okres asymilacji – Assimilation period								
Liczba dni Number of days	121	125	140	127	118	115	126	125
Suma temperatury (°Cd) Total temperature (°Cd)	585	866	699	765	930	796	771	769
Opady (mm) Rainfall (mm)	246	215	213	382	184	190	248	240
Radiacja (MJ·m ⁻²) Radiation (MJ·m ⁻²)	1 663	1 871	1 702	1 718	1 808	1 688	1 752	1 743

*Powyżej 10°C.

*Above 10°C.

Tabela 10. Plon ogólny pięciu odmian szparaga sadzonych w trzech kolejnych latach w doświadczeniu D.1.01 (t·ha⁻¹)Table 10. The total yield of five asparagus cultivars planted in three subsequent years in experiment D.1.01 (t·ha⁻¹)

Rok zbiorów Harvest year (A)	Odmiana Cultivar (B)	Rok sadzenia (C) – Planting year (C)			Średnia Mean		
		1994	1995	1996	A × B		
		A × B × C					
2	Andreas	4,20	4,60	4,14	4,31		
	Gijnlim	7,56	2,83	4,61	5,00		
	J. Giant	4,11	1,25	2,33	2,56		
	Thielim	9,03	3,05	3,83	5,30		
	Vulkan	4,11	1,99	3,17	3,09		
3	Andreas	2,07	6,38	2,67	3,71		
	Gijnlim	7,56	5,36	2,02	4,98		
	J. Giant	1,85	1,80	2,97	2,21		
	Thielim	6,43	4,45	3,30	4,73		
	Vulkan	5,22	3,75	2,76	3,91		
4	Andreas	2,62	2,90	7,05	4,19		
	Gijnlim	8,71	2,85	14,23	8,59		
	J. Giant	2,58	3,20	5,80	3,86		
	Thielim	6,68	3,14	9,32	6,38		
	Vulkan	5,74	2,89	6,60	5,07		
5	Andreas	2,21	11,78	3,80	5,93		
	Gijnlim	1,89	13,98	7,83	7,90		
	J. Giant	2,68	4,25	3,26	3,40		
	Thielim	3,34	10,49	5,17	6,33		
	Vulkan	4,87	9,20	4,16	6,08		
A		A × C			A		
2		5,80	2,74	3,62	4,05		
3		4,63	4,35	2,74	3,91		
4		5,26	2,99	8,60	5,62		
5		3,00	9,94	4,85	5,93		
B		B × C			B		
Andreas		2,77	6,41	4,42	4,53		
Gijnlim		6,43	6,26	7,17	6,62		
J. Giant		2,81	2,63	3,59	3,01		
Thielim		6,37	5,28	5,41	5,69		
Vulkan		4,98	4,46	4,17	4,54		
Średnia dla C Mean for C		4,67	5,01	4,95			
ANOVA	A	B	A × B	C	A × C	B × C	A × B × C
PWZ – PEV	7,7	13,9	2,9	0,2	38,0	5,2	11,9
F _{emp}	22,9**	31,2**	2,1*	0,9	56,7**	5,9**	4,5**
NIR _{α=0,05} – LSD _{α=0,05}	0,611	0,683	1,365	n.i. - n.s.	1,058	1,182	2,365

PWZ – procent wyjaśnionej zmienności.

NIR_{α=0,05} – najmniejsza istotna różnica przy α = 0,05.

*Istotne przy α = 0,05.

**Istotne przy α = 0,01.

n.i. – nieistotne.

PEV – percentage of explained variation.

LSD_{α=0,05} – least significant difference at α = 0.05.

*Significant at α = 0.05.

**Significant at α = 0.01.

n.s. – insignificant.

Tabela 11. Plon handlowy pięciu odmian szparaga sadzonych w trzech kolejnych latach w doświadczeniu D.1.01 (t·ha⁻¹)Table 11. The marketable yield of five asparagus cultivars planted in three subsequent years in experiment D.1.01 (t·ha⁻¹)

Rok zbiorów Harvest year (A)	Odmiana Cultivar (B)	Rok sadzenia (C) – Planting year (C)			Średnia Mean A × B		
		1994	1995	1996			
		A × B × C					
2	Andreas	3,11	3,48	2,57	3,05		
	Gijnlim	5,89	2,20	3,19	3,76		
	J. Giant	3,06	0,83	1,55	1,81		
	Thielim	7,09	2,25	2,48	3,94		
	Vulkan	3,00	1,44	1,77	2,07		
3	Andreas	1,46	4,73	2,19	2,79		
	Gijnlim	5,64	4,04	1,63	3,77		
	J. Giant	1,23	1,28	2,49	1,67		
	Thielim	4,90	3,21	2,79	3,64		
	Vulkan	3,41	2,61	2,36	2,79		
4	Andreas	1,88	2,27	5,18	3,11		
	Gijnlim	6,71	2,28	11,64	6,88		
	J. Giant	1,64	2,50	4,52	2,89		
	Thielim	5,13	2,53	7,11	4,92		
	Vulkan	3,94	2,40	4,51	3,62		
5	Andreas	1,59	8,83	2,36	4,26		
	Gijnlim	1,25	11,61	6,19	6,35		
	J. Giant	1,97	3,13	2,50	2,53		
	Thielim	2,45	8,45	3,61	4,84		
	Vulkan	3,82	6,74	2,78	4,45		
A		A × C			A		
2		4,43	2,04	2,31	2,93		
3		3,33	3,17	2,29	2,93		
4		3,86	2,40	6,59	4,28		
5		2,22	7,75	3,49	4,49		
B		B × C			B		
Andreas		2,01	4,83	3,08	3,30		
Gijnlim		4,87	5,03	5,66	5,19		
J. Giant		1,97	1,94	2,77	2,23		
Thielim		4,89	4,11	4,00	4,33		
Vulkan		3,54	3,30	2,86	3,23		
Średnia dla C Mean for C		3,46	3,84	3,67			
ANOVA	A	B	A × B	C	A × C	B × C	A × B × C
PWZ – PEV	7,6	14,7	3	0,3	35,1	4,9	13,4
F _{emp}	21,8**	31,6**	2,2*	1,5	50,4**	5,3**	4,8**
NIR _{α=0,05} – LSD _{α=0,05}	0,506	0,566	1,132	n.i. - n.s.	0,877	0,98	1,96

PWZ – procent wyjaśnionej zmienności.

NIR_{α=0,05} – najmniejsza istotna różnica przy α = 0,05.

*Istotne przy α = 0,05.

**Istotne przy α = 0,01.

n.i. – nieistotne.

PEV – percentage of explained variation.

LSD_{α=0,05} – least significant difference at α = 0.05.

*Significant at α = 0.05.

**Significant at α = 0.01.

n.s. – insignificant.

Tabela 12. Liczba wypustek w plonie ogólnym pięciu odmian szparaga sadzonych w trzech kolejnych latach w doświadczeniu D.1.01 (tys. szt.·ha⁻¹)Table 12. The number of spears in the total yield of five asparagus cultivars planted in three subsequent years in experiment D.1.01 (thousand pcs.·ha⁻¹)

Rok zbiorów Harvest year (A)	Odmiana Cultivar (B)	Rok sadzenia (C) – Planting year (C)			Średnia Mean A × B			
		1994	1995	1996				
		A × B × C						
2	Andreas	224	177	264	222			
	Gijnlim	371	156	288	272			
	J. Giant	193	99	209	167			
	Thielim	375	150	222	249			
	Vulkan	221	125	236	194			
3	Andreas	123	327	145	199			
	Gijnlim	491	379	134	335			
	J. Giant	167	153	147	156			
	Thielim	318	303	156	259			
4	Vulkan	349	263	128	247			
	Andreas	192	166	308	222			
	Gijnlim	727	167	618	504			
	J. Giant	278	161	326	255			
5	Thielim	467	182	386	345			
	Vulkan	483	166	347	332			
	Andreas	175	435	186	265			
	Gijnlim	152	716	382	417			
	J. Giant	178	271	204	217			
	Thielim	242	456	243	314			
	Vulkan	335	466	234	345			
A		A × C			A			
2		277	142	244	221			
3		290	285	142	239			
4		430	169	397	332			
5		216	469	250	312			
B		B × C			B			
	Andreas	179	276	226	227			
	Gijnlim	435	355	355	382			
	J. Giant	204	171	222	199			
	Thielim	351	273	252	292			
	Vulkan	347	255	236	280			
Średnia dla C Mean for C		303	266	258				
ANOVA		A	B	A × B	C	A × C	B × C	A × B × C
PWZ – PEV		8,8	15,9	3,4	1,5	32,6	4,6	12,3
F _{emp}		25,3**	34,1**	2,4**	6,6**	46,7**	4,9**	4,4**
NIR _{α=0,05} – LSD _{α=0,05}		30,2	33,7	67,5	26,1	52,3	58,4	116,9

PWZ – procent wyjaśnionej zmienności.

NIR_{α=0,05} – najmniejsza istotna różnica przy $\alpha = 0,05$.*Istotne przy $\alpha = 0,05$.**Istotne przy $\alpha = 0,01$.

n.i. – nieistotne.

PEV – percentage of explained variation.

LSD_{α=0,05} – least significant difference at $\alpha = 0,05$.*Significant at $\alpha = 0,05$.**Significant at $\alpha = 0,01$.

n.s. – insignificant.

Tabela 13. Współczynniki korelacji pomiędzy warunkami klimatycznymi a plonem ogólnym i liczbą wypustek w plonie ogólnym w doświadczeniu D.1.01

Table 13. The coefficients of correlation between climate conditions and the total yield and the number spears in the total yield in experiment D.1.01

Parametr Parameter	Plon (t·ha ⁻¹) Yield (t·ha ⁻¹)	Liczba wypustek Number of spears
Okres asymilacji od sadzenia do pierwszego zbioru Assimilation period from planting to first harvest		
Liczba dni Number of days	0,20	0,36**
Suma temperatury (°Cd) Total temperature (°Cd)	0,19	0,35**
Opady (mm) Rainfall (mm)	0,20	0,35**
Promieniowanie słoneczne (MJ·m ⁻¹) Solar radiation (MJ·m ⁻¹)	0,20	0,36**
Zbiór wstępny (t·ha ⁻¹) Preliminary harvest (t·ha ⁻¹)	-0,15	-0,29*
Okres asymilacji w roku poprzedzającym zbiory Assimilation period in year before harvest		
Liczba dni Number of days	-0,33**	-0,41**
Suma temperatury (°Cd) Total temperature (°Cd)	-0,24*	-0,30**
Opady (mm) Rainfall (mm)	0,22*	0,07
Promieniowanie słoneczne (MJ·m ⁻¹) Solar radiation (MJ·m ⁻¹)	-0,27*	-0,32**
Okres plonowania Harvest period		
Liczba dni Number of days	-0,32**	-0,31**
Suma temperatury (°Cd) Total temperature (°Cd)	0,10	0,15
Opady (mm) Rainfall (mm)	-0,01	-0,05
Promieniowanie słoneczne (MJ·m ⁻¹) Solar radiation (MJ·m ⁻¹)	-0,26*	-0,19
Plonowanie w następnym roku Yielding in next year		
Plon (t·ha ⁻¹) Yield (t·ha ⁻¹)	0,16	0,13
Liczba wypustek Number of spears	0,22*	0,24
Względny plon (%) Relative yield (%)	-0,46**	-0,44**
Względna liczba wypustek (%) Relative number of spears (%)	-0,51**	-0,52**

*Istotne przy $\alpha = 0,05$.**Istotne przy $\alpha = 0,01$.*Significant at $\alpha = 0.05$.**Significant at $\alpha = 0.01$.

