



INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

mgr inż. Beata Bartosiewicz

**Oddziaływanie stresu suszy na wskaźniki fizjologiczne i plonowanie
jęczmienia jarego na różnych gatunkach gleb**

Effect of drought stress on physiological indicators and yield of spring
barley on different soil texture types

Rozprawa doktorska

Doctoral thesis

Rozprawa doktorska przygotowana w Zakładzie Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów

IUNG-PIB w Puławach

Promotor: dr hab. Guillaume Debaene, prof. IUNG-PIB

Promotor pomocniczy: dr hab. Jan Jadczyzyn

Puławy 2023

SPIS TREŚCI

Spis treści	2
1.Wstęp, hipoteza oraz cele badań	4
2. Przegląd literatury	7
2.1. Oddziaływanie zmian klimatycznych na produkcję rolniczą	7
2.2. Wpływ uziarnienia gleby na zdolności retencyjne gleby	9
2.3. Charakterystyka i znaczenie gospodarcze jęczmienia	14
2.4. Oddziaływanie stresu suszy na rozwój i plonowanie roślin	15
2.5. Wpływ stresu suszy na wykorzystanie azotu z gleby przez rośliny	17
2.6. Znaczenie gleby w rozwoju i plonowaniu jęczmienia jarego	18
3. Metodyka badań	19
3.1. Doświadczenie wazonowe	19
3.2. Plon i elementy plonu	26
3.3. Wskaźniki fizjologiczne	26
3.3.1. Aparatura pomiarowa	27
3.4. Zawartość azotu w suchej masie ziarna i słomy	28
3.5. Analiza statystyczna	30
4. Warunki prowadzenia doświadczenia	31
5.Wyniki	32
5.1. Długość okresu wegetacji oraz poszczególnych faz wzrostu i rozwoju	32
5.2. Plon i elementy plonu	35
5.2.1. Plon ziarna z wazonu	35
5.2.2. Liczba kłosów z wazonu	38
5.2.3. Liczba ziaren z wazonu	40
5.2.4. Masa tysiąca ziaren (MTZ)	42
5.2.5. Plon słomy z wazonu	43
5.2.6. Długość pędów głównych	45
5.2.7. Plon części nadziemnej z wazonu	48
5.2.8. Wskaźnik zbioru (HI -Harvest Index)	49
5.2.9. Zależności korelacyjne pomiędzy plonem i elementami struktury plonu	52
5.3. Wskaźniki fizjologiczne	52

Spis treści

53.1. Wskaźniki wymiany gazowej.....	52
5.3.1.1. Intensywność fotosyntezy netto.....	52
5.3.1.2. Przewodnictwo szparkowe.....	58
5.3.1.3. Intensywność transpiracji.....	63
5.3.1.4. Podsumowanie wskaźników wymiany gazowej.....	68
5.3.2. Indeks zieloności liścia SPAD.....	68
5.4. Zawartość i pobranie azotu.....	74
5.4.1. Zawartość azotu w suchej masie ziarna.....	74
5.4.2. Zawartość azotu w suchej masie słomy.....	75
5.4.3. Pobranie azotu przez ziarno jęczmienia.....	78
5.4.4. Pobranie azotu przez część nadziemną roślin.....	79
5.4.5. Zależności korelacyjne między zawartością azotu w ziarnie jęczmienia i indeksem zieloności liści (SPAD).....	81
6. Dyskusja.....	82
6.1. Wpływ stresu suszy oraz gatunku gleby na plon i elementy plonu jęczmienia jarego.....	82
6.2. Oddziaływanie krótkotrwałych stresów suszy oraz różnych gatunków gleb na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych.....	87
6.3. Oddziaływanie stresu suszy oraz różnych gatunków gleb na Zawartość i pobranie azotu przez rośliny jęczmienia.....	91
7. Podsumowanie i wnioski.....	93
8. Bibliografia.....	96
9. Aneksy.....	113
9. Streszczenie.....	117
10. Abstract.....	119
11. Spis rysunków, fotografii i tabel.....	121
11.1. Spis rysunków.....	121
11.2. Spis fotografii.....	123
11.3. Spis tabel.....	123
12. Oświadczenie promotora, promotora pomocniczego i autora rozprawy doktorskiej.....	127

1. WSTĘP, HIPOTEZA ORAZ CELE BADAŃ

Susza, mimo że jest ekstremalnym zjawiskiem pogodowym, mającym charakter anomalii atmosferycznej (Paulo i Pereira 2006), jest naturalną cechą klimatu, mogącą pojawiać się we wszystkich jego strefach (Wang i in. 2014; Kebede i in. 2019) powodując duże straty w plonach roślin uprawnych i dochodach rolników, a także szkody w środowisku przyrodniczym (Kuś 2016; Majewski 2017). W ujęciu rolniczym, susza oznacza długotrwały niedostatek wody glebowej w danym miejscu, w pewnym przedziale czasu, powodujący pogorszenie warunków wzrostu i rozwoju oraz zmniejszenie plonu roślin uprawnych (Kebede i in. 2019; Łabędzki 2006). Określenie definicji suszy nie jest jednoznaczne. Jej cechy i przebieg znacząco różnią się w zależności od regionu (Kręgiel i Jarosińska 2009). Najmniejsze ilości opadów występują w Polsce centralnej, w Wielkopolsce i na Kujawach (Żyłowska i Kozyra 2022), co w połączeniu z dużym udziałem gleb bardzo podatnych i podatnych na suszę dodatkowo potęguje jej efekt i sprawia, że w rejonach tych susza przynosi największe szkody (www.susza.iung.pulawy.pl).

W ostatnich latach zwiększa się częstotliwość występowania okresowych niedoborów wody, które obejmują znaczne obszary naszego kraju (Doroszewski i in. 2014; Górski i in. 2008) i powodują duże straty w produkcji większości gatunków roślin uprawnych (Anjum i in. 2011; Górski i in. 2008; Rahdari i Hoseini 2012). Susza najczęściej rozpoczyna się w okresie wiosenno-letnim i zbiega się z okresami największego zapotrzebowania roślin na wodę (Demidowicz i in. 1996; Doroszewski i in. 2014). Stres suszy powoduje zmniejszenie plonu jęczmienia jarego poprzez negatywny wpływ na jego komponenty tj. liczbę roślin na jednostkę powierzchni, liczbę kłosów i liczbę ziaren z rośliny oraz masę ziarna z rośliny (Ajalli i Salehi 2012; Haddadin 2015; Pecio i Wach 2015).

Ze względu na słabo rozwinięty system korzeniowy oraz krótki okres wegetacji (Noworolnik 2008a), dla rozwoju jęczmienia w trakcie suszy kluczowe znaczenie ma zdolność gleby do magazynowania wody. Większymi zdolnościami retencyjnymi cechują się utwory drobnoziarniste (Thompson i Troeh 1978), gdyż wraz ze wzrostem zawartości frakcji pylastych i ilastych zwiększa się wartość polowej pojemności wodnej (PPW)

1. Wstęp, hipoteza oraz cele badań

(Hewelke i in. 2013). Wśród gleb polskich przeważają gleby bardzo lekkie i lekkie (Igras i Lipiński 2006; Małecka i in. 2012) – takie jak: piasek luźny, piasek luźny pylasty, piasek słabogliniasty, piasek słabogliniasty pylasty, piasek gliniasty lekki, piasek gliniasty lekki pylasty, piasek gliniasty mocny, piasek gliniasty mocny pylasty (www.susza.iung.plawy.pl), na których susza rozpoczyna się znacznie wcześniej niż na glebach ciężkich (Wójcik i in. 2018).

Gospodarka wodna roślin jest również ściśle powiązana z ich gospodarką mineralną. Woda umożliwia pobieranie i transport składników pokarmowych do różnych części rośliny (Marshner 2012), zaś jej deficyt w okresie wegetacji sprawia problemy w pobieraniu i gospodarowaniu nawozami, zmniejszając ich efektywność (Sułek i Leszczyńska 2016). W tym kontekście szczególnie ważny dla jęczmienia jarego jest azot, który jest składnikiem łatwo przemieszczającym się w środowisku glebowym. W związku z tym ważne jest, aby nie doprowadzić do jego nadmiaru w glebie i w konsekwencji zwiększonego ryzyka wymywania do wód gruntowych (Liszewski 2008; Noworolnik 2013; Sułek i in. 2007).

W ostatnich latach susza stała się kluczowym czynnikiem ograniczającym rozwój produkcji rolnej. Prognozy zmian klimatu wskazują, że do końca obecnego stulecia susza będzie stale i znacząco nasilać się (Bu i in. 2018; Choat i in. 2012; Sun i in. 2020 a). Dlatego też w Polsce i na świecie realizowanych jest coraz więcej badań dotyczących wpływu stresu suszy na warunki wzrostu i rozwoju roślin.

Dotychczasowe wyniki badań potwierdzają negatywny wpływ deficytu wody na plon oraz wskaźniki fizjologiczne jęczmienia jarego (Ajalli i Salehi 2012; Albrizio i in. 2010; Cossani i in. 2009; Ferrante i in. 2008; Haddadin 2015; Hossain i in. 2012, Kumar i in. 2018; Pecio i Wach 2015; Svobodová i Míša 2004; Zare i in. 2011). Nie dają jednak możliwości oceny wpływu uziarnienia gleby na plon jęczmienia i wartości wskaźników fizjologicznych, a także na zawartość azotu w ziarnie i słomie oraz pobranie składnika przez rośliny tego zboża w warunkach stresu suszy.

1. Wstęp, hipoteza oraz cele badań

W pracy doktorskiej postawiono następującą hipotezę badawczą: **Wpływ stresu suszy na wartości wskaźników fizjologicznych i rozwój oraz plonowanie jęczmienia jarego jest zależny od uziarnienia gleby.**

Dla zweryfikowania hipotezy badawczej sformułowano następujące cele badawcze:

1. Określenie wpływu krótkotrwałych stresów suszy na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych oraz plon i elementy plonu jęczmienia jarego.
2. Ocena wpływu gatunku gleby na wartości wskaźników fizjologicznych i plonowanie jęczmienia jarego w warunkach stresu suszy.
3. Określenie wpływu stresów suszy i gatunku gleby na zawartość azotu w ziarnie i słomie jęczmienia oraz pobranie składnika przez ziarno i część nadziemną roślin.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. ODDZIAŁYWANIE ZMIAN KLIMATYCZNYCH NA PRODUKCJĘ ROLNICZĄ