Tabela 14. Wpływ wielkości plonu ogólnego na względną wielkość plonu w roku następnym i liczby wypustek na względną liczbę wypustek w roku następnym (równania regresji i R^2) w doświadczeniu D.1.01

Table 14. The influence of the total yield on the relative yield in the next year and the relative number of spears in the next year (regression equations and R^2) in experiment D.1.01

Odmiana Cultivar	Równanie i R^2 dla – Equation and R^2 for	
	względnego plonu ogólnego relative total yield	względnej liczby wypustek relative number of spears
Andreas	$y = 298,14x^{-0,834}$, $R^2 = 0,468^{**}$	$y = 7707,7x^{-0,821}$, $R^2 = 0,479^{**}$
Gijnlim	$y = 637,67x^{-1,060}$, $R^2 = 0,591^{**}$	$y = 41027x^{-1,025}$, $R^2 = 0,600^{**}$
J. Giant	$y = 205,83x^{-0,717}$, $R^2 = 0,464^{**}$	$y = 10138x^{-0,877}$, $R^2 = 0,564^{**}$
Thielim	$y = 486,78x^{-0,951}$, $R^2 = 0,624^{**}$	$y = 17283x^{-0,907}$, $R^2 = 0,6313^{**}$
Vulkan	$y = 318,29x^{-0,741}$, $R^2 = 0,528^{**}$	$y = 7540,8x^{-0,754}$, $R^2 = 0,564^{**}$
Średnia – Mean	$y = 321,36x^{-0,792}$, $R^2 = 0,474^{**}$	$y = 10179x^{-0,828}$, $R^2 = 0,5151^{**}$

**Istotne przy $\alpha = 0,01$.

**Significant at $\alpha = 0.01$.

Tabela 15. Wielkość plonu ogólnego i liczba wypustek w plonie ogólnym, które nie mają wpływu na plonowanie w roku następnym w doświadczeniu D.1.01

Table 15. The total yield and the number of spears in the total yield without influence on the yield in the next year in experiment D.1.01

Odmiana Cultivar	Plon ogólny Total yield (t·ha ⁻¹)	Liczba wypustek w plonie ogólnym (tys. szt·ha ⁻¹) Number of spears in total yield (thousand pcs·ha ⁻¹)
Andreas	3,71	198,8
Gijnlim	5,74	354,3
J. Giant	2,74	193,8
Thielim	5,28	293,1
Vulkan	4,83	308,9
Średnia – Mean	4,38	265,9

Tabela 16. Wpływ terminu kończenia zbiorów na plon ogólny i handlowy oraz średnia masa wypustki dla dwóch odmian szparaga w doświadczeniu D.1.02 w latach 2002–2010

Table 16. The influence of the harvest end date on the total yield, marketable yield and the mean spear weight of two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 June	20 June	30 June	
Plon ogólny (t·ha ⁻¹) – Total yield (t·ha ⁻¹)				
Backlim	10,0 cd	9,9 cd	9,5 d	9,8 b
Gijnlim	12,6 a	11,3 b	10,8 bc	11,5 a
Średnia – Mean	11,3 a	10,6 b	10,1 b	
Plon handlowy (t·ha ⁻¹) – Marketable yield (t·ha ⁻¹)				
Backlim	8,5 c	8,1 cd	7,5 d	8,0 b
Gijnlim	11,0 a	9,6 b	8,9 c	9,8 a
Średnia – Mean	9,8 a	8,9 b	8,2 c	
Średnia masa wypustki (g) – Mean spear weight (g)				
Backlim	25,3 a	25,7 a	25,8 a	25,6 a
Gijnlim	23,0 b	22,2 b	19,4 c	21,6 b
Średnia – Mean	24,2 a	24,0 a	22,6 b	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 17. Wpływ terminu kończenia zbiorów na wielkość plonu ogólnego, handlowego i średnią masę wypustki odmiany ‘Thielim’ w doświadczeniu D.1.03 w latach 2002–2010

Table 17. The influence of the harvest end date on the total yield, marketable yield and the mean spear weight of cultivar ‘Thielim’ in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Koniec zbiorów Harvest end	Plon (t·ha ⁻¹) – Yield (t·ha ⁻¹)		Średnia masa wypustki Mean spear weight (g)
	ogólny total yield	handlowy marketable yield	
10 VI	10,7 ab	9,1 a	34,8 a
20 VI	10,9 a	8,7 a	34,3 a
30 VI	10,0 b	7,9 b	31,0 b
Średnia – Mean	10,5	8,6	33,4

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 18. Wpływ terminu kończenia zbiorów na świeżą masę karp (t·ha⁻¹) dwóch odmian szparaga w doświadczeniu D.1.02 w latach 2002–2010

Table 18. The influence of the harvest end date on the fresh weight of crowns (t·ha⁻¹) of two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Backlim	102,6 a	78,5 c	60,6 d	80,5 b
Gijnlim	106,0 a	86,8 b	66,1 d	86,3 a
Średnia – Mean	104,3 a	82,6 b	63,3 c	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 19. Wpływ terminu kończenia zbiorów na świeżą masę karp ($t \cdot ha^{-1}$) odmiany ‘Thielim’ w doświadczeniu D.1.03 w latach 2002–2010

Table 19. The influence of the harvest end date on the fresh weight of crowns ($t \cdot ha^{-1}$) of the ‘Thielim’ cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Koniec zbiorów Harvest end	Cukry Carbohydrates ($t \cdot ha^{-1}$)
10 VI	99,9 a
20 VI	81,3 b
30 VI	68,4 c
Średnia – Mean	83,2

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się na poziomie $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 20. Wpływ terminu kończenia zbiorów na średnicę, wysokość i masę pojedynczego pędu asymilacyjnego dwóch odmian szparaga w latach 2002–2010 w doświadczeniu D.1.02

Table 20. The influence of the harvest end date on the diameter, height and weight of individual summer stalks of two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Średnica (mm) – Diameter (mm)				
Backlim	13,5 a	13,0 ab	12,6 b	13,0 a
Gijnlim	12,0 c	11,2 d	10,6 d	11,3 b
Średnia – Mean	12,7 a	12,1 b	11,6 c	
Wysokość (cm) – Height (cm)				
Backlim	197 a	188 b	181 c	189 a
Gijnlim	196 a	180 c	174 d	183 b
Średnia – Mean	196 a	184 b	177 c	
Masa (g) – Weight (g)				
Backlim	193 a	175 b	157 b	175 a
Gijnlim	157 b	127 c	114 c	133 b
Średnia – Mean	175 a	151 b	135 c	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newmana-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 21. Wpływ terminu kończenia zbiorów na średnicę, wysokość i masę pojedynczego pędu asymilacyjnego odmiany ‘Thielim’ w latach 2002–2010 w doświadczeniu D.1.03

Table 21. The influence of the harvest end date on the diameter, height and weight of individual summer stalks of the ‘Thielim’ cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Koniec zbiorów Harvest end	Średnica Diameter (mm)	Wysokość Height (cm)	Masa Weight (g)
10 VI	14,3 a	209 a	223 a
20 VI	13,4 a	204 ab	196 a
30 VI	12,2 b	191 b	157 b

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newmana-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 22. Wpływ terminu kończenia zbiorów na całkowitą masę pędów asymilacyjnych ($t \cdot ha^{-1}$) dwóch odmian szparaga w latach 2002–2010 w doświadczeniu D.1.02

Table 22. The influence of the harvest end date on the total summer stalk weight ($t \cdot ha^{-1}$) of two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Backlim	26,4 a	18,6 b	14,3 bc	19,8 a
Gijnlim	27,7 a	17,0 bc	12,8 c	19,2 a
Średnia – Mean	27,0 a	17,8 b	13,5 c	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 23. Wpływ terminu kończenia zbiorów na całkowitą masę pędów asymilacyjnych ($t \cdot ha^{-1}$) odmiany ‘Thielim’ w latach 2002–2010 w doświadczeniu D.1.03

Table 23. The influence of the harvest end date on the total summer stalk weight ($t \cdot ha^{-1}$) of the ‘Thielim’ cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Koniec zbiorów Harvest end	Masa Weight ($t \cdot ha^{-1}$)
10 VI	23,6 a
20 VI	21,2 a
30 VI	12,7 b

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 24. Wpływ odmiany szparaga na procentową zawartość suchej masy w gałęziakach w doświadczeniu D.2.04

Table 24. The influence of the asparagus cultivar on the dry matter content in cladophylls in experiment D.2.04

Odmiana Cultivar	Zawartość suchej masy Dry matter content (%)
Avalim	23,8 a
Ercole	24,9 a
Gijnlim	20,7 ab
Guelph Millennium	22,2 ab
NJ 953	20,9 ab
Pacific 2000	15,8 b
UC 157	20,8 ab
Victor	18,2 ab
Średnia – Mean	20,9

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 25. Wpływ terminu kończenia zbiorów na suchą masę pędów asymilacyjnych ($t \cdot ha^{-1}$) dwóch odmian szparaga w doświadczeniu D.1.02 w latach 2002–2010

Table 25. The influence of the harvest end date on the dry weight of summer stalks ($t \cdot ha^{-1}$) of two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Backlim	7,80 a	5,66 b	4,43 cd	5,96 a
Gijnlim	8,46 a	5,21 bc	3,95 c	5,87 a
Średnia – Mean	8,13 a	5,43 b	4,19 c	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 26. Wpływ terminu kończenia zbiorów na suchą masę pędów asymilacyjnych odmiany 'Thielim' w doświadczeniu D.1.03 w latach 2002–2010

Table 26. The influence of the harvest end date on the dry weight of summer stalks ($t \cdot ha^{-1}$) of the 'Thielim' cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Koniec zbiorów Harvest end	Sucha masa Dry weight ($t \cdot ha^{-1}$)
10 VI	7,94 a
20 VI	5,94 b
30 VI	4,52 c
Średnia – Mean	6,13

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 27. Wpływ odmiany szparaga na specyficzną powierzchnię liści (SLA) w doświadczeniu D.2.04

Table 27. The influence of the asparagus cultivar on the specific leaf area (SLA) in experiment D.2.04

Odmiana Cultivar	Specyficzna powierzchnia liści Specific leaf area ($m^2 \cdot kg^{-1}$)
Avalim	8,5 ab
Ercole	8,2 ab
Gijnlim	9,2 ab
Guelph Millennium	6,8 b
NJ 953	9,7 ab
Pacific 2000	11,2 a
UC 157	9,6 ab
Vittorio	11,0 a
Średnia – Mean	9,3

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 28. Wpływ terminu kończenia zbiorów na specyficzną powierzchnię gałęziaków (SLA) dwóch odmian szparaga w doświadczeniu D.1.02 w latach 2002–2010

Table 28. The influence of the harvest end date on the specific leaf area (SLA) of two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Specyficzna powierzchnia gałęziaków ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) – Specific leaf area ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)				
Backlim	9,8 c	12,8 b	13,9 ab	12,2 b
Gijnlim	10,7 c	13,7 ab	15,6 a	13,3 a
Średnia – Mean	10,2 c	13,3 b	14,7 a	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 29. Wpływ terminu kończenia zbiorów na specyficzną masę liścia (gałęziaków) (SLW) i specyficzną powierzchnię liści (gałęziaków) (SLA) odmiany 'Thielim' w doświadczeniu D.1.03 w latach 2002–2010

Table 29. The influence of the harvest end date on the specific leaf weight (SLW) and specific leaf area (SLA) of the 'Thielim' cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Koniec zbiorów Harvest end	Specyficzna powierzchnia liści Specific leaf area ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)
10 VI	12,4 b
20 VI	15,6 a
30 VI	15,6 a
Średnia – Mean	14,5

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 30 Rozkład powierzchni gałęziaków w łanie pędów asymilacyjnych

Table 30. The distribution of the area of cladophylls and lateral shoots in a canopy of summer stalks

Względna odległość od wierzchołka Relative distance from top	Indeks powierzchni liści – Leaf area index					
	1	2	3	4	5	6
0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,3	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,3
0,4	0,3	0,7	1,0	1,4	1,7	2,1
0,5	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,6	0,6	1,3	1,9	2,6	3,2	3,9
0,7	0,8	1,6	2,3	3,1	3,9	4,7
0,8	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4
0,9	1,0	1,9	2,9	3,9	4,9	5,8
1,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

Tabela 31. Wpływ terminu kończenia zbiorów na indeks powierzchni liści (LAI) w doświadczeniu D.1.02 w latach 2002–2010

Table 31. The influence of the harvest end date on the leaf area index (LAI) of two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
LAI				
Backlim	2,40 a	1,75 b	1,38 c	1,85 a
Gijnlim	2,64 a	1,65 b	1,26 c	1,85 a
Średnia – Mean	2,52 a	1,70 b	1,32 c	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 32. Wpływ terminu kończenia zbiorów na indeks powierzchni liści (LAI) odmiany ‘Thielim’ w doświadczeniu D.1.03 w latach 2002–2010

Table 32. The influence of harvest end date on the leaf area index (LAI) of the ‘Thielim’ cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Koniec zbiorów Harvest end	LAI
10 VI	2,44 a
20 VI	1,85 b
30 VI	1,42 c
Średnia – Mean	1,90

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 33. Wpływ terminu kończenia zbiorów na procent absorbowanego światła dla dwóch odmian szparaga w latach 2002–2010 w doświadczeniu D.1.02

Table 33. The influence of the harvest end date on the percentage of light absorbed by two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Absorpcja światła (%) – Light absorption (%)				
Backlim	75,3 a	63,2 b	54,8 c	64,4 a
Gijnlim	77,7 a	61,3 b	51,0 c	63,3 a
Średnia – Mean	76,5 a	62,2 b	52,9 c	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 34. Wpływ terminu kończenia zbiorów na procent absorbowanego światła dla odmiany 'Thielim' w doświadczeniu D.1.03 w latach 2002–2010

Table 34. The influence of the harvest end date on the percentage of light absorbed by the 'Thielim' cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Koniec zbiorów End of harvest	Absorpcja światła Light interception (%)
10 VI	78,7 a
20 VI	76,0 a
30 VI	71,5 b
Średnia – Mean	75,37

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się na poziomie $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 35. Względne natężenie światła w łanie pędów asymilacyjnych (%)

Table 35. Relative light intensity in a canopy of summer stalks (%)

Względna odległość od wierzchołka Relative distance from top	LAI					
	1	2	3	4	5	6
0,1	98,3	96,6	95,0	93,4	91,8	90,3
0,2	93,8	88,1	82,7	77,6	72,8	68,3
0,4	80,6	65,0	52,4	42,3	34,1	27,5
0,5	73,6	54,2	39,9	29,4	21,6	15,9
0,6	67,2	45,2	30,4	20,4	13,7	9,2
0,8	57,6	33,2	19,1	11,0	6,3	3,6
0,9	54,9	30,1	16,5	9,1	5,0	2,7
1,0	53,8	28,9	15,6	8,4	4,5	2,4
Średnia – Mean	72,5	55,2	44,0	36,5	31,2	27,5

Tabela 36. Procent absorbowanego światła w łanie pędów asymilacyjnych (%)

Table 36. The percentage of light absorbed in a canopy of summer stalks (%)

Względna odległość od wierzchołka Relative distance from top	LAI					
	1	2	3	4	5	6
0,1	2	3	5	7	8	10
0,2	6	12	17	22	27	32
0,4	19	35	48	58	66	73
0,5	26	46	60	71	78	84
0,6	33	55	70	80	86	91
0,8	42	67	81	89	94	96
0,9	45	70	83	91	95	97
1,0	46	71	84	92	96	98

Tabela 37. Efektywność kwantowa fotosyntezy ośmiu odmian szparaga w czterech różnych temperaturach powietrza w doświadczeniu D.2.04

Table 37. The quantum efficiency of photosynthesis of eight asparagus cultivars at four different air temperatures in experiment D.2.04

Odmiana Cultivar	Temperatura (°C) – Temperature (°C)				Średnia Mean
	15	20	25	30	
Avalim	0,111 b	0,094 c	0,062 b	0,070 b	0,084 d
Ercole	0,174 ab	0,150 ab	0,140 a	0,118 ab	0,146 b
Gijnlim	0,146 ab	0,140 b	0,087 b	0,070 b	0,111 c
Guelph Millennium	0,209 a	0,205 a	0,163 a	0,144 ab	0,180 a
NJ 953	0,188 ab	0,165 ab	0,144 a	0,131 ab	0,157 ab
Pacific 2000	0,165 ab	0,157 ab	0,152 a	0,144 ab	0,154 ab
UC 157	0,196 ab	0,172 ab	0,191 a	0,160 a	0,180 a
Vittorio	0,169 ab	0,166 ab	0,152 a	0,141 ab	0,157 ab
Średnia – Mean	0,170 a	0,156 a	0,136 b	0,122 b	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 38. Wpływ temperatury na efektywność kwantową fotosyntezy w doświadczeniu D.2.04

Table 38. The influence of temperature on the quantum efficiency of photosynthesis in experiment D.2.04

Odmiana Cultivar	Równanie regresji Regression equation	R^2
Avalim	$y = -0,0030x + 0,1521$	0,463
Ercole	$y = -0,0034x + 0,2222$	0,735**
Gijnlim	$y = -0,0055x + 0,2345$	0,874**
Guelph Millennium	$y = -0,0046x + 0,2844$	0,808**
NJ 953	$y = -0,0037x + 0,2404$	0,790**
Pacific 2000	$y = -0,0013x + 0,1847$	0,235
UC 157	$y = -0,0015x + 0,2140$	0,145
Vittorio	$y = -0,0018x + 0,1981$	0,316

**Istotne przy $\alpha = 0,01$.

**Significant at $\alpha = 0.01$.

Tabela 39. Punkt wysycenia światłem ośmiu odmian szparaga w czterech różnych temperaturach powietrza w doświadczeniu D.2.04 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)Table 39. The light saturation point of eight asparagus cultivars at four different air temperatures in experiment D.2.04 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

Odmiana Cultivar	Temperatura (°C) – Temperature (°C)				Średnia Mean
	15	20	25	30	
Avalim	274 a	292 a	378 b	313 b	314 b
Ercole	161 a	223 a	236 bc	280 b	225 cd
Gijnlim	149 a	234 a	526 a	657 a	391 a
Guelph Millennium	205 a	234 a	276 bc	315 b	258 cd
NJ 953	188 a	235 a	311 bc	363 b	274 bc
Pacific 2000	209 a	260 a	275 bc	299 b	261 cd
UC 157	165 a	211 a	207 c	245 b	207 d
Vittorio	155 a	191 a	225 bc	269 b	210 d
Średnia – Mean	188 d	235 c	304 b	343 a	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 40. Wpływ temperatury na punkt wysycenia światłem w doświadczeniu D.2.04
 Table 40. The influence of temperature on the light saturation point in experiment D.2.04

Odmiana Cultivar	Równanie regresji Regression equation	R^2
Avalim	$y = 4,368x + 216,16$	0,203
Ercole	$y = 7,612x + 55,772$	0,646*
Gijnlim	$y = 35,399x - 403,89$	0,946**
Guelph Millennium	$y = 7,204x + 95,93$	0,889**
NJ 953	$y = 11,610x + 13,68$	0,863**
Pacific 2000	$y = 5,422x + 139,31$	0,831**
UC 157	$y = 4,407x + 107,84$	0,596**
Vittorio	$y = 7,263x + 46,485$	0,631*

*Istotne przy $\alpha = 0,05$.

**Istotne przy $\alpha = 0,01$.

*Significant at $\alpha = 0.05$.