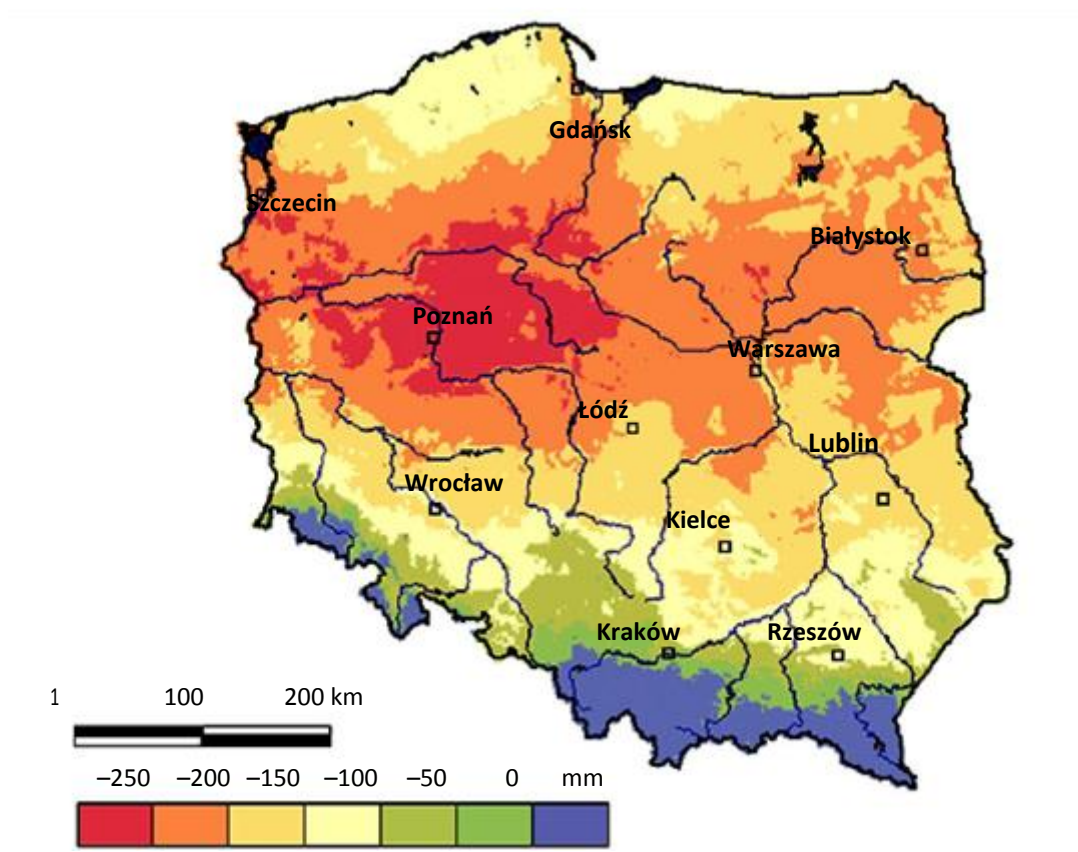
W wyniku zmian klimatycznych, w trakcie wegetacji, coraz częściej obserwuje się okresy bezopadowe, bądź okresy z opadami znacznie mniejszymi niż średnie z wielolecia (Doroszewski i in. 2012; Eitzinger i in. 2012; Mizak i in. 2011), którym dodatkowo towarzyszy wysoka temperatura (Ceccarelli i Grando 1996). W ciągu najbliższych 30 lat średnia temperatura powierzchni Ziemi będzie wzrastać o około 0,2°C na dekadę (Solomon 2007). Szacuje się, że do końca XXI wieku średnia temperatura globalna wzrośnie o około 2,5 - 4,5°C (Bernstein i in. 2008; Wang i in. 2018). Z dostępnych informacji wynika, że w XX wieku średnia roczna temperatura powietrza dla obszaru Polski wzrosła o około 0,9°C (Górski 2006). Z kolei analiza notowań stacji meteorologicznych wykonana przez Żyłowską i Kozyrę (2022) wykazała, że w latach 2001-2020 średnia roczna temperatura powietrza w naszym kraju wynosiła 9°C i wzrosła o 1°C, w porównaniu do wielolecia 1971–2000. Na podstawie modelu wpływu ocieplenia klimatu na rozwój roślin uprawnych udowodniono, że wzrost temperatury o 1°C na 100 lat przyspiesza dojrzewanie roślin zbożowych w Polsce o 1 tydzień (Górski i in. 2008). Taka sytuacja z jednej strony zwiększy potencjał produkcyjny rolnictwa, ponieważ powstaną warunki sprzyjające uprawie roślin ciepłolubnych (Mirkowska 2009; Nieróbca i in. 2013), z drugiej zaś stwarza zagrożenie dla upraw tj. długotrwałe susze, fale upałów (Kundzewicz i Kozyra 2011), występowanie większej ilości szkodników oraz nasilenie występowania chorób (Mirkowska 2009).

Miarą oceny warunków wilgotnościowych gleby jest klimatyczny bilans wodny (KBW). Jest to wskaźnik określający różnicę pomiędzy przychodami wody w postaci opadów, a stratami w procesie parowania gleb i roślin, czyli tzw. ewapotranspiracją potencjalną (Kozyra i Górski 2008; Radzka 2014). Obserwowany w ostatnich latach wzrost usłonecznienia tj. liczby godzin ze słońcem (Górski i Zaliwski 2002), w połączeniu ze wzrostem temperatury, wpływa na intensyfikację parowania, zmniejszając tym samym zawartość wody w glebie (Kozyra i in. 2009; Kuczyńska i in. 2019). Według Kozyry i Górskiego (2008) oraz Doroszewskiego i in. (2012; 2014) w ostatnich latach, szczególnie

2. Przegląd literatury

w okresie wiosennym i wczesnym latem, wskaźnik KBW wykazywał tendencję spadkową, a w okresie kwiecień – wrzesień dodatnie wartości KBW występowały jedynie w rejonach górskich i podgórskich (Rys. 1).

W Polsce rolnictwo bazuje głównie na wodach opadowych, dlatego braki opadów są realnym zagrożeniem dla produkcji rolniczej (Staniak i Fariaszewska 2014). Za najkorzystniejsze dla roślin uznaje się warunki, kiedy wartości KBW przyjmują niewielkie wartości ujemne, takie jak w południowym pasie Polski (Kozyra i Górski 2008). Mniejsze wartości, obserwowane na znacznym obszarze kraju powodują szereg negatywnych zmian (Doroszewski i in. 2012; 2014). Tak było w latach: 1963, 1964, 1975, 1976, 1979, 1983, 1989, 1992-1994, 2000, 2003, 2005, 2006 i 2008, gdy niedobór opadów w połączeniu z wysokimi temperaturami, spowodował znaczne straty w plonach zbóż jarych (Doroszewski i in. 2014).



Rys. 1. Klimatyczny bilans wodny w Polsce od kwietnia do września (Górski i Zaliwski 2002); opracowanie mapy: Jerzy Kozyra

Na podstawie dostępnych informacji oszacowano, że w przestrzeni ostatnich 600 lat susze w Polsce występowały z częstotliwością od 19 do 25 razy w każdym 100- leciu (Kuś

2. Przegląd literatury

2016), zaś w ostatnim okresie zjawisko uległo nasileniu i w latach 2001 -2012 susze wystąpiły 5-krotnie (Doroszewski i in. 2012). Nasilenie częstotliwości występowania suszy w naszym kraju potwierdził również Raport Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej z 2006 r., według którego częstość występowania lat posusznych w okresie 1951–1981 wynosiła 6 (średnio co 5 lat), natomiast w okresie 1982–2006 aż 13 (średnio co 2 lata). Obserwowana tendencja do zwiększania się temperatury powietrza i zmieniające się warunki parowania spowodowały, że w latach 1971–2000 powierzchnia regionu Polski umiarkowanie suchego zwiększyła się z 13% do 20%, zaś powierzchnia regionu wilgotnego zmniejszyła się z 32% do 10% (Ziarnicka-Wojtaszek 2009).

Zgodnie z najbardziej prawdopodobnymi prognozami zmian klimatu, w następnych kilkudziesięciu latach obserwować będziemy zmniejszenie liczby dni deszczowych (Trenberth 2011; Vadez i in. 2011) oraz sumy opadów atmosferycznych w okresie wiosenno-letnim (Demidowicz i in. 1996; Szwed 2018). Temperatura powietrza będzie natomiast wzrastać w zakresie 0,1°C – 0,4°C na 10 lat (Alcamo 2007; Żyłowska i Kozyra 2022), w wyniku czego do roku 2100 średnia temperatura powietrza może wzrosnąć od 1,4 - 2,5°C do nawet 5,4 - 5,8°C (Alcamo 2007; Szwed 2018). Taka sytuacja stwarza niebezpieczeństwo pogłębiania deficytu wody, zwłaszcza w okresie letnim, czyli największego zapotrzebowania na wodę (Ciscar 2012; Kozyra i in. 2009; Lipiec i in 2009; Wigley i Raper 2001) oraz tego, że ekstremalne zjawiska pogodowe, takie jak susza, na stałe wpiszą się w cechy klimatu naszego kraju. W 2018 r. Food and Agriculture Organization poinformowała, że 83 % szkód i strat w rolnictwie w latach 2006 - 2016 było spowodowane suszą (FAO 2018).

2.2. WPLYW UZIARNIENIA GLEBY NA ZDOLNOŚCI RETENCYJNE GLEBY

Woda na kuli ziemskiej znajduje się w ciągłym obiegu, zwanym cyklem hydrologicznym. Dopytywanie energii słonecznej powoduje parowanie wody z powierzchni gleby, roślin oraz zbiorników wodnych. Po skropleniu w atmosferze, cząstki wody opadają na powierzchnię ziemi w postaci deszczu, śniegu, gradu i rosy (Kuś 2016). Część wody opadowej spływa i zasila rzeki, część pod wpływem działania sił grawitacyjnych przesiąka przez glebę i jest w niej akumulowana (Kacperska 2002), reszta zaś infiltruje w głąb profilu glebowego i odbudowuje zasoby wód podziemnych. Szacuje się, że

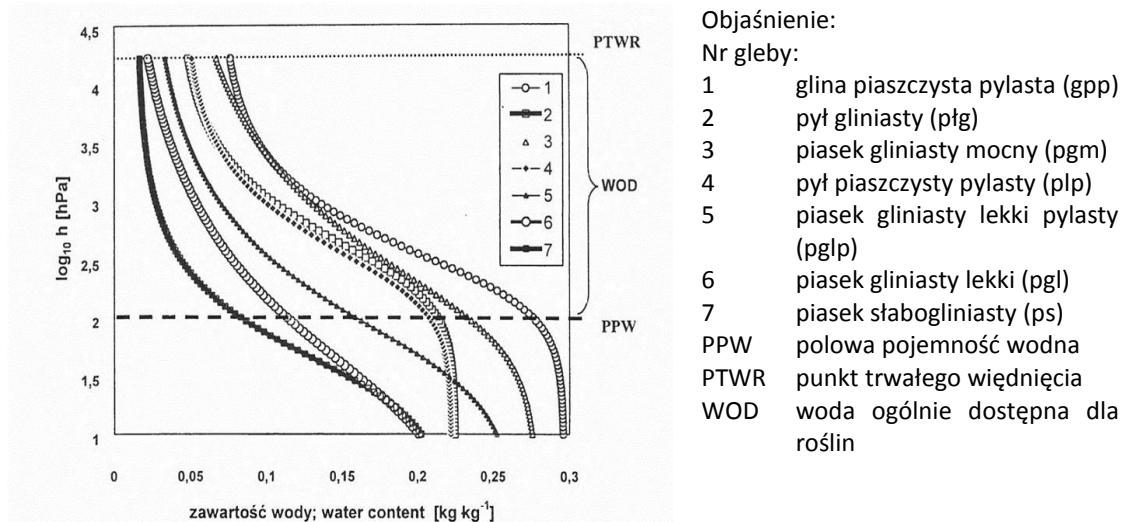
2. Przegląd literatury

w Polsce rolnictwo zużywa 10% zasobów wodnych, przy czym specyficzną cechą rolnictwa jest sezonowe zróżnicowanie w zapotrzebowaniu na wodę, którego około 80% przypada na lato, czyli okres kiedy wody jest najmniej (Kuś 2016).

Gleby charakteryzują się szerokim zakresem zróżnicowania cech decydujących o ich zdolnościach retencyjnych (Thompson i Troeh 1978), na które w największym stopniu wpływają: uziarnienie, zawartość materii organicznej i struktura gleby. Istotny wpływ ma również miąższość zalegania poszczególnych poziomów genetycznych (Hewelke i in. 2013). Spośród wyżej wymienionych właściwości szczególne znaczenie ma udział frakcji spławialnej, a w szczególności frakcji ilastej w składzie granulometrycznym, ponieważ zdolność gleby do zatrzymywania wody jest ściśle skorelowana z wielkością powierzchni cząstek glebowych. Im mniejsze są cząsteczki gleby, tym większa jest ich łączna powierzchnia, na której mogą utrzymać się błonki wody. Dlatego gleby zwarte utworzone z glin i ilów posiadają nawet 2,5 krotnie większe możliwości retencyjne niż gleby lekkie utworzone z utworów piaszczystych (Ślusarczyk 1979; Thompson i Troeh 1978).

Związek pomiędzy siłą związania wody w glebie (wyrażoną w jednostkach ciśnienia hPa), a ilością wody zawartej w glebie (wyrażoną w procentach wilgotności wagowej lub objętościowej), ma charakter krzywej, zwanej krzywą retencyjności wody (sorpcji wody) w glebie (krzywa pF). Krzywa pF umożliwia uzyskanie informacji o możliwościach retencyjnych różnych utworów glebowych oraz o dostępności tzw. wody ogólnie dostępnej (WOD) dla roślin (Rys. 2). WOD jest różnicą pomiędzy połową pojemnością wodną oraz punktem trwałego wędnięcia roślin ($WOD = PPW - PTWR$) i zawiera się w przedziale od pF 2-2,5 do pF 4,2 (Czyż i Dexter 2015; Paluszek 2011; Thompson i Troeh 1978). Część zmagazynowanej przez glebę wody jest tak silnie związana z cząsteczkami gleby, że rośliny nie są w stanie jej pobrać (Beltrano i Ronco 2008; Czyż i Dexter 2015). Krzywa pF pozwala również określić wilgotność gleby, przy której następuje zahamowanie wzrostu (pF 3,7) oraz punktu trwałego wędnięcia roślin (pF 4,2) (Czyż i Dexter 2015; Paluszek 2011; Thompson i Troeh 1978).

2. Przegląd literatury



Rys. 2. Charakterystyka retencji wodnej gleb w warstwie 0 - 20 cm, wykreślona jako logarytm dziesiąty wartości ciśnień ssących gleb (h) (hPa) w funkcji zawartości wody ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby) (Czyż i in. 2003)

Charakterystyki retencji wodnej gleb w zakresie ciśnień ssących gleby od 10 do 15000 hPa wskazują, że najlepszymi warunkami wodnymi dla wzrostu roślin charakteryzują się gleby o większej zawartości części pylastych i ilastych (Czyż i in. 2003).

Według Walczaka i in. (2002) PPW określona dla $pF = 2,2$ gleb uprawnych Polski mieści się w szerokim zakresie (od 0,039 do 0,455 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$), który jest wynikiem stosunku ilościowego poszczególnych frakcji granulometrycznych (Hewelke i in. 2013). Wraz ze wzrostem zawartości frakcji pylastych i ilastych wartość PPW wzrasta (Hewelke i in. 2013; Ślusarczyk 1979). Najmniejszą połową pojemnością wodną, bo w zakresie 0,050 - 0,100 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ charakteryzują się gleby wytworzone z piasków luźnych i słabogliniastych. Gleby wytworzone z piasków gliniastych oraz z glin lekkich i średnich najczęściej charakteryzują się PPW w zakresie od 0,200 do 0,300 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, natomiast PPW gleb wytworzonych z glin lekkich i pyłów wynosi od 0,250 - 0,300 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Z kolei gleby wytworzone z lessu osiągają wartości PPW w przedziale 0,300 - 0,400 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Najwyższe wartości PPW, wynoszące od 0,350 do 0,400 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ stwierdzono dla gleb wytworzonych z iltów (Walczak i in. 2002 a; 2002 b).

Informacje o składzie granulometrycznym profilu glebowego i podatności różnych utworów na suszę pozwoliły dokonać podziału gleb Polski na cztery kategorie podatności gleb na suszę rolniczą (Tab. 1) (Dz.U. nr 75, poz. 480, 2010; www.susza.iung.pulawy.pl).

2. Przegląd literatury

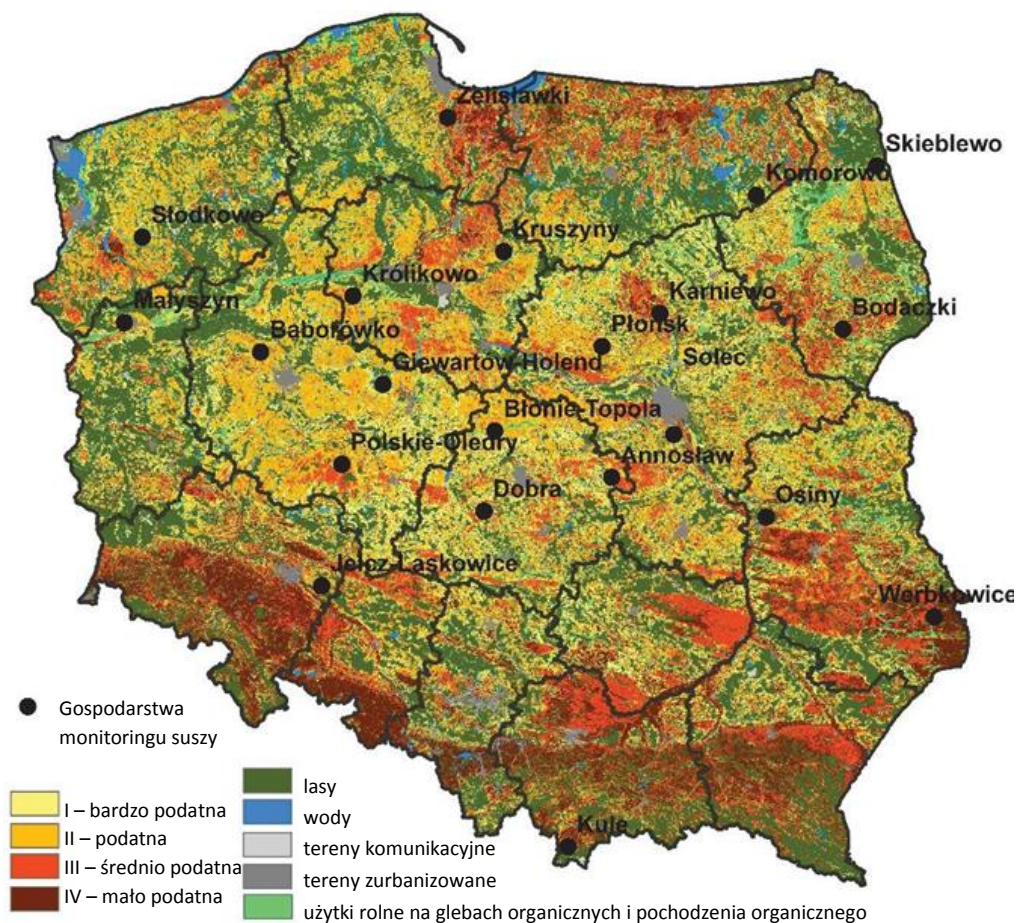
Tab. 1. Zróżnicowanie pokrywy glebowej Polski według kategorii podatności gleb na suszę (Dz.U. nr 75, poz. 480, 2010; www.susza.iung.pulawy.pl)

Kategoria gleby	Podatność na suszę	Gatunek gleby
Kategoria I	bardzo podatne	piasek luźny - pl piasek luźny pylasty - plp piasek słabogliniasty - ps piasek słabogliniasty pylasty - psp
Kategoria II	podatne	piasek gliniasty lekki - pgl piasek gliniasty lekki pylasty - pglp piasek gliniasty mocny - pgm piasek gliniasty mocny pylasty - pgmp
Kategoria III	średnio podatne	glina lekka - gl glina lekka pylasta - glp pył gliniasty - pług pył zwykły - płuż pył piaszczysty - pług
Kategoria IV	mało podatne	glina średnia - gs glina średnia pylasta - gsp glina ciężka - gc glina ciężka pylasta - gcp pył ilasty - pfi ił - i ił pylasty - ip

Większość gleb mineralnych Polski wytworzona została z utworów piaszczystych, charakteryzujących się zawartością frakcji spławialnej nie przekraczającą 20% i średnią zawartością próchnicy mniejszą niż 2%, co oznacza, że ich zdolności retencyjne są znacząco ograniczone. Małe możliwości zatrzymywania wody powodują również zwiększoną podatność gleb na suszę rolniczą (Jadczyzyn i Bartosiewicz 2021). Udział poszczególnych kategorii podatności gleb na suszę rolniczą w skali kraju przedstawiono na rysunku nr 3.

Gleby bardzo lekkie i lekkie, charakteryzujące się bardzo niską zdolnością retencjonowania wody w profilu glebowym i szybciej ulegające przesuszeniu, w porównaniu do gleb średnich i ciężkich, stanowią 60% gruntów ornych naszego kraju (Igras i Lipiński 2006; Jadczyzyn i Bartosiewicz 2021). W agroklimatycznych warunkach Polski, susza na tych glebach rozpoczyna się zwykle 10 – 15 dni wcześniej niż na glebach ciężkich (Wójcik i in. 2018), w związku z tym zwiększa się także częstotliwość jej występowania (Tab. 2 i 3).

2. Przegląd literatury



Rys. 3. Mapa kategorii podatności gleb na suszę rolniczą (Jadczyzyn i Bartosiewicz 2020); opracowanie mapy: Jan Jadczyzyn

Tab. 2. Częstotliwość występowania suszy rolniczej w Polsce w latach 1961-2010 dla zbóż jarych na glebach I-IV kategorii (Doroszewski i in. 2014)

Okres	Kategoria gleby			
	I	II	III	IV
1961-1970	8	4	1	0
1971-1980	7	7	2	0
1981-1990	6	5	2	1
1991-2000	9	5	3	2
2001-2010	10	8	5	1

2. Przegląd literatury

Tab. 3. Częstotliwość występowania suszy średnio w latach 1961-2010 na glebach kategorii I-IV (Doroszewski i in. 2014)

Kategoria gleby	Częstotliwość występowania suszy (średnio w latach)
I	1,1
II	1,4
III	2,6
IV	4,5

2.3. CHARAKTERYSTYKA I ZNACZENIE GOSPODARCZE JĘCZMIENIA

Jęczmień (*Hordeum vulgare* L.) jest jedną z najstarszych roślin uprawnych (Boanta i in. 2019). Badania archeologiczne dowodzą, że człowiek wykorzystuje jęczmień jako pożywienie już od 15 tysięcy lat oraz, że jest jednym z pierwszych zbóż, które zostały udomowione (Nevo i in. 1986; Pecio 2002). Geograficznie, jęczmień wywodzi się z trzech starożytnych centrów uprawy, mianowicie: z ośrodka chińskiego, z Bliskiego Wschodu oraz z ośrodka etiopsko-erytrejskiego (Abisynia). Z rejonów Bliskiego Wschodu rozprzestrzeniał się na coraz większe obszary Europy, również na obszar Polski (Budzyński i Szempliński 1999).