**Significant at $\alpha = 0.01$.

Tabela 41. Punkt kompensacji świetlnej ośmiu odmian szparaga w czterech różnych temperaturach powietrza w doświadczeniu D.2.04 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

Table 41. The light compensation point of eight asparagus cultivars at four different air temperatures in experiment D.2.04 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

Odmiana Cultivar	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) – Temperature ($^{\circ}\text{C}$)				Średnia Mean
	15	20	25	30	
Avalim	31 a	39 a	59 b	64 b	48 b
Ercole	20 a	41 a	42 b	62 b	41 b
Gijnlim	20 a	60 a	120 a	173 a	93 a
Guelph Millennium	34 a	51 a	57 b	76 b	54 b
NJ 953	24 a	50 a	60 b	78 b	53 b
Pacific 2000	38 a	57 a	55 b	67 b	54 b
UC 157	28 a	44 a	38 b	53 b	41 b
Vittorio	22 a	43 a	47 b	65 b	44 b
Średnia – Mean	27 d	48 c	60 b	80 a	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newmana-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 42. Wpływ temperatury na punkt kompensacji w doświadczeniu D.2.04
 Table 42. The influence of temperature on the compensation point in experiment D.2.04

Odmiana Cultivar	Równanie regresji Regression equation	R^2
Avalim	$y = 2,3195x - 3,6843$	0,832**
Ercole	$y = 2,5675x - 15,748$	0,758**
Gijnlim	$y = 9,9572x - 130,56$	0,963**
Guelph Millennium	$y = 2,5356x - 2,4288$	0,758**
NJ 953	$y = 3,2628x - 20,275$	0,801**
Pacific 2000	$y = 1,6173x + 17,998$	0,540*
UC 157	$y = 1,2331x + 13,083$	0,475
Vittorio	$y = 2,5762x - 13,766$	0,711**

*Istotne przy $\alpha = 0,05$.

**Istotne przy $\alpha = 0,01$.

*Significant at $\alpha = 0.05$.

**Significant at $\alpha = 0.01$.

Tabela 43. Maksymalna fotosynteza netto ośmiu odmian szparaga w czterech różnych temperaturach powietrza w doświadczeniu D.2.04 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)Table 43. The maximum net photosynthesis of eight asparagus cultivars at four different air temperatures in experiment D.2.04 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

Odmiana Cultivar	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) – Temperature ($^{\circ}\text{C}$)				Średnia Mean
	15	20	25	30	
Avalim	21,6 bc	16,9 b	14,3 b	12,2 b	16,3 d
Ercole	21,0 bc	21,7 ab	21,6 ab	18,7 ab	20,8 bc
Gijnlim	16,0 c	17,3 b	24,8 ab	21,4 a	19,9 bc
Guelph Millennium	28,7 a	27,2 a	25,3 ab	23,5 a	26,2 a
NJ 953	26,3 ab	26,3 a	28,3 a	27,5 a	27,1 a
Pacific 2000	22,1 bc	21,9 ab	24,8 ab	23,5 a	23,1 b
UC 157	21,0 bc	21,1 ab	25,0 ab	22,0 a	22,3 b
Vittorio	18,1 c	17,3 b	19,7 ab	19,5 ab	18,6 cd
Średnia – Mean	21,9 a	21,2 a	23,0 a	21,0 a	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 44. Wpływ temperatury na maksymalną intensywność fotosyntezy netto w doświadczeniu D.2.04

Table 44. The influence of temperature on the maximum net photosynthesis in experiment D.2.04

Odmiana Cultivar	Równanie regresji Regression equation	R^2
Avalim	$y = -0,5942x + 29,606$	0,823**
Ercole	$y = -0,0999x + 22,977$	0,019
Gijnlim	$y = 0,2221x + 13,658$	0,086
Guelph Millennium	$y = -0,3397x + 33,787$	0,772**
NJ 953	$y = 0,119x + 24,405$	0,247
Pacific 2000	$y = 0,1485x + 19,763$	0,169
UC 157	$y = 0,1547x + 18,784$	0,224
Vittorio	$y = 0,1302x + 15,711$	0,265

**Istotne przy $\alpha = 0,01$.

**Significant at $\alpha = 0.01$.

Tabela 45. Wpływ terminu kończenia zbiorów na stężenie cukrów w korzeniach szparaga ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.) po zakończeniu zbiorów wypustek dwóch odmian szparaga w latach 2002–2010 w doświadczeniu D.1.02

Table 45. The influence of the harvest end date on the content of carbohydrates in roots ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ d.w.) after harvesting the spears of two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Backlim	479 a	415 b	385 c	426 a
Gijnlim	470 a	385 c	347 d	401 b
Średnia – Mean	474 a	400 b	366 c	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newmana-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 46. Wpływ terminu kończenia zbiorów na stężenie cukrów w korzeniach szparaga ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.) po zakończeniu zbiorów wypustek odmiany ‘Thielim’ w latach 2002–2010 w doświadczeniu D.1.03

Table 46. The influence of the harvest end date on the content of carbohydrates in roots ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ d.w.) after harvesting the spears of the ‘Thielim’ cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Koniec zbiorów Harvest end	Stężenie cukrów ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.) Carbohydrate content ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ d.w.)
10 VI	482 a
20 VI	418 b
30 VI	334 c
Średnia – Mean	411

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newmana-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 47. Wpływ terminu kończenia zbiorów na ilość produkowanych cukrów ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) dwóch odmian szparaga w doświadczeniu D.1.02 w latach 2002–2010

Table 47. The influence of the harvest end date on the amount of carbohydrates produced ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) by two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Backlim	21,22 a	15,64 b	11,43 c	16,10 a
Gijnlim	21,87 a	15,13 b	10,65 c	15,89 a
Średnia – Mean	21,54 a	15,39 b	11,04 c	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newmana-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 48. Wpływ terminu kończenia zbiorów na ilość produkowanych cukrów ($t \cdot ha^{-1}$) odmiany 'Thielim' w doświadczeniu D.1.03 w latach 2002–2010

Table 48. The influence of the harvest end date on carbohydrate produced by the 'Thielim' cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Koniec zbiorów Harvest end	Produkcja cukrów Carbohydrate production ($t \cdot ha^{-1}$)
10 VI	21,33 a
20 VI	16,10 b
30 VI	11,60 c
Średnia – Mean	16,34

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newmana-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 49. Wpływ terminu kończenia zbiorów na ilość cukrów zużywanych do oddychania wzrostowego ($t \cdot ha^{-1}$) dwóch odmian szparaga w doświadczeniu D.1.02 w latach 2002–2010

Table 49. The influence of the harvest end date on the amount of carbohydrates ($t \cdot ha^{-1}$) consumed in growth respiration by two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Wypustki – Spears				
Backlim	1,02 cd	1,01 cd	0,97 d	1,00 b
Gijnlim	1,29 a	1,15 b	1,10 bc	1,18 a
Średnia – Mean	1,15 a	1,08 b	1,04 b	
Pędy asymilacyjne – Summer stalks				
Backlim	11,07 a	8,04 b	6,29 cd	8,47 a
Gijnlim	12,01 a	7,39 bc	5,60 d	8,33 a
Średnia – Mean	11,54 a	7,72 b	5,95 c	
Korzenie – Roots				
Backlim	1,14 b	0,49 d	0,05 f	0,56 b
Gijnlim	1,48 a	0,67 c	0,24 e	0,80 a
Średnia – Mean	1,31 a	0,58 b	0,15 c	
Wypustki, pędy i korzenie – Spears, stalks and roots				
Backlim	13,23 b	9,54 c	7,32 d	10,03 a
Gijnlim	14,77 a	9,21 c	6,95 d	10,31 a
Średnia – Mean	14,00 a	9,38 b	7,13 c	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newmana-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 50. Wpływ terminu kończenia zbiorów na ilość cukrów ($t \cdot ha^{-1}$) potrzebnych do oddychania wzrostowego odmiany 'Thielim' w doświadczeniu D.1.03 w latach 2002–2010
 Table 50. The influence of the harvest end date on the amount of carbohydrates ($t \cdot ha^{-1}$) necessary for the growth respiration of the 'Thielim' cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Część rośliny Part of plant	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Wypustki Spears	1,09 ab	1,12 a	1,02 b	1,08
Pędy asymilacyjne Summer stalks	11,27 a	8,44 b	6,42 c	8,71
Korzenie Roots	1,19 a	0,55 b	0,26 c	0,80
Suma Total	13,56 a	10,10 b	7,70 c	10,45

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 51. Wpływ terminu kończenia zbiorów na ilość cukrów ($t \cdot ha^{-1}$) potrzebnych do oddychania bytowego korzeni i pędów asymilacyjnych dwóch odmian szparaga w doświadczeniu D.1.02 w latach 2002–2010

Table 51. The influence of the harvest end date on the amount of carbohydrates ($t \cdot ha^{-1}$) necessary for the maintenance respiration of the roots and summer stalks of two asparagus cultivars in experiment D.1.02 conducted between 2002 and 2010

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI	20 VI	30 VI	
Oddychanie korzeni w czasie zimowego spoczynku Root respiration during winter dormancy				
Backlim	0,94 a	0,72 bc	0,56 d	0,74 a
Gijnlim	0,97 a	0,80 b	0,62 cd	0,79 a
Średnia – Mean	0,95 a	0,76 b	0,59 c	
Oddychanie korzeni i wypustek w czasie zbioru Root and spear respiration during harvest				
Backlim	1,12 a	1,07 a	1,01 a	1,07 a
Gijnlim	1,15 a	1,18 a	1,1 a	1,15 a
Średnia – Mean	1,13 a	1,13 a	1,05 a	
Oddychanie korzeni w okresie asymilacji Root respiration during assimilation period				
Backlim	3,39 a	2,38 b	1,66 c	2,47 a
Gijnlim	3,50 a	2,63 b	1,81 c	2,65 a
Średnia – Mean	3,44 a	2,50 b	1,73 c	
Oddychanie korzeni w całym roku Root respiration during all year				
Backlim	5,44 a	4,17 bc	3,23 d	4,28 a
Gijnlim	5,62 a	4,61 b	3,53 cd	4,58 a
Średnia – Mean	5,53 a	4,39 b	3,38 c	
Oddychanie pędów asymilacyjnych Summer stalks respiration				
Backlim	2,01 a	1,33 b	0,93 c	1,42 a
Gijnlim	2,19 a	1,22 b	0,82 c	1,41 a
Średnia – Mean	2,10 a	1,27 b	0,88 c	

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie według testu Newman-Keulsa przy $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 52. Wpływ terminu kończenia zbiorów na ilość cukrów potrzebnych do oddychania bytowego korzeni w okresie spoczynku zimą odmiany 'Thielim' w doświadczeniu D.1.03 w latach 2002–2010

Table 52. The influence of the harvest end date on the amount of carbohydrates ($t \cdot ha^{-1}$) necessary for the maintenance respiration of roots during the winter dormancy of the 'Thielim' cultivar in experiment D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Część rośliny Plant part	Okres Period	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
		10 VI	20 VI	30 VI	
Korzenie Roots	zima spoczynek winter dormancy	0,91 a	0,75 a	0,64 a	0,77
	zbiory wypustek spear harvest	1,09 a	1,11 a	1,14 a	1,11
	asymilacja assimilation	3,30 a	2,46 b	1,87 c	2,54
	cały rok all year	5,3 a	4,32 b	3,64 b	4,42
Pędy Stalks	asymilacja assimilation	2,06 a	1,39 b	0,94 c	1,46

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się na poziomie $\alpha = 0,05$.