Jęczmień jest gatunkiem roślinnym, który należy do rodziny wiechlinowatych (*Poaceae*), do plemienia pszenicowatych (*Triticeae*) i podplemienia jęczmieniowatych (*Hordeinea*). Pod względem rodzaju dzieli się na dwa typy: ssp. *Spontanea* – są to formy dzikie o łamliwej osi kłosa i ziarnie oplewionym oraz ssp. *Cerealia* - formy uprawne, o niełamliwej osi kłosa oraz ziarnie oplewionym bądź nagim (Gąsiorowski 2010).

Jęczmień, pod względem areалу upraw, jest czwartą, po pszenicy, ryżu i kukurydzy rośliną zbożową na świecie. Ze względu na dobre parametry jakościowe (zawartość białka ponad 11% oraz niską zawartość substancji antyżywniowych), ziarno jęczmienia jest doskonałą paszą dla wszystkich zwierząt gospodarskich, a dzięki stosunkowo dużej zawartości kwasu palmitynowego i stearynowego korzystnie wpływa na smakowitość oraz trwałość produktów zwierzęcych: mleka, masła, mięsa, słoniny (Leszczyńska i Noworolnik 2012; Liszewski 2008; Noworolnik 2014). Również słoma, ze

2. Przegląd literatury

względu na wyższą zawartość białka, ma lepszą wartość paszową niż inne zboża, z wyjątkiem owsa (Noworolnik 2014). Jęczmień uprawiany jest w dwóch formach: ozimej i jarej. W strukturze zasiewów zbóż Polski dominuje forma jara, której powierzchnia uprawy w 2020 roku wynosiła 407 tys. ha, co stanowiło 63% jego areału uprawy ogólnej oraz 5,5% struktury zasiewów zbóż (GUS - Rocznik Statystyczny 2021). Mimo, że powierzchnia uprawy jęczmienia jarego w ciągu ostatnich 10 lat zmniejszyła się o ponad 50%, to wciąż jest on zbożem o dużym znaczeniu gospodarczym (Chojnacka i in. 2018). Ziarno jęczmienia wykorzystywane jest głównie na cele paszowe oraz do produkcji słodu, w mniejszym stopniu zaś na kasze (Chojnacka i in. 2018; Yawson i in. 2020). Na cele paszowe można uprawiać wszystkie odmiany jęczmienia, również odmiany browarne (Chojnacka i in. 2018).

Wyprodukowanie wysokiej jakości ziarna jęczmienia, charakteryzującego się dobrą przydatnością paszową, warunkowane jest przez czynniki środowiskowe i agrotechniczne oraz cechy genetyczne i procesy fizjologiczne roślin (Rozbicki 2019). Zmiany klimatyczne, jak również będące ich skutkiem coraz częściej występujące susze, spowodowały widoczny postęp w hodowli jęczmienia pastewnego. Powstały odmiany coraz lepiej plonujące i bardziej odporne na niesprzyjające warunki siedliskowe (Chojnacka i in. 2018; Friedt 2011). Obecnie na liście krajowego rejestru znajduje się 76 odmian jęczmienia jarego. Na terytorium Unii Europejskiej do obrotu dopuszczone są również odmiany znajdujące się we Wspólnotowym Katalogu Odmian Roślin Rolniczych (CCA) (coboru.gov.pl).

2.4. ODDZIAŁYWANIE STRESU SUSZY NA ROZWÓJ I PLONOWANIE ROŚLIN

Coraz częściej występujące niedobory wody, które niejednokrotnie obejmują swym zasięgiem znaczne obszary kraju (Lipiec i in. 2013; Doroszewski i in. 2014), stanowią jeden z najpowszechniej występujących stresów środowiskowych dla roślin uprawnych (Alquadah i in. 2011; Anjum i in. 2011; Athar i Ashraf 2009; Barnabas i in. 2008; Carter i in. 2019; Ceccarelli i in. 2010; Datta i in. 2011; Farooq i in. 2009; Fathi i Tari 2016; Forster 2004; Hossain i Uddin 2011; Khalili i in. 2013; Wang i in. 2016; Alghabari i Zahid Ihsan 2018). Susza w Polsce zazwyczaj zbiega się z okresami największego zapotrzebowania roślin na wodę (Demidowicz i in. 1996; Doroszewski i in. 2014), a jej

2. Przegląd literatury

działanie, które początkowo ujawnia się na poziomie komórkowym, w konsekwencji wpływa na funkcjonowanie całej rośliny (Farooq i in. 2009; Grzebisz i in. 2013).

Aby organy powiększyły swój rozmiar, z przestrzeni międzykomórkowej do wnętrza komórek musi zostać przetransportowana woda (Forouzesi i in. 2013). W warunkach suszy zmniejsza się pobranie wody z gleby, w związku z czym zmniejsza się także zawartość wody w roślinach. Brak wody prowadzi do ograniczenia procesu transpiracji i zamykania aparatów szparkowych (Breda i in. 2006; Flexas i in. 2004; Jastrzębska i in. 2016). To z kolei powoduje redukcję potencjału wodnego i turgoru liści (Sayar i in. 2008) oraz skutkuje ograniczeniem pobierania dwutlenku węgla z otoczenia (Abid i in. 2018; Anjum i in. 2011; ul-Haq i in. 2010) i w konsekwencji spowolnieniem procesu fotosyntezy (Anjum i in. 2017; Akinci i Lösel 2012; Kaczmarek i in. 2017; Kadam i in. 2014; Kapoor i in. 2020; Sun i in. 2020 b). Osłabienie aktywności fotosyntetycznej roślin w warunkach ograniczonej dostępności wody może być powodowane również mechanizmami nieszparkowymi (Kamanga i in. 2018; Shanggaun i in. 1999; Yordanov i in. 2003; Zlatev i Yordanov 2004), do których zalicza się zmiany w syntezie chlorofilu, zmiany funkcyjne i strukturalne w chloroplastach oraz zaburzenia w procesie akumulacji, transporcie i dystrybucji asymilatów w roślinie (Anjum i in. 2011). Ograniczenie asymilacji węgla hamuje przyrost biomasy roślin (ul-Haq i in. 2010). W wyniku zwiększonej w warunkach suszy alokacji węgla w systemie korzeniowym (Sanaullah i in. 2011), redukcja wzrostu w większym stopniu dotyczy części nadziemnych niż korzeni (Mostafavi 2011). Łagodny niedobór wody w glebie najczęściej wywołuje jedynie zmiany biochemiczne w roślinach, które umożliwiają przystosowanie się do życia w nowych warunkach, natomiast ostry stres suszy może prowadzić do funkcjonalnych i strukturalnych zmian w aparacie fotosyntezy, co w efekcie ogranicza wzrost i tym samym produktywność roślin (Akinci i Lösel 2012; Jedmowski i in. 2013; Kalaji i in. 2016; Lawlor i Tezara 2009; Lee i in. 2016; Yang i in. 2021). Szacuje się, że stresy abiotyczne wywołane suszą, zasoleniem oraz ekstremalnymi temperaturami wpływają na zmniejszenie plonów uprawianych roślin zbożowych o 50% (Bray i in. 2000; Hussain i in. 2019; Rehman i in. 2005).

Jęczmień jary jest zbożem wrażliwym na stres suszy, nawet jeśli jest on przejściowy (Pecio i Wach 2015). Wymagania wodne jęczmienia zwiększają się w miarę przyrostu masy i transpiracji, a skutki jakie wywołuje deficyt wody w jego uprawie,

2. Przegląd literatury

zależne są od stopnia rozwoju roślin (Ahmad i in. 2009; Brisson i in. 2002; Chmura i in. 2009; Liszewski 2008; Pecio 2002; Rajala i in. 2011) oraz od ilości i rozkładu opadów w okresie wegetacji (Chmura i in. 2009). Niedobór wody w fazie kielkowania powoduje ograniczenie wschodów (Budzyński i Szempliński 1999; Chmura i in. 2009; Křen i in. 2014), natomiast w fazie krzewienia hamuje rozwój części nadziemnych oraz korzeni, co skutkuje zmniejszeniem liczby źdźbeł, kłosów oraz liczby ziaren w kłosie (Budzyński i Szempliński 1999; Chmura i in. 2009). Deficyt wody w fazie strzelania w źdźbło zmniejsza przyrost organów wegetatywnych, co z kolei skutkuje małym plonem ziarna i słomy. Stres suszy w fazie kłoszenia i kwitnienia powoduje słabe wykształcenie kłosa, zmniejszenie liczby ziaren w kłosie oraz powstawanie niedogonów. Nalewanie ziarniaków jest okresem, w którym woda niezbędna jest w celu dobrego wypełnienia ziarna, dlatego brak wody w fazie dojrzałości mleczonej objawia się słabym wykształceniem ziarna z większą zawartością plewek (Budzyński i Szempliński 1999; Chmura i in. 2009; Sallam i in. 2019). Przeprowadzone w różnych ośrodkach naukowych badania wykazały, że plon jęczmienia jarego w największym stopniu ogranicza niedobór wody w fazach strzelania w źdźbło i kłoszenia oraz wykształcania i nalewania ziarna (Al-Ajloun i in. 2016; Appiah i in. 2023; Haddadin 2015; Pecio i Wach 2015).

2.5. WPŁYW STRESU SUSZY NA WYKORZYSTANIE AZOTU Z GLEBY PRZEZ ROŚLINY

Azot pełni kluczową rolę w procesach wzrostu roślin i jest jednym z najważniejszych składników plonotwórczych (Andersson i Holm 2011; Beathgen i in. 1995; Gaj 2013; Liszewski 2008; Moreno i in. 2003; Noworolnik 2013; Noworolnik i Leszczyńska 2002, 2005; Příklad i in. 2005; Shejbalová i in. 2014). Dlatego też nawożenie tym składnikiem jest powszechnie stosowanym zabiegiem agrotechnicznym w uprawach (Andersson i Holm 2011; Beathgen i in. 1995; Moreno i in. 2003; Noworolnik i Leszczyńska 2002, 2005; Příklad i in. 2005; Noworolnik 2013; Shejbalová i in. 2014).

Gospodarka mineralna roślin jest ściśle powiązana z ich gospodarką wodną. Badania wykazują, że w warunkach stresu suszy azot jest słabo wykorzystywany przez rośliny (pomimo wystarczającej ilości składnika w glebie). Dzieje się tak, ponieważ w wyniku niedoboru wody azot znajdujący się w roztworze glebowym staje się niedostępny dla roślin (Sułek i Leszczyńska 2016).

2. Przegląd literatury

Azot jest składnikiem łatwo przemieszczającym się w środowisku glebowym (Liszewski 2008; Noworolnik 2013; Sułek i in. 2007). Z badań wynika, że przeciętnie tylko 50% azotu dostarczanego z nawozami jest wykorzystywana przez rośliny zbożowe (Gaj 2013). Oznacza to, że połowa związków azotu przedostaje się do wód powierzchniowych i podziemnych, powodując straty ekonomiczne dla rolnika, a także zagrożenie dla środowiska. W związku z tym, aby zminimalizować to zagrożenie i nie doprowadzić do nadmiaru azotu w glebie, szczególną uwagę należy zwracać na termin aplikacji nawozu oraz warunki glebowe, od których zależy wielkość stosowanej dawki (Liszewski 2008; Noworolnik 2013; Sułek i in. 2007).