Values marked with the same letters are not significantly different in the Newman-Keuls test at $\alpha = 0.05$.

Tabela 53. – cd.
Table 53. – cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Zużyte przez pędy Consumed by stalks	13,1	9,4	7,2	14,2	8,6	6,4	13,3	9,8	7,4	13,5	9,3	7,0	9,9	9,7	10,2	9,9
Zużyte przez korzenie Consumed by roots	6,6	4,7	3,3	7,1	5,3	3,8	6,5	4,9	3,9	6,7	4,9	3,7	4,8	5,4	5,1	5,1
Zużyte przez wypustki Consumed by spears	1,0	1,0	1,0	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	1,2	1,1	1,1
Zmagazynowane w karpie Stored in roots	10,6	7,7	6,7	11,1	9,2	7,3	10,8	8,2	7,0	10,9	8,4	7,0	8,4	9,2	8,7	8,7
Zużyte bezpośrednio Consumed directly	10,1	7,3	4,8	11,5	5,9	4,0	10,1	7,6	5,3	10,6	6,9	4,7	7,4	7,1	7,7	7,4
Zapotrzebowanie na cukry Demand for carbohydrates	20,7	15,0	11,5	22,6	15,0	11,3	20,9	15,8	12,3	21,4	15,3	11,7	15,7	16,3	16,3	16,1
Produkcja cukrów Production of carbohydrates	21,2	15,6	11,4	21,9	15,1	10,7	21,3	16,1	11,6	21,5	15,6	11,2	16,1	15,9	16,3	16,1
Różnica pomiędzy produkcją a zużyciem cukrów Difference between production and consumption of carbohydrates	0,5	0,6	-0,1	-0,7	0,1	-0,6	0,4	0,3	-0,7	0,1	0,3	-0,5	0,4	-0,4	0,0	0,0

OW – oddychanie wzrostowe, OB – oddychanie bytowe.

\bar{x} – średnia.

GR – growth respiration, MR – maintenance respiration.

\bar{x} – mean.

Tabela 54. Procent zużytych cukrów na potrzeby życiowe u trzech odmian szparaga w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 w latach 2002-2010
 Table 54. The percentage of carbohydrates consumed by three asparagus cultivars in experiments D.1.02 and D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Cukry Carbohydrates	'Backlim' (B)			'Gijnlim' (G)						'Thielim' (T)						Średnia – Mean				
	10 VI	20 VI	30 VI	10 VI	20 VI	30 VI	10 VI	20 VI	30 VI	10 VI	20 VI	30 VI	10 VI	20 VI	30 VI	B	G	T	\bar{x}	
	percent potrzehanych cukrów – percentage of required carbohydrates																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17				
OB korzeni w okresie spoczynku MR of roots during dormancy	4,5	4,8	4,9	4,3	5,3	5,5	4,4	4,7	5,2	4,4	4,9	5,2	4,7	4,9	4,7	4,8				
OB korzeni w okresie zbiorów MR of roots during harvest	5,4	7,1	8,8	5,1	7,8	9,7	5,2	7,0	9,3	5,2	7,3	9,3	6,8	7,0	6,8	6,9				
OW wypustek w okresie zbiorów GR of spears during harvest	4,9	6,7	8,5	5,7	7,6	9,7	5,2	7,1	8,3	5,3	7,1	8,8	6,4	7,2	6,6	6,7				
OB korzeni w okresie asymilacji MR of roots during assimilation	16,4	15,8	14,5	15,5	17,5	16,0	15,8	15,5	15,2	15,9	16,3	15,2	15,7	16,2	15,6	15,8				
OB pedów w okresie asymilacji MR of stalks during assimilation	9,7	8,8	8,1	9,7	8,1	7,3	9,9	8,8	7,6	9,8	8,6	7,7	9,0	8,6	9,0	8,9				
OW korzeni w okresie asymilacji GR of roots during assimilation	5,5	3,3	0,4	6,6	4,5	2,1	5,7	3,5	2,1	5,9	3,7	1,6	3,6	4,9	4,1	4,2				
OW pedów w okresie asymilacji GR of stalks during assimilation	53,5	53,5	54,8	53,2	49,1	49,6	53,9	53,4	52,2	53,5	52,0	52,2	53,8	51,1	53,3	52,7				
Zużyte w okresie spoczynku Consumed during dormancy	4,5	4,8	4,9	4,3	5,3	5,5	4,4	4,7	5,2	4,4	4,9	5,2	4,7	4,9	4,7	4,8				
Zużyte w okresie zbiorów Consumed during harvest	10,3	13,8	17,3	10,8	15,5	19,5	10,4	14,1	17,6	10,5	14,5	18,1	13,1	14,2	13,4	13,6				
Zużyte w okresie asymilacji Consumed during assimilation	85,1	81,4	77,9	84,9	79,2	75,0	85,2	81,2	77,2	85,1	80,6	76,7	82,2	80,9	81,9	81,6				
Zużyte na całkowite OB Consumed in total MR	36,1	36,6	36,3	34,6	38,8	38,5	35,2	36,1	37,3	35,3	37,1	37,4	36,3	36,8	36,0	36,4				
Zużyte na całkowite OW Consumed in total GR	63,9	63,4	63,7	65,4	61,2	61,5	64,8	63,9	62,7	64,7	62,9	62,6	63,7	63,2	64,0	63,6				

Tabela 54. – cd.
Table 54. – cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Zużyte przez pędy Consumed by stalks	63,2	62,3	62,9	62,9	57,2	56,9	63,7	62,1	59,9	63,3	60,6	59,9	62,9	59,8	62,3	61,6
Zużyte przez korzenie Consumed by roots	31,9	31,0	28,6	31,4	35,1	33,4	31,0	30,8	31,8	31,4	32,3	31,3	30,8	33,0	31,2	31,7
Zużyte przez wypustki Consumed by spears	4,9	6,7	8,5	5,7	7,6	9,7	5,2	7,1	8,3	5,3	7,1	8,8	6,4	7,2	6,6	6,7
Zmagazynowane w korzeniach Stored in roots	51,4	51,2	58,6	49,0	61,1	64,4	51,8	51,7	57,0	50,7	54,6	59,9	53,1	56,3	53,1	54,2
Zużyte bezpośrednio Consumed directly	48,6	48,8	41,4	51,0	38,9	35,6	48,2	48,3	43,0	49,3	45,4	40,1	46,9	43,7	46,9	45,8
Zapotrzebowanie na cukry Demand for carbohydrates	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

OW – oddychanie wzrostowe, OB – oddychanie bytowe.

\bar{x} – średnia.

GR – growth respiration, MR – maintenance respiration.

\bar{x} – mean.

Tabela 55. Parametry równań opisujących zależność pomiędzy terminem kończenia zbiorów szparaga (10 VI = -10, 20 VI = 0 i 30 VI = 10) a ilością cukrów w doświadczeniach D.1.02 i D.1.03 w latach 2002-2010

Table 55. The coefficients of equations describing relations between the harvest end date (10 June = -10, 20 June = 0 and 30 June = 10) and carbohydrates in three asparagus cultivars in experiments D.1.02 and D.1.03 conducted between 2002 and 2010

Cukry Carbohydrates	Parametry równania ($y = ax + b$) Equation coefficients ($y = ax + b$)					
	bilans cukrów carbohydrate balance			procent cukrów carbohydrate percentage		
	a	b	R^2	a	b	R^2
OB korzeni w okresie spoczynku MR of roots during dormancy	-0,017	0,77	0,95**	0,040	4,85	0,67**
OB korzeni w okresie zbiorów MR of roots during harvest	n.i. - n.s.			0,202	7,28	0,96**
OW wypustek w okresie zbiorów GR of spears during harvest	n.i. - n.s.			0,177	7,09	0,90**
OB korzeni w okresie asymilacji MR of roots during assimilation	-0,081	2,56	0,98**	n.i. - n.s.		
OB pędów w okresie asymilacji MR of stalks during assimilation	-0,060	1,43	0,95**	-0,104	8,67	0,90**
OW korzeni w okresie asymilacji GR of roots during assimilation	-0,054	0,67	0,92**	-0,218	3,74	0,90**
OW pędów w okresie asymilacji GR of stalks during assimilation	-0,267	8,50	0,94**	n.i. - n.s.		
Zużyte w okresie spoczynku Consumed during dormancy	-0,017	0,77	0,95**	0,040	4,85	0,67**
Zużyte w okresie zbiorów Consumed during harvest	n.i. - n.s.			0,379	14,37	0,95**
Zużyte w okresie asymilacji Consumed during assimilation	-0,462	13,17	0,96**	-0,419	80,79	0,93**
Zużyte na OB Consumed in MR	-0,159	5,86	0,97**	n.i. - n.s.		
Zużyte na OW Consumed in GR	-0,327	10,26	0,94**	n.i. - n.s.		
Zużyte przez pędy Consumed by stalks	-0,327	9,94	0,94**	n.i. - n.s.		
Zużyte przez korzenie Consumed by roots	-0,154	5,11	0,95**	n.i. - n.s.		
Zużyte przez wypustki Consumed by spears	n.i. - n.s.			0,177	7,09	0,9**
Zmagazynowane w karpie Stored in roots	-0,193	8,73	0,92**	0,462	55,13	0,56*
Zużyte bezpośrednio Consumed directly	-0,293	7,39	0,91**	-0,462	44,87	0,56*
Zapotrzebowanie na cukry Demand for carbohydrates	-0,486	16,13	0,96**	0,040	4,85	0,67**
Produkcja cukrów Production of carbohydrates	-0,512	16,11	0,99**			

OW – oddychanie wzrostowe, OB – oddychanie bytowe.

R^2 – współczynnik determinacji.

GR – growth respiration, MR – maintenance respiration.

R^2 – coefficient of determination.

Tabela 56. Absorpcja światła i plon ogólny w przeliczeniu na ilość zużytych cukrów oraz plon potencjalny i suma ciepła potrzebna do jego zebrania
 Table 56. The leaf area index (LAI) and total yield in terms of the amount of carbohydrates consumed, the potential yield and the total temperature required for harvest

Odmiana Cultivar	Koniec zbiorów – Harvest end			Średnia Mean
	10 VI (-10)	20 VI (0)	30 VI (+10)	
Absorpcja światła na procent cukrów ($\% \cdot (\text{t} \cdot \text{ha}^{-1})^{-1}$) Light absorption per percentage of carbohydrates ($\% \cdot (\text{t} \cdot \text{ha}^{-1})^{-1}$)				
Backlim	6,8	7,9	8,7	6,8
Gijnlim	6,5	8,3	9,1	6,5
Thielim	6,7	7,7	8,7	6,7
Średnia – Mean	6,7	8,0	8,8	6,7
Regresja – Regression	$y = 0,109x + 7,81, R^2 = 0,94^{**}$			
Plon ogólny ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$) na 1 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ cukrów Total yield ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$) per 1 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ of carbohydrates				
Backlim	4,7	4,8	4,8	4,7
Gijnlim	5,2	4,8	4,9	5,0
Thielim	4,9	4,9	4,6	4,8
Średnia – Mean	4,9	4,8	4,8	4,8
Regresja – Regression	n.i. – n.s.			
Suma temperatury ($^{\circ}\text{Cd}$) Total temperature ($^{\circ}\text{Cd}$)	216	293	377	295
Plon ogólny ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 100^{\circ}\text{Cd}^{-1}$)** Total yield ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 100^{\circ}\text{Cd}^{-1}$)**				
Backlim	4,6	3,4	2,5	3,5
Gijnlim	5,8	3,9	2,9	4,2
Thielim	4,9	3,7	2,7	3,8
Średnia – Mean	5,1	3,6	2,7	3,8
Regresja – Regression	$y = -0,12x + 3,82, R^2 = 0,89^{**}$			
Uwolnione cukry z korzeni ($\% \text{CHO} \cdot 100^{\circ}\text{Cd}^{-1}$) Carbohydrates released from roots ($\% \text{CHO} \cdot 100^{\circ}\text{Cd}^{-1}$)				
Backlim	10,2	11,0	10,2	10,5
Gijnlim	12,4	11,2	11,1	11,6
Thielim	11,0	11,5	10,1	10,9
Średnia – Mean	11,2	11,3	10,5	11,0
Regresja – Regression	n.i. – n.s.			

*Istotne przy $\alpha = 0,05$.

**Istotne przy $\alpha = 0,01$.

n.i. – nieistotne.

%CHO – procent uwolnionych cukrów w stosunku do całkowitej ilości cukrów przed zbiorem.

*Significant at $\alpha = 0.05$.

**Significant at $\alpha = 0.01$.

n.s. – insignificant.

%CHO – the percentage of carbohydrates released in relation to the total amount of carbohydrates before harvest.

4. WNIOSKI

1. Plon ogólny i handlowy pięciu odmian szparaga zależał od roku zbiorów i odmiany, natomiast nie miały na niego wpływu warunki atmosferyczne w roku sadzenia. Warunki te istotnie modyfikowały wpływ odmiany i roku zbiorów. Im większy był plon ogólny w jednym roku, tym mniejszy był on w kolejnym. Największy plon ogólny i handlowy zebrano u odmiany 'Gijnlim'.

2. Wielkość plonu ogólnego, handlowego oraz średnia masa wypustki zależały od odmiany i terminu kończenia zbiorów. Średni plon ogólny i handlowy odmiany 'Gijnlim' był większy niż odmiany 'Backlim', jednak odmiana 'Backlim' tworzyła grubsze wypustki. Wydłużenie okresu zbiorów do 30 czerwca zwiększyło wielkość plonu ogólnego w pierwszych trzech latach zbiorów wypustek. W kolejnych latach zbierany plon był coraz mniejszy, gdyż dłuższy okres zbiorów wiązał się ze skróceniem okresu asymilacji, co doprowadziło do osłabienia roślin.

3. Termin kończenia zbiorów miał wpływ na badane parametry pędów asymilacyjnych. Im później kończono zbiory wypustek, tym pędy asymilacyjne miały mniejszą średnicę, wysokość i masę oraz mniejszy był LAI, przez co rośliny absorbowały mniej światła niż przy kończeniu zbiorów 10 czerwca. Jednak przy zbiorach do 30 czerwca pędy asymilacyjne miały większy udział masy pędów z gałęziakami w masie całego pędu i SLA, a w łanie pędów asymilacyjnych było wyższe natężenie PPFD.

4. Masa pędów asymilacyjnych (M_{PA}) może zostać określona na podstawie ich średnicy (d_{PA}) i ich wysokości (H_{PA}) według wzoru:

$$M_{PA} = 0,00785 \cdot d_{PA}^2 \cdot H_{PA} \cdot (0,871 - 0,0145 \cdot d_{PA} + 9,74 \cdot \exp(-d_{PA}))$$

5. Efektywność kwantowa fotosyntezy, punkt wysycenia światłem, punkt kompensacji świetlnej oraz maksymalna fotosynteza netto zależały od odmiany i temperatury powietrza. Im wyższa była temperatura w zakresie 15–30°C, tym mniejsza była efektywność kwantowa fotosyntezy i wyższy punkt wysycenia światłem oraz punkt kompensacji świetlnej.

6. Oddychanie korzeni, wypustek i pędów asymilacyjnych zależało od temperatury i w temperaturze 20°C wynosiło odpowiednio 97 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹, 225 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ i 212 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹.

7. Skrócenie okresu zbiorów do 10 czerwca wydłużyło okres asymilacji i zwiększyło ilość produkowanych cukrów. Pomimo wydłużenia okresu asymilacji, zwiększona produkcja cukrów w niewielkim stopniu przełożyła się na wielkość plonu ogólnego. Przy kończeniu zbioru 10 czerwca, produkcja cukrów zwiększyła się o 91% w porównaniu do produkcji cukrów przy zbiorach do 30 czerwca, jednak wielkość plonu ogólnego była większa średnio o 9,7%. Przy zbiorach do 30 czerwca, krótszy okres asymilacji był kompensowany przez rośliny szparaga między innymi poprzez zmianę pokroju pędów asymilacyjnych umożliwiającą lepsze wykorzystanie światła, bardziej efektywne wykorzystanie cukrów do wzrostu pędów asymilacyjnych oraz mniejsze zużycie cukrów na potrzeby oddychania korzeni i pędów asymilacyjnych. Rośliny szparaga magazynowały w korzeniach większy udział produkowanych cukrów niż rośliny, u których zbiory trwały do 10 czerwca.

8. Do korzeni było eksportowanych średnio 75% produkowanych cukrów. Procent eksportowanych cukrów zależał od odmiany, a nie od terminu kończenia zbiorów. Najwięcej cukrów eksportowanych było do korzeni odmiany 'Gijnlim' (średnio 78%), zaś mniej do korzeni odmian 'Backlim' i 'Thielim' (73%).

9. W okresie zbiorów wypustek, rośliny szparaga wykorzystywały średnio 13,6% z wszystkich wyprodukowanych cukrów. Z 1 t·ha⁻¹ cukrów zużywanych w tym okresie zbierano 4,8 t·ha⁻¹ wypustek. Efektywność wykorzystania cukrów do wzrostu wypustek nie zależała od terminu kończenia zbioru.

10. Tempo uwalniania cukrów było ściśle skorelowane z ilością cukrów w karpach przed rozpoczęciem okresu zbiorów i niezależnie od terminu kończenia zbiorów wynosiło średnio 11% cukrów zgromadzonych w korzeniach spichrzowych szparaga na każde 100°Cd.

11. Szybkość wyrastania wypustek w przeliczeniu na sumę temperatury powietrza zależała od odmiany i terminu kończenia zbiorów. Im wcześniej kończono zbiory wypustek, tym więcej było cukrów w korzeniach i szybciej wyrastały wypustki, przez co zbierano większy plon ogólny w przeliczeniu na sumę temperatury. Przy zbiorach do 10 czerwca plon ogólny wynosił 5,1 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹, natomiast przy zbiorach do 30 czerwca 2,7 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹. U odmiany 'Gijnlim' średni plon ogólny w przeliczeniu na sumę temperatury był największy i wynosił 4,2 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹, a u odmiany 'Backlim' najmniejszy (3,5 t·ha⁻¹·100°Cd⁻¹).

12. Rośliny szparaga produkowały w okresie asymilacji średnio 16,1 t·ha⁻¹ cukrów. Stwierdzono wpływ terminu kończenia zbiorów wypustek na ilość cukrów produkowanych i zużywanych na potrzeby oddychania bytowego i wzrostowego. Im krócej zbierano wypustki, tym więcej cukrów było produkowanych i zużywanych, z wyjątkiem samego okresu zbiorów, w którym ilość zużywanych cukrów nie różniła się zbytnio przy różnym terminie kończenia zbiorów.

LITERATURA

- Alam, A. K. M. S., Matsui, T., Ikeuchi, T. (1998). Changes in acid invertase, activity and sugar distribution in asparagus spears harvested in autumn. *Jpn. J. Trop. Agric.*, 42, 257–262.
- Amthor, J. S. (1984). The role of maintenance respiration in plant growth. *Plant Cell Environ.*, 7, 561–569.
- Amthor, J. S. (1989). *Respiration and crop productivity*. New York: Springer-Verlag.
- Asparagus – the plant list. (2018). <http://www.theplantlist.org/1.1/browse/A/Asparagaceae//Asparagus/>
- Araki, H., Nakano, H., Takamushi, S., Ichikawa, S., Jishi, T., Hoshino, Y., Yamagata, S., Kamide, M., Yamakoshi, Y., Yamada, A. (2012). Evaluation of asparagus fern and rhizome residues as bio-energy source. *Acta Hort.*, 950, 201–206.
- Bai, Y., Kelly, J.F. (1999). A study of photosynthetic activities of eight asparagus genotypes under field conditions. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 124 (1), 61–66.
- Benson, B. L., Takatori F.H. (1980). Partitioning of dry matter in open-pollinated and F1 cultivars of asparagus. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 105, 567–570.
- Blumenfeld, D., Meinken, K., LeCompte, S. (1963). A field study of asparagus growth. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 77, 386–392.
- Bouwkamp, J., McCully, J. (1972). Competition and survival in female plants of *Asparagus officinalis*. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 97, 74–76.
- Bouwkamp, J., McCully, J. (1975). Effects of simulated non-selective mechanical harvesting on spear emergence of *Asparagus officinalis*. *Sc. Hort.*, 3, 157–162.
- Brzeziński, J. (1931). *Szparagi i ich racjonalna hodowla*. Warszawa: Gebethner i Wolff.
- Byl, B. (2013). Sub-surface drip and overhead irrigation effects on asparagus production under Michigan growing conditions – MSU Libraries. A THESIS Submitted to Michigan State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Horticulture – Master of Science. <https://d.lib.msu.edu/etd/145>.
- Cembali, T., Folwell, R., Ball, T. (2004). Simulation of harvesting asparagus: mechanical vs manual. Selected Paper prepared for presentation at the Western Agricultural Economics Association Annual Meeting, Honolulu, Hawaii, June 30–July 2, 2004.
- Cembali, T., Hood, M. (2009). Evaluation of an electrical harvester for asparagus. *Int. J. Veg. Sci.*, 15, 158–167. [<http://dx.doi.org/10.1080/19315260802611202>]
- Caruso, G. (2002). Concimazione minerale dell'asparago in coltura protetta. *Culture Protette*, 31, 6, 69–74.
- Chen, W. (2015). Morphological and physiological characteristics of young plants and yielding of some asparagus (*Asparagus officinalis* L.) cultivars. Doctoral dissertation in the Department of Vegetable Crops at Poznań University of Life Sciences.
- Chin, C.-K., Garrison, S. A., Kinelski, J. J. (2010). Male asparagus hybrid plant 'NJ953'. United States USPP21170P3, filed 4 marzec 2008, issued 20 lipiec 2010. <https://patents.google.com/patent/USPP21170P3/en>.
- Culpepper, C., Moon H. (1939a). Effect of temperature upon the rate of elongation of the stems of asparagus grown under field conditions. *Plant Phys*, 14 (2), 255–270.