2.6. ZNACZENIE GLEBY W ROZWOJU I PŁONOWANIU JĘCZMIENIA JAREGO

Z wielu badań wynika, że spośród czynników siedliskowych, warunki glebowe wywierają najsilniejszy wpływ na plonowanie jęczmienia jarego (Noworolnik 1998, 2003, 2015). Akram (2011), Datta i in. (2011), Promkhambut i in. (2010) oraz Seghatoleslami i in. (2008) podkreślają, że kluczowe znaczenie dla zmniejszenia niekorzystnych zmian w metabolizmie i wzroście roślin, wywołanych niewłaściwymi stosunkami wodnymi, ma zdolność gleby do magazynowania wody. Potwierdzają to wieloletnie badania przeprowadzone przez Noworolnika (2015) oraz Noworolnika i Terelaka (2005), według których zwężlejsze podłoże sprzyja uzyskaniu wyższego plonu ziarna jęczmienia.

Pomimo, że jęczmień jary charakteryzuje stosunkowo niskim współczynnikiem transpiracji ($500 - 600 \text{ dm}^3 \text{ H}_2\text{O kg}^{-1}$ suchej masy) (Grzebisz 2012; Zscheischler i in. 1990) oraz dużą siłą ssącą korzeni (Noworolnik 2008 a; Noworolnik i Terelak 2006), to krótki okres wegetacji (trwający około 100 dni) i słabo rozwinięty system korzeniowy (Pecio i Wach 2015), (w warstwie gleby do 30 cm głębokości znajduje się od 70% do 95% masy korzeni (Pasela 1975) sprawiają, że ma on większe wymagania glebowe niż owies, pszenżyto czy żyto (Noworolnik 2008 a). Badania przeprowadzone przez Noworolnika (2008 a, b) wykazały, iż największe plony tego zboża uzyskuje się na glebach zaliczanych do pyłów zwykłych i glin lekkich oraz na piaskach gliniastych mocnych położonych na glinach lekkich. Średnie plony można uzyskać na piaskach gliniastych mocnych całkowitych i na piaskach gliniastych lekkich zalegających na glinach lekkich, zaś niższe na piaskach gliniastych lekkich całkowitych i na piaskach słabogliniastych położonych na glinach lekkich.

3. METODYKA BADAŃ

3.1. DOŚWIADCZENIE WAZONOWE

Badania wazonowe przeprowadzone w hali wegetacyjnej Rolniczego Zakładu Doświadczalnego (RZD) IUNG-PIB w Grabowie w latach 2017 – 2019. Hala wegetacyjna wyposażona jest w przesuwny dach i ściany, co umożliwiło roślinom rozwój w warunkach zbliżonych do naturalnych oraz chroniło je przed niekontrolowanymi opadami atmosferycznymi (Fot. 1). Wewnątrz hali zainstalowano czujniki, które w sposób ciągły rejestrowały temperaturę powietrza.



Fot. 1. Hala wegetacyjna w RZD IUNG-PB w Grabowie (fotografia własna)

Podstawową jednostką badawczą był wazon wypełniony podłożem w ilości 9 kg. Jako podłoża zastosowano 7 gatunków gleb pobranych jednorazowo z warstwy ornej (0 - 25 cm) pól uprawnych, w ilości wystarczającej do przeprowadzenia trzyletniego doświadczenia. Pola te były zlokalizowane na terenie RZD Kępa – Osiny (gm. Puławy) oraz w gospodarstwach indywidualnych w miejscowości Rogalów (gm. Wąwolnica) i w miejscowości Opatkowice (gm. Puławy). Pobraną glebę złożono w magazynie RZD Grabów a następnie poddano analizom składu granulometrycznego, właściwości chemicznych oraz wodnych, które wykonano w Zakładzie Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów IUNG-PIB w Puławach. Gatunek każdej z pobranych gleb ustalano

3. Metodyka badań

metodą areometryczną wg Prószyńskiego, na podstawie procentowej zawartości poszczególnych frakcji granulometrycznych (Tab. 4 i 5).

Tab. 4. Zawartość procentowa frakcji granulometrycznych wg BN-78/9180-11

Nr gleby	Piasek 2,0-0,1 mm	Pył 0,1-0,02 mm	Części sypkawe <0,02 mm	Gatunek gleby	Kategoria podatności gleby na suszę	
1	90	7	3	piasek luźny (pl)	I	bardzo podatna
2	77	16	7	piasek słabogliniasty (ps)		
3	71	16	13	piasek gliniasty lekki (pgl)	II	podatna
4	63	19	18	piasek gliniasty mocny (pgm)		
5	51	27	22	glina piaszczysta pylasta (gpp)	III	średnio podatna
6	18	57	25	pył gliniasty (płg)		
7	42	17	41	glina średnia	IV	mało podatna

Tab. 5. Zawartość procentowa frakcji granulometrycznych wg PTG 2008

Nr gleby	Piaski 2,0-0,05 mm	Pyły 0,05-0,002 mm	Części ilaste <0,002 mm	Gatunek gleby
1	93	7	0	piasek luźny (pl)
2	89	10	1	piasek słabogliniasty (ps)
3	78	19	3	piasek gliniasty (pg)
4	72	24	4	glina piaszczysta (gp)
5	63	32	5	glina piaszczysta (gp)
6	33	64	3	pył gliniasty (pyg)
7	47	33	20	glina zwykła (gz)

W pracy przyjęto oznaczenia gatunków gleb zgodne z mapą glebowo-rolniczą i normą BN-78/9180-11, zastosowane w opracowaniu mapy kategorii podatności gleb na suszę dla potrzeb Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej (SMSR).

Charakterystykę właściwości chemicznych analizowanych gatunków gleb, w tym pH_{KCl}, zawartości: azotu całkowitego, węgla organicznego, próchnicy, fosforu przyswajalnego, potasu przyswajalnego, magnezu przyswajalnego oraz mikroelementów: miedzi, manganu, cynku i żelaza podano w tabeli 6. Oceny zawartości makro i mikroelementów w glebach dokonano na podstawie liczb granicznych, przedstawionych w zaleceniach nawozowych sporządzonych przez IUNG-PIB (Zalecenia Nawozowe 1990).

3. Metodyka badań

Tab. 6. Właściwości chemiczne gatunków gleb zastosowanych w doświadczeniu

Wyszczególnienie	Piasek luźny (pl)	Piasek słabogliniasty (ps)	Piasek gliniasty lekki (pgl)	Piasek gliniasty mocny (pgm)	Gлина piaszczysta pylasta (gpp)	Pył gliniasty (ptg)	Gлина średnia (gs)
pH _{KCl}	4,9	5,5	5,5	5,7	4,6	4,6	6,1
Ocena odczynu	kwaśny	kwaśny	kwaśny	lekko kwaśny	kwaśny	kwaśny	lekko kwaśny
Zawartość (%)							
N całkowity	0,060	0,062	0,079	0,083	0,085	0,109	0,169
C organiczny	0,49	0,53	0,64	0,62	0,78	0,90	1,37
Próchnica	0,85	0,92	1,11	1,06	1,34	1,54	2,37
Ocena zasobności	niska	niska	średnia	średnia	średnia	średnia	wysoka
Zawartość (mg · kg⁻¹)							
P ₂ O ₅	170	198	146	141	127	102	191
Ocena zasobności	wysoka	wysoka	średnia	średnia	średnia	średnia	wysoka
K ₂ O	30	145	119	184	118	146	289
Ocena zasobności	niska	wysoka	średnia	wysoka	niska	średnia	wysoka
Mg	15	30	41	70	58	62	131
Ocena zasobności	niska	średnia	średnia	wysoka	średnia	średnia	wysoka
Cu	2,07	0,88	1,4	3,84	2,59	4,93	19,27
Ocena zasobności	wysoka	niska	niska	średnia	średnia	średnia	wysoka
Mn	83,81	138,85	135,57	288,83	432,82	273,48	371,50
Ocena zasobności	średnia	średnia	średnia	średnia	wysoka	średnia	średnia
Zn	19,04	2,84	6,58	14,19	11,04	19,04	38,73
Ocena zasobności	wysoka	średnia	wysoka	wysoka	średnia	średnia	średnia
Fe	2075,55	3020,20	3613,44	5651,36	7174,82	8499,41	9044,69
Ocena zasobności	średnia	średnia	średnia	wysoka	wysoka	wysoka	wysoka

W celu zabezpieczenia roślinom właściwej ilości składników pokarmowych, przed napełnieniem wazonów każdą glebę uzupełniono pożywką mineralną (tab. 7). W tym celu nawozy mineralne rozpuszczono w wodzie i podano w formie płynnej. Wszystkie pożywki, z wyjątkiem mikroelementów, przygotowano osobno dla każdego składnika. Ze

3. Metodyka badań

względu na różną rozpuszczalność związków, rozpuszczano je w różnych ilościach wody. W przypadku azotu, potasu, magnezu i mikroelementów dawkę podaną w tabeli 7 uzupełniano wodą destylowaną do 10 ml, zaś w przypadku fosforu - do 20 ml roztworu. Podaną w tabeli masę związków chemicznych oraz ilość wody destylowanej zwiększano odpowiednio do ilości potrzebnej dla 140 wazonów. Aby zapobiec utlenieniu żelaza, roztwór z mikroelementami przygotowano w butli z ciemnego szkła. W trakcie zakładania doświadczenia wszystkie płynne pożywki wymieszano w kolbie ze 100 ml wody, a następnie dodano do gleby.

Wszystkie pożywki aplikowano jednorazowo, jedynie azot podzielono na trzy dawki. Pierwszą dawkę podano przedsiewnie w ilości $1\text{g} \cdot \text{wazon}^{-1}$, natomiast pozostałe dwie w równej ilości – $0,5\text{g} \cdot \text{wazon}^{-1}$ podano przed wprowadzeniem stresu I - w fazie początku wzrostu źdźbła (BBCH 30) i po zakończeniu stresu I, w pełni fazy kłoszenia (BBCH 55). Każdorazowo przygotowano świeżą pożywkę z azotem. W przypadku gdy gleba wykazywała odczyn $\text{pH}_{\text{KCl}} < 5,6$ stosowano wapnowanie węglanem wapnia w ilości $10\text{g CaCO}_3 \cdot \text{wazon}^{-1}$.

Tab. 7. Skład pożywki mineralnej stosowanej w doświadczeniu wazonowym

Składnik mineralny	Związek chemiczny	Dawka na wazon
Azot	NH_4NO_3	2 g
Fosfor	KH_2PO_4	0,9 g
Potas	KH_2PO_4	0,35 g
Magnez	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,34 g
Bor	H_3BO_3	5 mg
Miedź	CuSO_4	2 mg
Sód	$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,7 mg
Mangan	$\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,6 mg
Cynk	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,4 mg
Żelazo	FeCl_3	5 mg

Rośliną testową w doświadczeniu był jęczmień jary, odm. Rubaszek. Jest to odmiana pastewna o kłosie dwurzędowym, zalecana do uprawy na terenie całego kraju. Doświadczenie trójczynnikowe założono w układzie kompletnie zrandomizowanym, w pięciu powtórzeniach. W kolejnych latach siew wykonano w terminie optymalnym dla jęczmienia tj. 19 kwietnia 2017 roku, 17 kwietnia 2018 roku oraz 18 kwietnia 2019 roku. Do każdego wazonu wysiewano 25 ziarniaków, a następnie w fazie 3 liścia (BBCH 13) ilość roślin zredukowano do 10 szt. $\cdot \text{wazon}^{-1}$ (Fot.2), które prowadzono do zbioru w fazie

3. Metodyka badań

dojrzałości pełnej. Uwzględniając powierzchnię wazonu wynoszącą ok. 700 cm², uzyskano szacunkową obsadę roślin 143 szt. · m⁻¹, co zapewniało roślinom odpowiednią dostępność światła.



Fot. 2. Rośliny jęczmienia po redukcji do 10 szt. w wazonie – widok z góry (fotografia własna)

Czynnikami doświadczenia były następujące parametry:

1. Stres suszy:

- **K** - kontrola – optymalne nawodnienie (ok. 65% polowej pojemności wodnej - PPW) utrzymywane było przez cały okres wegetacyjny,
- **S1** - 2-tygodniowy stres wczesny (ok. 40% PPW) – w fazie 1 kolanka jęczmienia (BBCH 31),
- **S2** - 2-tygodniowy stres późny (ok. 35% PPW) – w końcu fazy kwitnienia jęczmienia (BBCH 69)
- **S1 + S2** – stres wczesny i stres późny łącznie.

2. Gatunek gleby wg BN-78/9180-11:

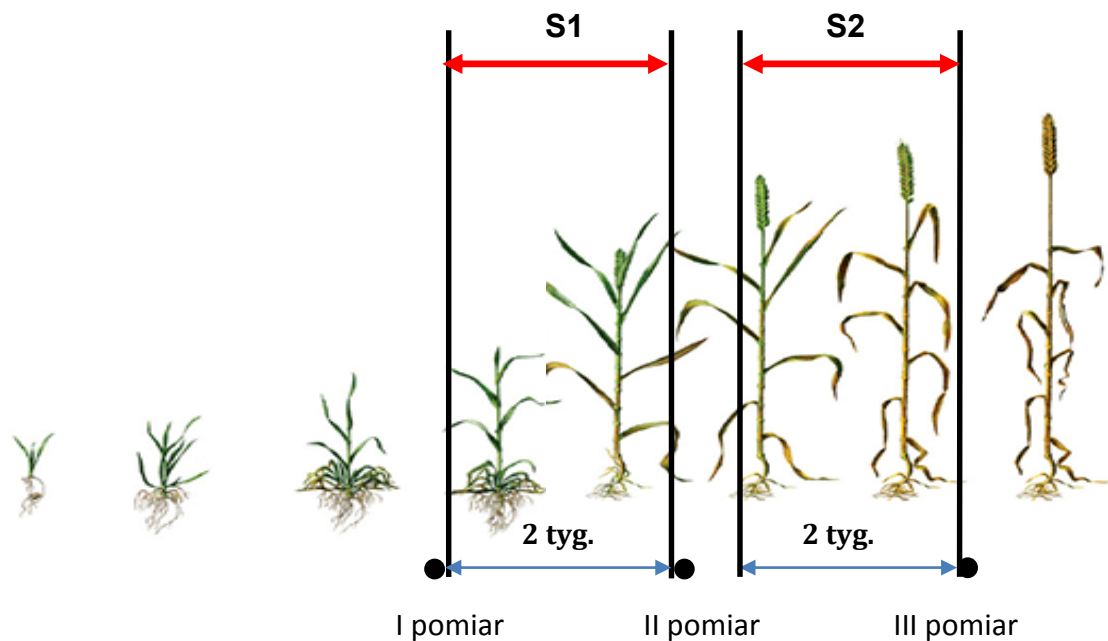
- piasek luźny (pl),
- piasek słabogliniasty (ps),
- piasek gliniasty lekki (pgl),
- piasek gliniasty mocny (pgm),
- glina piaszczysta pylasta (gpp),
- pył gliniasty (płg) - less,
- glina średnia (gs).

3. Metodyka badań

3. Termin pomiaru wskaźników fizjologicznych:

- tuż przed wprowadzeniem stresu wczesnego,
- tuż po zakończeniu stresu wczesnego i jednocześnie przed wprowadzeniem stresu późnego,
- tuż po zakończeniu stresu późnego.

Schemat wykonywania pomiarów parametrów fizjologicznych w trakcie wegetacji przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat terminów wykonywania pomiarów wskaźników fizjologicznych

W obiekcie kontrolnym wilgotność podłoża utrzymywano w zakresie wody łatwo dostępnej przez cały okres wegetacji, natomiast w obiektach, w których wprowadzono stres suszy okresowo zmniejszano ją do poziomu 40% lub 35% połowej pojemności wodnej, odpowiednio w przypadku stresu wczesnego S1 i stresu późnego S2. Zakładano, że po zakończeniu stresów i przywróceniu optymalnej wilgotności podłoża rośliny będą wykazywały objawy przebytego stresu suszy, ale będą zdolne do regeneracji. W tabeli 8 przedstawiono charakterystykę retencji wodnej gleb zastosowanych w doświadczeniu, określoną na podstawie krzywej pF (krzywe pF, wyznaczone dla wszystkich gleb użytych w doświadczeniu znajdują się w rozdziale „Aneksy”: Rys. A1 – A7).

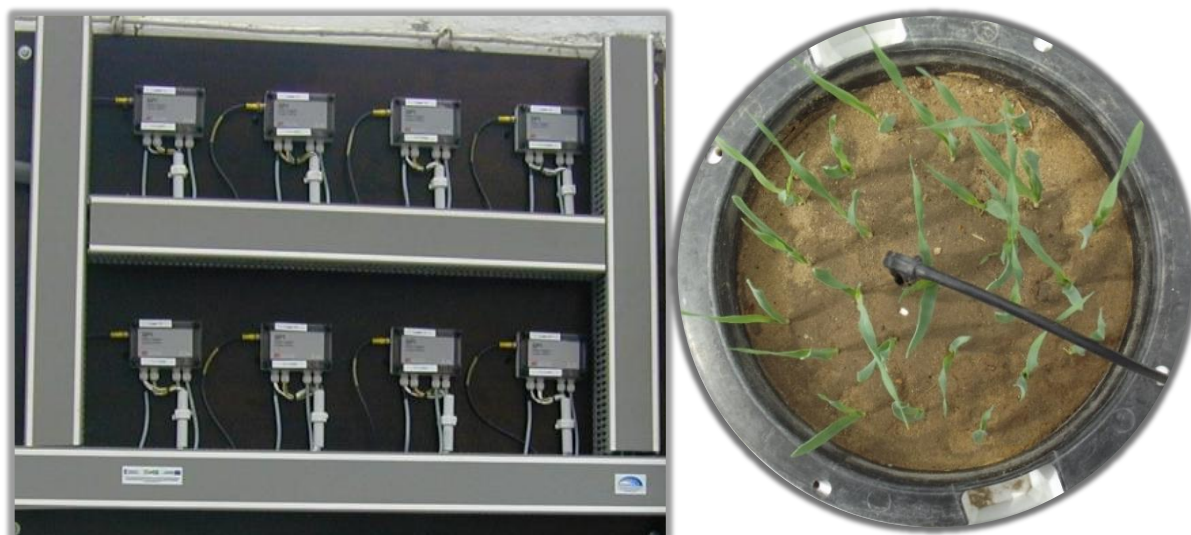
3. Metodyka badań

Tab. 8. Charakterystyka retencji wodnej gleb użytych w doświadczeniu, określona na podstawie krzywej pF

Gatunek gleby	PPW*	WOD	PTWR
	kg · kg ⁻¹		
Piasek luźny (pl)	0,0828	0,0639	0,0189
Piasek słabogliniasty (ps)	0,1033	0,0756	0,0277
Piasek gliniasty lekki (pgl)	0,1218	0,0993	0,0293
Piasek gliniasty mocny (pgm)	0,1489	0,1048	0,0441
Gлина piaszczysta pylasta (gpp)	0,1833	0,1257	0,0576
Pył gliniasty (płg)– less	0,2594	0,1961	0,0633
Gлина średnia (gs)	0,2101	0,1305	0,0796

* PPW – połowa pojemność wodna, WOD – woda ogólnie dostępna, PTWR – punkt trwałego wędnięcia roślin

W celu utrzymania odpowiedniej wilgotności podłoża w wazonach zastosowano sterowany komputerowo system nawadniania kropelkowego Delta LINK (Fot. 3), zainstalowany przez firmę PHU Adviser oraz dodatkowo, w każdym wazonie indywidualnie wilgotność regulowano za pomocą z wagi elektronicznej (Waga prosta CAS SW-1 PLUS SR30 Polska).



Fot. 3. Układ sterujący systemem nawadniania oraz wprowadzenie wody do wazonu (fotografia własna)

Rośliny jęczmienia chroniono przed chorobami i szkodnikami. Przed siewem nasiona traktowano zaprawą nasienną Kinto Duo 080 FS (BASF), zgodnie z zaleceniami producenta dla jęczmienia. Następnie w okresie wegetacji, w celu ochrony przed

3. Metodyka badań

mszycami, wykonywano opryski insektycydem Decis 2,5 EC (Bayer). W roku 2017 i 2019, zabieg wykonano w fazie kłoszenia (BBCH 55), natomiast w roku 2018, w fazie kwitnienia (BBCH 65). W 2018 roku wykonano również oprysk przeciw plamistości siatkowej. Zabieg zastosowano w końcu fazy krzewienia (BBCH 29) fungicydem Bumper 250 EC (Agrosimex). Środki ochrony roślin stosowano zgodnie z zaleceniami producenta.

3.2. PLON I ELEMENTY PLONU

Zbiór jęczmienia prowadzono w fazie dojrzałości pełnej (BBCH 89), tj. 24 lipca 2017 r., 16 lipca 2018 r. oraz 24 lipca 2019 r. Po zbiorze części nadziemne roślin suszono w suszarce laboratoryjnej (POL-EKO Perfect Environment LSW 1000), w temperaturze 60°C przez 72 h. Po wysuszeniu określono plon suchej masy ziarna (g) części nadziemnej z wazonu (g) oraz elementy plonu: średnią długość pędów głównych (cm), liczbę kłosów i ziaren z wazonu, masę tysiąca ziaren (MTZ) (g). Obliczono także plon słomy jako różnicę masy części nadziemnej roślin i plonu ziarna z wazonu oraz indeks zbioru (*Harvest Index* - HI) jako iloraz plonu ziarna do plonu części nadziemnej.

3.3. WSKAŹNIKI FIZJOLOGICZNE

Wszystkie określone w doświadczeniu wskaźniki fizjologiczne roślin oznaczano metodami przyżyciowymi. Pomiary wykonywano jednocześnie we wszystkich obiektach doświadczalnych i powtórzeniach, w trzech terminach wyszczególnionych w rozdziale 3.1. Analizowane wskaźniki podzielono na 2 grupy, zgodnie z aparaturą pomiarową wykorzystywaną do ich oznaczania:

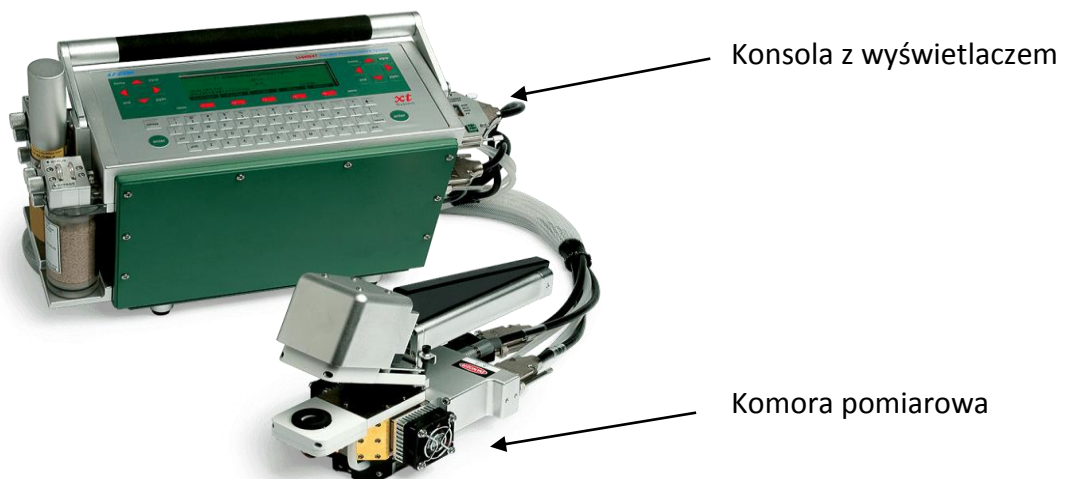
1. wskaźniki wymiany gazowej określono za pomocą przenośnego urządzenia Li-6400 Portable Photosynthesis System (LI-COR Inc., USA):
 - intensywność fotosyntezy netto ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$),
 - przewodnictwo szparkowe ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$),
 - intensywność transpiracji ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$),
2. zawartość chlorofilu określono za pomocą przenośnego aparatu HYDRO N-TesterTM (YARA Poland):
 - indeks zieloności liścia (jednostka SPAD).