- Culpepper, C., Moon, H. (1939b). Changes in the composition and rate of growth along the developing stem of asparagus. *Plant Phys.*, 14 (4), 677–697.
- Dean, B. B. (1999). The effect of temperature on asparagus spear growth and correlation of heat units accumulated in the field with spear yield. *Acta Hortic.*, 479, 289–295.
- Dogras, C., Itskos, A. (1992). Seasonal changes of dry matter and carbohydrates in the storage roots of asparagus. *Adv. Hortic. Sci.*, 2, 74–76.
- Downton, W. J. S., Törökfalvy, W. (1975). Photosynthesis in developing asparagus plants, *Aust. J. P. Physiol.*, 2, 367–375. [<http://dx.doi.org/10.1071/PP9750367>]
- Drost, D., Wilcox-Lee, D. (2000). Tillage alters root distribution in a mature asparagus planting. *Sci. Hortic.*, 83, 187–204. [[http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00092-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00092-8)]
- Drost, D., Wilson, D. (2002). Estimating root length density and biomass in asparagus. *Acta Hortic.* 589, 287–295.
- Drost, D., Wilson, D. (2003). Monitoring root length density and root biomass in asparagus (*Asparagus officinalis*) with soil cores. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 31, 125–137.
- Dufault R. J., Greig J. K. (1983). Dynamic growth characteristic in seedling asparagus. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 108, 1026–1030.
- Ellison, J. H., Scheer, D. F., Wagner, J. J. (1960). Asparagus Yield as Related to Plant Vigor, Earliness and Sex. *Proc. J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 75, 411–415.
- Feller, C., Graefe, J., Fink, M. (2012). Bud and spear development of asparagus under constant temperature. *Agr. Sci.*, 4. [<http://dx.doi.org/10.4236/as.2012.34053>]
- Fiala, V., Jolivet, E. (1979). Variations in biochemical compositions of *Asparagus officinalis* L. roots in relation with sex expression and age. W: G. Reuters (red.), *Proceeding of the 5th International Asparagus Symposium* (s. 74–81). Geisenheim: Eucarpia.
- Fiala, V., Jolivet, E., Valadier M.H. (1982). Quantitative changes in nitrogen compounds and carbohydrates in male and female asparagus roots during the first year of growth. *Agron. J.*, 2, 735–740.
- Gąsecka, M., Krzesiński, W., Stachowiak, J., Knaflewski, M. (2009). The effect of temperature and crown size on asparagus yielding. *Folia Hortic.*, 21, 49–59.
- Gąsecka, M., Stachowiak, J., Krzesiński, W., Knaflewski, M. (2002). Zawartość węglowodanów w zielonych wypustkach szparaga w trakcie zbioru w 2001 i 2002 roku. *Olsztyn: Biul. Nauk ART*, 16, 129–131.
- Gąsecka, M., Stachowiak, J., Krzesiński, W., Knaflewski, M., Goliński, P. (2008). Changes in glucose, fructose and sucrose contents in storage roots of asparagus during vegetation period. *Veg. Crop. Res. Bull.*, 69, 145–154. [<http://dx.doi.org/10.2478/v10032-008-0029-9>]
- Guo, J. (2001). Physiological characters underpinning cultivar differences in spear yield of field-grown asparagus (*Asparagus officinalis* L.). A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Plant Physiology at the University of Canterbury.
- Guo, J., Turnbull, M. H., Jermyn, W. A. (2002a). Carbon partitioning and sucrose metabolism in two field-grown asparagus (*Asparagus officinalis*) cultivars with contrasting yield. *Funct. Plant Biol.*, 29 (4), 517–526.

- Guo, J., Jermyn, W. A., Turnbull, M. H. (2002b). Diurnal and seasonal photosynthesis in two asparagus cultivars with contrasting yield. *Crop Sci.*, 42, 399–405.
- Hargreaves Plants. (2018). Hargreaves plants – Asparagus plants and seeds. Retrieved from: <http://www.hargreavesplants.com/index.php/our-products/commercial-product-range//asparagus-plants>
- Haynes, R. T. (1987). Accumulation of dry matter and changes in storage carbohydrate and amino acid content in first 2 years of asparagus growth. *Sci. Hortic.*, 32 (1), 17–23. [[http://dx.doi.org/10.1016/0304-4238\(87\)90012-4](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4238(87)90012-4)]
- Heißner, A., Schmidt, S., Schonhof, I., Feller, C., Schreiner, M. (2006). Spear yield and quality of white asparagus as affected by soil temperature. *Eur. J. Agron.*, 25, 336–44. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2006.07.001>]
- Hikasa, Y., Imada, S. (1995). Sugar contents and ¹⁴C-photosynthates distribution in early luxuriant stage of asparagus roots. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 66, 6, 609–616.
- Hikasa, Y., Kamata, K. I. (1994). Characteristics of the nutrient absorption in asparagus plant. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 65, 1, 34–40.
- Hikasa, Y. (2000). Study on growth properties and continuous production based on sugar accumulation properties in roots of asparagus. Report of Hokkaido Prefectural Agricultural Experiment Stations, 94.
- Hirayama, M., Nishizawa, K., Hidaka, H., Fuchs, A. (1993). Production and characteristics of fructo-oligosaccharides. Inulin and inulin-containing crops. Proceedings of the international congress on food and non-food applications of inulin and inulin-containing crops, Wageningen, Netherlands, 17–21 February 1991, 347–353.
- Inagaki, N., Tsuda, K., Maekawa, S., Terabun, M. (1989). Effects of light intensity, CO₂ concentration, and temperature on photosynthesis of *Asparagus officinalis* L. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.*, 58 (2): 369–376. [<http://dx.doi.org/10.2503/jjshs.58.369>]
- Knaflewski, M. (1994). Yield prediction of asparagus cultivars on the basis of summer stalk characteristics. *Acta Hortic.*, 371, 161–168.
- Knaflewski, M., Kałużewicz, A. (1998). Wczesność i dynamika plonowania odmian szparaga w uprawie na zielone wypustki. *Zesz. Nauk. ATR Bydgoszcz*, 215, Roln., 2, 105–108.
- Knaflewski M., Krzesiński, W. (2002). Results of investigations on timing asparagus production in a temperate climate. *Acta Hortic.*, 589, 73–79.
- Knaflewski M., Krzesiński, W. (1998). Wpływ temperatury gleby na plonowanie zielonego szparaga. *Zesz. Nauk. ATR Bydgoszcz*, 215, Roln., 2, 111–114.
- Knaflewski, M., Krzesiński, W. (2004). Wpływ terminu zbiorów na plon i jakość zielonych wypustek szparaga. *Rocz. AR Pozn.*, 360, Ogrodn., 38, 97–104.
- Knaflewski, M., Krzesiński, W., Małachowski A. (1999a). *Biologia i odmianoznawstwo roślin warzywnych*. Poznań: Wyd. AR.
- Knaflewski, M., Kucharski, P., Krzesiński, W. (1999b). Timing of *Asparagus* production in a temperate-climate. *Acta Hortic.*, 479, 391–397.
- Knaflewski, M., Żurawicz, A., Krzesiński, W., Buchowski, S. (2010). Wpływ terminu końca zbiorów na cechy pędów asymilacyjnych szparaga (*Asparagus officinalis* L.). Materiały konferencyjne: Proekologiczna uprawa warzyw – problemy i perspektywy. Siedlce, 24–25 czerwca 2010, 88–89.

- Knaflewski, M. (2005). *Uprawa szparaga*. Warszawa: Hortpress.
- Kretschmer, M., Hartmann, H. D. (1979). Experiments in apical dominance with *Asparagus officinalis* L. Proceedings of Vth International Asparagus Symposium. Federal Republic of Germany, 235–239.
- Krzysiński, W., Gąsecka, M., Stachowiak, J., Knaflewski, M. (2008a). Plant age effect on asparagus yielding in terms of carbohydrate balance. *Folia Hort.*, 20 (2), 29–38.
- Krzysiński, W., Gąsecka, M., Stachowiak, J., Żurawicz, A., Knaflewski, M., Goliński, P. (2008b). The effect of plant age and crown size of asparagus on fern growth in terms of carbohydrate balance. *Acta Sci. Pol., Hortoru.*, 7 (3), 93–102.
- Lampert, E. P., Johnson, D. T., Tai, A. W., Kilpatrick, G., Antosiak, R. A., Crowley, P. H., Goodman, E. D. (1980). A computer simulation to maximize asparagus yield. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 105 (1), 37–42.
- Larsen, R. U. (1990). Plant growth modelling by light and temperature. *Acta Hortic.* 272, 235–242.
- Lentz, W. (1998). Model applications in horticulture: a review. *Sci. Hortic.*, 74, 151–174.
- Li, S. Z., Zhang, G. S. (1994). Chemical composition of white or green asparagus in different shoot parts. *Acta Agric. Zhejiangensis.*, 6, 1, 54–57.
- Licor, Light response curves. (2018). Retrieved from: https://www.licor.com/env/help/6800/Content//rapid_light_curve.html
- Liebig, H., Wiebe, H. (1982). Kurzfristige Ertragsprognosen von Bleichspargel. *Gartenbauwiss.*, 47, 91–96.
- Limseeds BV., 2018. Varieties – limgroup. Retrieved from: <https://www.limgroup.eu/en/asparagus/varieties>
- Lin, A. C., Hung, L. (1978). The photosynthesis of asparagus plant. *Memoirs of the Collage of Agriculture National Taiwan University*. Taipei, Taiwan, China, 18 (1).
- Marcelis, L., Heuvelink, E., Goudriaan, J. (1998). Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Sci. Hort.*, 74 (1–2), 83–111. [[http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00083-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00083-1)]
- Martin, S., Hartmann, H. D. (1990). The content and distribution of the carbohydrates in asparagus. *Acta Hortic.*, 271, 443–449.
- Matsubara, S. (1981). Forcing asparagus in the temperate region of Western Japan. *Scientific Reports of the Faculty of Agriculture, Okayama University*, 57, 1–10.
- McCormick, S., Geddes, B. (1996). Effect of temperatures on the quantity and quality of green asparagus spears. *Acta Hortic.*, 415, 263–269.
- McCree, K. J. (1982). Maintenance requirements of white clover at high and low growth rates. *Crop Sci.*, 22, 345–356.
- McCree, K. J. (1988). Sensitivity of sorghum grain yield to ontogenetic changes in respiration coefficients. *Crop Sci.*, 28, 114–120.
- McGrady, J., Tilt, P. (1990). A preliminary report on asparagus harvest duration, storage carbohydrates and yield in southwestern U.S.A., *Asparagus Research Newsletter*, 7 (2), 5–11.
- Moon, D. M. (1976). Yield potential of *Asparagus officinalis* L. *New Zeal. J. Exp. Agr.*, 4 (4), 435–438. [<http://dx.doi.org/10.1080/03015521.1976.10425913>]