3. Metodyka badań

Pomiary wskaźników w okresie wegetacji wykonywano w dni słoneczne, w godzinach przedpołudniowych, na najmłodszych w pełni rozwiniętych liściach.

3.3.1. APARATURA POMIAROWA

LI-6400 Portable Photosynthesis System



Fot. 4. LI-6400 Portable Photosynthesis System (LI-COR Inc., USA)

Przyrząd pomiarowy LI-6400 Portable Photosynthesis System służy do pomiaru parametrów wymiany gazowej (Fot. 4). Składa się z konsoli z wyświetlaczem oraz zaopatrzonej w dozownik CO₂ komory pomiarowej (liściowej), w której znajdują się analizatory na podczerwień. Warunki panujące w komorze, tj: wilgotność powietrza, zawartość CO₂, temperatura oraz intensywność światła ustalane są przez operatora. Podczas pomiaru pompowane jest powietrze o znanym stężeniu dwutlenku węgla i wody, z którego 75% trafia do komory liściowej, gdzie wchodzi w interakcję z liściem. Reszta powietrza jest gazem referencyjnym. Promieniowanie podczerwone ze źródła światła analizatora trafia do komory liściowej, gdzie jest dwukrotnie odbijane (przez lustro) pod kątem 90°. Część promieniowania zostaje pochłonięta przez gazy znajdujące się w komorze, natomiast reszta trafia na filtr, przez który przechodzi tylko promieniowanie o długości fali pochłanianej przez CO₂ i H₂O. Następnie promienie padają na detektor analizujący ilość fal pochłoniętych przez gazy w komorze. Tym sposobem aparat określa ilość CO₂ i H₂O pochłoniętych lub/i wydzieloną przez roślinę. W trakcie jednego pomiaru (trwającego kilka minut) uzyskuje się wartości wszystkich

3. Metodyka badań

wskaźników wymiany gazowej. Pomiary wykonywano przy szybkości przepływu powietrza – $500 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, stężeniu referencyjnym CO_2 – $400 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$ oraz intensywności światła – $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

HYDRO N-Tester™



Fot. 5. HYDRO N-Tester™ (Yara)

Aparat pomiarowy HYDRO N-Tester™ (Fot. 5) jest przyrządem optycznym, zbudowanym z klipsa liściowego, wyposażonego w źródło światła o długościach fali 650 i 940 nm, fotodetektora oraz z wyświetlacza. Urządzenie umożliwia ocenę stanu odżywienia roślin azotem poprzez pomiar zawartości chlorofilu w ich tkankach na podstawie indeksu zieloności liścia, określonego w jednostkach SPAD (Soil-Plant Analysis Development), w zakresie od 0 do 800. Zasada metody pomiaru indeksu SPAD polega na pomiarze różnic pomiędzy ilością światła absorbowanego (o długości fali 650 nm) i przepuszczanego (o długości fali 940 nm) przez tkankę liścia. Wynikiem jest średnia z 30 pojedynczych, prawidłowych pomiarów, wykonanych na tym samym liściu.

3.4. ZAWARTOŚĆ AZOTU W SUCHEJ MASIE ZIARNA I SŁOMY

Po zbiorze określano zawartość azotu całkowitego w suchej masie ziarna i słomy. Następnie obliczono pobranie azotu przez ziarno, a także przez całą nadziemną masę rośliny.

3. Metodyka badań

Analizę na zawartość azotu całkowitego w suchej masie ziarna i słomy wykonywano w Zakładzie Gleboznawstwa Eroзии i Ochrony Gruntów IUNG-PIB przy użyciu Analizatora Elementarnego Vario Macro Cube niemieckiej firmy Elementar Analysensysteme GmbH (Fot. 6).



Fot. 6. Analizatora elementarny Vario Macro Cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Niemcy)

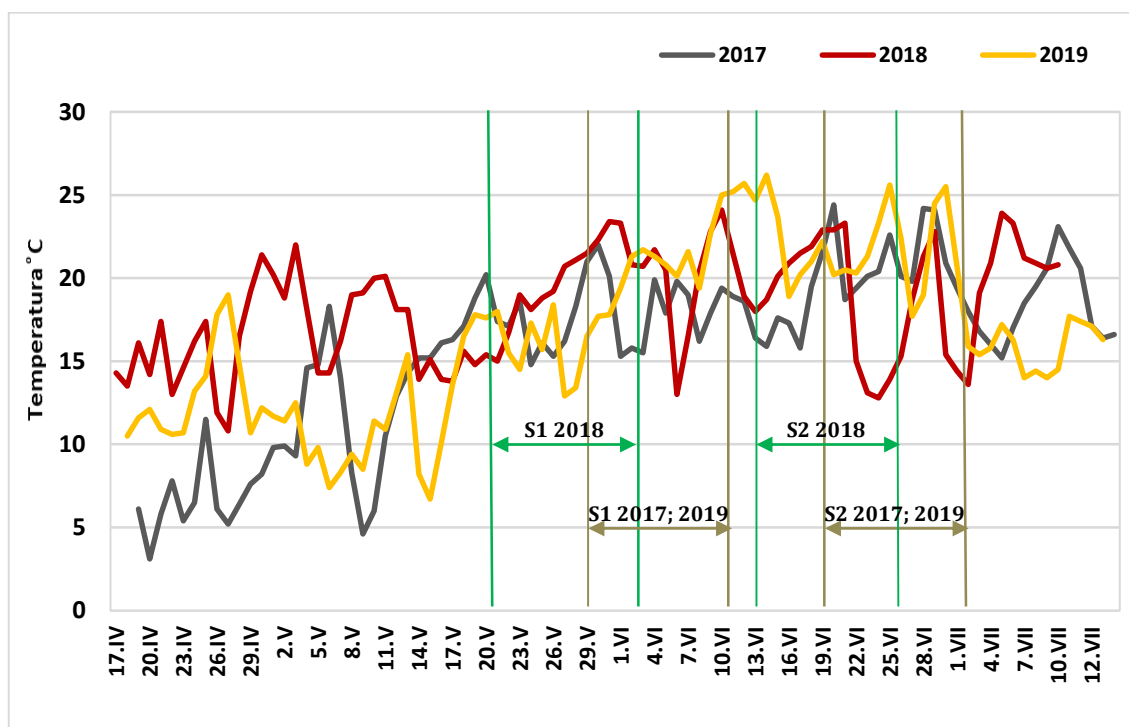
Analiza wykonana została metodą suchego spalania. Wyszuszony uprzednio materiał roślinny mielono używając młynka laboratoryjnego IKA A11 basic, a następnie naważono do folii cynowych (ok. 70 mg), które (w celu szczelnego zamknięcia i usunięcia powietrza) sprasowywano. Tak przygotowane próbki poddawano analizie polegającej na wysokotemperaturowym (ok. 1 000°C) spalaniu w atmosferze tlenu i w obecności katalizatora (tlenek miedzi (II) CuO). Wydzielający się azot (po redukcji do N₂) i dwutlenek węgla CO₂ (po separacji) mierzone były w detektorze termoprzewodnościowym TCD (thermal conductivity detector). Pozostałe gazy np. para wodna, tlenki siarki, lotne halogeny wiązane są w różnych pułapkach chemicznych i nie docierały do detektora.

3.5. ANALIZA STATYSTYCZNA

W celu porównania różnic między średnimi dla czynników głównych oraz interakcji między tymi czynnikami stosowano analizę wariancji ANOVA. Pary średnich porównywano z zastosowaniem post-hoc test Tukey'a przy poziomie istotności $p < 0,05$. Zależności korelacyjne pomiędzy plonem i elementami struktury plonu, wskaźnikami wymiany gazowej oraz zawartością azotu w ziarnie jęczmienia i indeksem zieloności liścia (SPAD), określono za pomocą analizy korelacji prostej. Wszystkie analizy statystyczne wykonywano w programie Statistica (TIBCO Software Inc. (2017). Statistica (data analysis software system), version 13.3 <http://statistica.io>).

4. WARUNKI PROWADZENIA DOŚWIADCZENIA

Warunki termiczne w latach prowadzenia doświadczenia na ogół sprzyjały plonowaniu jęczmienia (Rys. 5). Najniższymi dobowymi temperaturami charakteryzował się rok 2017, zaś najcieplejszy był rok 2018. Rok 2017 był najbardziej korzystny dla wzrostu i rozwoju jęczmienia jarego. Pomimo, że zimna wiosna wpłynęła na opóźnienie wschodów, to umiarkowane temperatury w maju i czerwcu sprzyjały gromadzeniu masy wegetatywnej. Rok 2018 charakteryzował się wyższymi niż w pozostałych latach temperaturami w okresie wiosennym, co umożliwiło szybkie wschody roślin oraz niezaburzony rozwój w początkowych fazach. Jednakże wysokie temperatury obserwowane przez cały sezon wegetacyjny sprzyjały szybszemu następowaniu kolejnych faz rozwojowych, co w konsekwencji spowodowało skrócenie okresu wegetacyjnego (o około 1 tydzień), w porównaniu do pozostałych lat badań. Wiosna 2019 roku charakteryzowała się dość wysokimi temperaturami, co umożliwiło szybkie wschody i nie zaburzyło rozwoju we wczesnych fazach. Z kolei korzystny układ temperatur w pozostałym okresie sprzyjał rozwojowi roślin jęczmienia.



Rys. 5. Temperatury powietrza w hali wegetacyjnej w okresie wegetacji, w latach prowadzenia badań; – S1 i S2 oznaczają stresy suszy

5. WYNIKI

5.1. DŁUGOŚĆ OKRESU WEGETACJI ORAZ POSZCZEGÓLNYCH FAZ WZROSTU I ROZWOJU

Na długość i przebieg wegetacji jęczmienia jarego wpływ miały lata badań, stres suszy jak i gatunek gleby (Tab. 9 i 10). W obiektach kontrolnych dojrzałość pełną rośliny osiągały najszybciej w roku 2018 (76 – 80 dzień wegetacji), natomiast najpóźniej w 2017 roku (84 – 89 dzień wegetacji). Wprowadzenie dwutygodniowego stresu wczesnego (S1) powodowało opóźnienie w pojawianiu się faz rozwojowych (Tab. 10). Z kolei po ustąpieniu wczesnego stresu suszy i przywróceniu optymalnego nawodnienia, rośliny próbowały zniwelować skutki braku wody i tworzyły nowe pędy, przez co wydłużyły okres wegetacji o kilka dni, w porównaniu do obiektów kontrolnych. Odmienny wpływ na długość wegetacji i przebieg faz rozwojowych miało wprowadzenie stresu późnego (S2). Stres ten spowodował przyspieszenie dojrzewania roślin o około 5 dni w porównaniu do kontroli i o około 10 dni w porównaniu do obiektów S1, co jest jednym z mechanizmów obronnych przed stresem suszy (Basu i in. 2016). Natomiast obiekty, w których wprowadzono oba stresy suszy (S1 i S2) osiągały dojrzałość pełną w terminie zbliżonym do kontroli.