- Nichols, M., Wooley, D. (1985). Growth studies with asparagus. Proceedings of the 6th International Asparagus Symposium. Guelph, Canada, 287–297.
- Norup, M. F., Petersen, G., Burrows, S., Bouchenak-Khelladi, Y., Leebens-Mack, J., Pires, J.C., Linder, H. P., Seberg, O. (2015). Evolution of *Asparagus* L. (*Asparagaceae*): Out-of-South-Africa and multiple origins of sexual dimorphism. *Mol. Phylogenetics Evol.*, 92, 25–44. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.ympev.2015.06.002>]
- Oguri, I., Kuwabara, H., Takanami, S., Yoshida, T., Nakajima, T. (1984). Experimental processing of green asparagus. *Research Reports of the Nagano State Laboratory of Food Technology*, 12, 102–107.
- Paschold, P. J., Artelt, B., Hermann, G. (2002). Influence of harvest duration on yield and quality of asparagus, *Acta Hortic.*, 589, 65–72.
- Penning de Vries, F. W. T., Brunsting, A. H. M., Van Laar, H. H. (1974). Products, requirements and efficiency of biosynthesis: a quantitative approach. *J. Theor. Biol.*, 45, 339–377.
- Penning de Vries F. W. T., Jansen D. M., Ten Berge H. F. M., Bakema A. (1989). Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *Simulation Monographs*, 29. Pudoc, Wageningen.
- Penning de Vries, F. W. T., Van Laar, H. H. Eds. (1982). Simulation of growth processes and the model BACROS. Simulation of plant growth and crop production. Pudoc, Wageningen.
- Poll, J., Kruistum, G. (1990). Effect of temperature on yield and quality of forced asparagus. *Acta Hortic.*, 267, 151–152.
- Pressman, E., Schaffer, A. A., Compton, D., Zamski, E. (1989). The effect of low temperature and drought on carbohydrate content of asparagus. *J. Plant Physiol.*, 134, 209–213.
- Pressman, E., Schaffer, A. A., Compton, D., Zamski E. (1993). Seasonal changes in the carbohydrate content of two cultivars of asparagus. *Sci. Hortic.*, 53 (1), 149–155. [[http://dx.doi.org/10.1016/0304-4238\(93\)90145-G](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4238(93)90145-G)]
- RAGGI VIVAI, 2018. Raggi Vivai Sapore & Salute – Professional. Strawberry, asparagus, soft fruits and mycorrhizal plants with the main species of truffles for the professional farmer. Retrieved from: <http://www.raggivivai.it/english/professional/ercole.asp>
- Robb, A. R. (1984). Physiology of asparagus (*Asparagus officinalis*) as related to the production of the crop. *New Zeal. J. Exp. Agric.*, 12, 251–260.
- Rolbiecki R. (2013). Ocena potrzeb i efektów mikronawodnień szparaga (*Asparagus officinalis* L.) na obszarze szczególnie deficytowym w wodę. Bydgoszcz: UTP.
- Sawada, E., Yukuwa, T., Imakawa, S. (1962). The assimilation of asparagus ferns. *Proceeding of the XVIth International Horticultural Congress*, 11, 479–483.
- Scott, L. E. (1954). Carbohydrate reserves of asparagus crown. *Delaware State Board Agric. Bull.* 44, University of Delaware, Newark, Delaware.
- Scott, L. E., Mitchell, J. H., McGinty, R. A. (1939). Effects of certain treatments on the carbohydrate reserves of asparagus crowns. *South Carolina Agric. Exp. Stn. Bull.*, 321.
- Shelton, D. R., Lacy, M. L. (1980). Effect of harvest duration on yield and on depletion of storage carbohydrates in asparagus roots. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 105 (3), 332–35.

- Shiomi, N. (1992). Content of carbohydrate and activities of fructosyltransferase and invertase in asparagus roots during the fructo-oligosaccharide and fructo-polisaccharide-accumulating season. *New Phytol.*, 122, 421–432.
- Shou, S., Lu, G., Huang, X. (2007). Seasonal variations in nutritional components of green asparagus using the mother fern cultivation. *Sci. Hort.*, 112: 251–257. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.048>]
- Siomos, A. S., Pontikidou, D. G. (2000). Seasonal changes of dry matter and sugars in the freshy roots of asparagus seedlings. *J. Veg. Crop Prod.*, 6 (1), 45–52.
- Stachowiak, J., Gąsecka, M., Krzesiński, W., Knaflowski, M., Golcz, A., Markiewicz, B., Kujawski, P. (2003). Zawartość cukrów w wybranych gatunkach warzyw – parametr jakości. *Olsztyn: Biul. Nauk ART*, 22, 241–244.
- Taga, T., Iwabuchi, H., Yamabuki, K., Sato, S., 1980. Analysis of cultivation environments on growth of asparagus. 1. Effects of harvesting term on the yields and the carbohydrate in the roots. *Bull. Hokkaido Prefect. Agric. Exp. Stn*, 43, 63–71.
- Tiedjens, V.A. (1924). Some physiological aspects of *Asparagus officinalis* L. *Proceedings of the Am. Soc. Hortic. Sci.*, 21, 129–140.
- Tiedjens, V. A. (1926). Some observations on roots and crown bud formation in *Asparagus officinalis*. *Proceedings of the Am. Soc. Hortic. Sci.*, 23, 189–195.
- Vertregt, N., Penning de Vries F. W. T. (1987). A rapid method for determining the efficiency of biosynthesis of plant biomass. *J. Theor. Biol.*, 128, 109–119.
- Vile, D., Garnier, E., Shipley, B., Laurent, G., Navas M. L., Roumet, C., Lavorel, S., Midgley, G. F., Poorter, H., Rutherford, M. C., Wilson, P. J., Wright, I. J. (2005). Specific leaf area and dry matter content estimate thickness in laminar leaves. *Ann. Bot.* 96 (6): 1129–1136. [<http://dx.doi.org/10.1093/aob/mci264>]
- Walker Seed. (2018). UC 157 F1 Asparagus variety walker seed. Walker Brothers, Inc. Retrieved from: <http://www.walkerseed.com/186-2/>
- Wilcox-Lee, D., Drost, D. T. (1991). Tillage reduces yield and crown, fern, and bud growth in a mature asparagus planting. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 116, 937–941.
- Wilson, D. R., Cloughley, C. G., Sinton, S. M. (1999). Model of the influence of temperature on the elongation rate of asparagus spears. *Acta Hort.*, 479, 297–304. [<http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.479.41>]
- Wilson, D. R., Cloughley, C. G., Jamieson, P. D., Sinton, S. M. (2002a). A Model of Asparagus Growth Physiology. *Acta Hort.*, 589, 297–301.
- Wilson, D. R., Cloughley, C. G., Sinton, S. M. (2002b). Decision support system for managing root carbohydrate in asparagus. *Acta Hort.*, 589, 51–58.
- Wilson, D. R., Sinton, S. M., Butler, R. C., Drost, D. T., Paschold, P.-J., Kruistum van, G., Poll, J. T. K., Garcin, C., Pertierra, R., Vidal, I., Green, K. R. (2008). Carbohydrates and yield physiology of asparagus – a global overview. *Acta Hort.*, 776, 411–425.
- Wooley, D. J., Sudjatmiko, S., Yen, Y. F., Fisher, K. J., Nichols M. A. (1996). Carbon dioxide exchange characteristics and relative growth rates of asparagus cultivars in relation to temperature. *Acta Hort.*, 415, 201–207.
- Woolley, D. J., Karno, D. J., Nichols, M. A. (2002). Effects of daylength on dry matter partitioning in asparagus. *Acta Hort.*, 585, 243–247.

- Woolley, D. J., Sudjarmiko, S., Yen, Y. F., Fisher, K. J., Nichols, M. A. (1996). Carbon dioxide exchange characteristics and relative growth rates of two asparagus cultivars in relation to temperature. *Acta Hortic.*, 415, 201–207.
- Yeager, A. F., Scott, H. (1938). Studies of mature asparagus plantings with special reference to sex survival. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 36, 513–514.
- Yen, Y. F., Nichols, M. A., Woolley, D. J. (1996). Growth of asparagus spears and ferns at high temperatures. *Acta Hortic.*, 415, 163–174.
- Yen, Y. F., Sudjarmiko, S., Fisher, K. J., Nichols, M. A., Woolley, D. J. (1993). Growth of asparagus seedlings at high temperature. W: C. G. Kuo (red.), *Adaptation of food crops to temperature and water stress* (s. 128–139). Asian Vegetable Research and Development Centre, Taiwan.
- Żurawicz, A., (2006). Wpływ terminu kończenia zbiorów na plonowanie szparaga (*Asparagus officinalis* L.). Maszynopis. Poznań: Katedra Warzywnictwa.
- Żurawicz, A., Krzesiński W., Knaflewski M. (2008). Changes in soluble solid content in green asparagus spears during harvest season. *Acta Hortic.*, 776, 435–443.