W każdym roku prowadzenia badań wschody następowały o 1 dzień wcześniej na glinie średniej oraz pyle gliniastym (lessie) niż na pozostałych glebach. Wcześniejsze wschody nie powodowały różnic w terminach osiągnięcia dojrzałości pełnej przez rośliny jęczmienia. Zaobserwowano jednak, że na piasku luźnym i piasku słabogliniastym dojrzewanie następowało od 1 do 5 dni wcześniej niż na pozostałych glebach, na co wpływ miały właściwości fizyczne tych gleb (Tab. 9). Gлина średnia, dzięki dużej zawartości próchnicy, charakteryzowała się ciemnym zabarwieniem, co dawało możliwość pochłaniania większej ilości energii słonecznej i sprzyjało szybszemu nagrzewaniu się gleby. Z kolei gleby lessowe, do których zaliczony został pył gliniasty, ze względu na najlepsze dla większości roślin stosunki wodno – powietrzne, są najlepszymi glebami rolniczymi. Dodatkowo duża zawartość drobnych cząstek sprawia, że po nagrzaniu się dłużej utrzymują ciepło, co również korzystnie wpływa na tempo wschodów.

5. Wyniki

Tab. 9. Średnia długość okresu wegetacji oraz faz rozwojowych wyrażona w dniach po siewie zależnie od gatunku gleby

Faza rozwojowa (BBCH)	Gatunek gleby																				
	pl			ps			pgl			pgm			ptg			gpp			gs		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019
Wschody BBCH 10	8	6	7	8	6	7	8	6	7	8	6	7	7	5	6	8	6	7	7	5	6
3. liść BBCH 13	17	15	17	17	15	17	17	15	17	17	15	17	16	14	15	17	15	17	16	14	15
Krzewienie BBCH 22-23	26	21	26	26	21	26	26	21	26	26	21	26	25	20	25	26	21	26	25	20	25
1. Kolanko BBCH 31	40	35	38	40	35	38	40	35	38	40	35	38	38	34	36	40	35	38	38	34	36
Liść flagowy BBCH 39	45	40	43	45	40	43	45	40	43	45	40	43	44	39	42	45	40	43	44	39	42
Kłoszenie BBCH 55	51	48	52	51	48	52	51	48	52	51	48	52	50	47	51	51	48	52	50	47	51
Koniec kwitnienia BBCH 69	60	52	55	60	52	55	60	52	55	60	52	55	60	52	55	60	52	55	61	53	56
Dojrzałość wodna BBCH 71	64	56	60	64	56	60	64	56	60	64	56	60	64	56	60	64	56	60	66	58	61
Dojrzałość mleczna BBCH 75	70	63	68	70	63	68	70	63	68	70	63	68	70	63	68	70	63	68	72	65	69
Dojrzałość woskowa BBCH 85	75	70	75	75	70	75	76	70	75	76	70	75	74	70	75	76	70	75	78	72	77
Dojrzałość pełna BBCH 89	84	76	82	84	76	82	86	78	83	86	78	83	85	78	82	86	78	83	89	80	85

5. Wyniki

Tab. 10. Średnie opóźnienie (-) bądź szybsze następowanie (+), określone liczbą dni, pojawianie się faz rozwojowych w wyniku stresu wczesnego (S1), późnego (S2) i obu stresów suszy (S1S2) w stosunku do obiektu kontrolnego

Faza rozwojowa (BBCH)	Gatunek gleby																				
	pl			ps			pgl			pgm			płg			gpp			gs		
	S1	S2	S1S2	S1	S2	S1S2	S1	S2	S1S2	S1	S2	S1S2	S1	S2	S1S2	S1	S2	S1S2	S1	S2	S1S2
1. Kolanko BBCH 31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Liść flagowy BBCH 39	-1	-	-1	-1	-	-1	-1	-	-1	-1	-	-1	-1	-	-1	-1	-	-1	-1	-	-1
Kłósenie BBCH 55	-2	-	-2	-2	-	-2	-2	-	-2	-2	-	-2	-2	-	-2	-2	-	-2	-2	-	-2
Koniec kwitnienia BBCH 69	-2	-	-2	-2	-	-2	-2	-	-2	-2	-	-2	-2	-	-2	-2	-	-2	-2	-	-2
Dojrzałość wodna BBCH 71	-2	+1	+1	-2	+1	+1	-2	+1	+1	-2	+1	+1	-2	+1	+1	-2	+1	+1	-2	+1	+1
Dojrzałość mleczna BBCH 75	-2	+2	+1	-2	+2	+1	-2	+1	+1	-2	+1	+1	-2	+1	+1	-2	+1	+1	-2	+2	+1
Dojrzałość woskowa BBCH 85	-2	+3	+2	-2	+3	+2	-2	+3	+2	-2	+3	+2	-2	+3	+2	-2	+3	+2	-2	+3	+2
Dojrzałość pełna BBCH 89	-4	+5	+2	-4	+5	+2	-4	+5	+2	-4	+5	+2	-4	+5	+2	-4	+5	+2	-6	+5	+2

5. Wyniki

5.2. PLON I ELEMENTY PLONU

5.2.1. PLON ZIARNA Z WAZONU

Stwierdzono istotność wpływu wszystkich badanych czynników oraz interakcji rok x stres suszy i stres suszy x gatunek gleby na plon ziarna z wazonu (Tab. 11).

Tab. 11. Wyciąg z analizy wariancji plonu ziarna jęczmienia z wazonu

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	751,5	0,000
Stres suszy (S)	689,3	0,000
Gatunek gleby (G)	498,5	0,000
R x S	2,5	0,023
R x G	1,1	0,326
S x G	3,7	0,000
R x S x G	0,9	0,603

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie przy poziomie istotności $p < 0.05$

Najwyższy plon jęczmienia uzyskano w korzystnym dla plonowania roku 2017 (średnio $60,1 \text{ g} \cdot \text{wazon}^{-1}$). Był on o około 5% wyższy w porównaniu do roku 2019 i około 20% wyższy, w porównaniu do najmniej korzystnego - roku 2018 (Tab.12). Stresy suszy na ogół ograniczały plon ziarna we wszystkich latach badań. Wielkość redukcji związana była z terminem wprowadzenia stresu. W porównaniu do kontroli, największe straty powodował stres wczesny S1 oraz stres wczesny i późny, stosowane po sobie (S1 + S2). Stres późny ograniczał plon ziarna tylko w pierwszym i trzecim roku badań, przy czym redukcja plonu była mniejsza niż w przypadku stresu S1 oraz S1 + S2.

Tab. 12. Plon ziarna jęczmienia z wazonu (g) w latach prowadzenia eksperymentu zależnie od stresu suszy (K – kontrola; S1 – stres wczesny; S2 – stres późny; S1 + S2 – oba stresy łącznie)

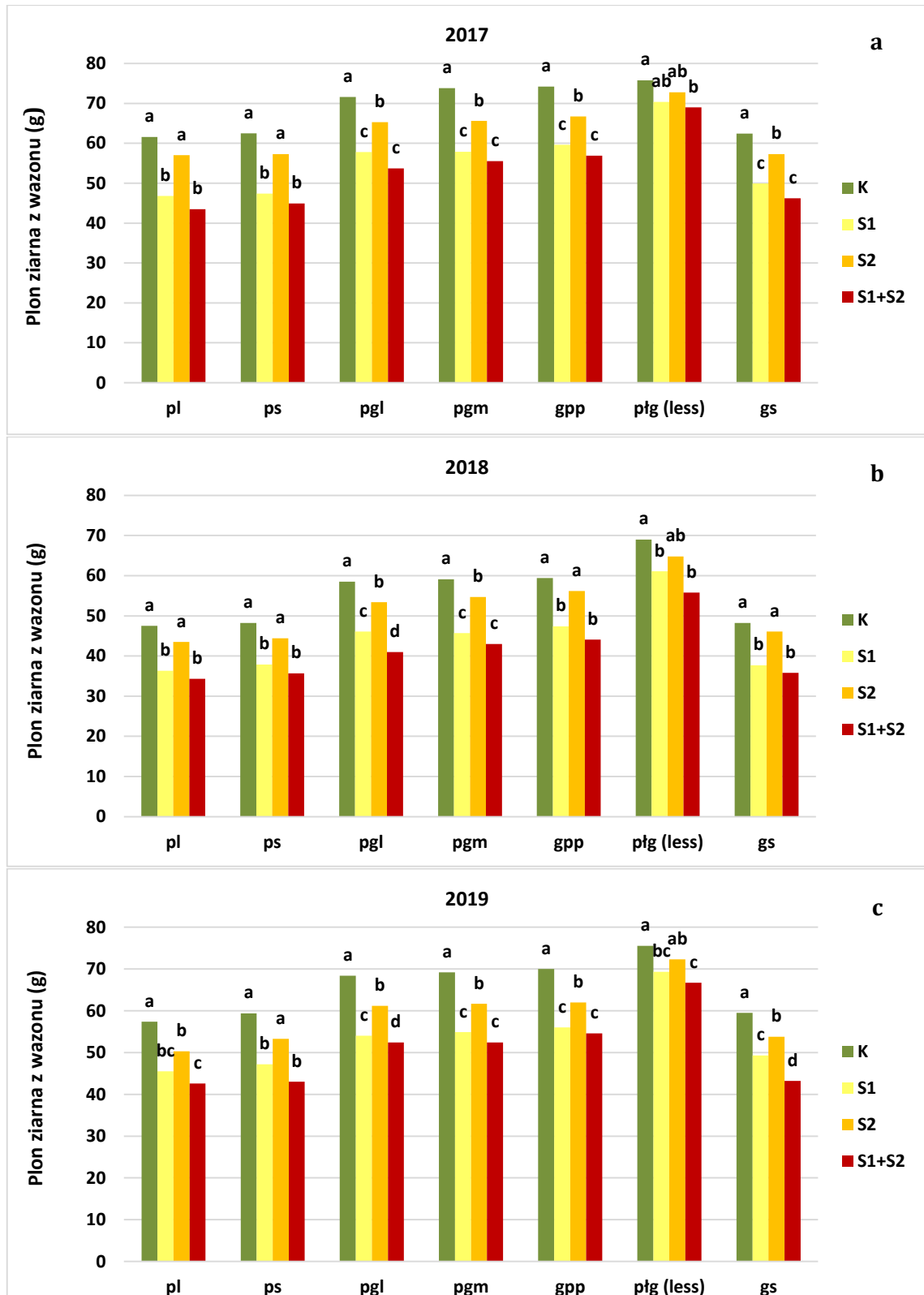
Rok	Stres suszy				Średnio w latach
	K	S1	S2	S1 + S2	
2017	68,8 A a*	55,7 A c	63,1 A b	52,8 A c	60,1 A
2018	55,7 C a	44,6 B b	51,8 B a	41,4 B b	48,4 C
2019	65,6 B a	53,8 A c	59,3 A b	50,7 A c	57,4 B

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą stresów suszy.

5. Wyniki

W 2017 roku stres wczesny oraz wprowadzenie dwóch stresów wpływało na redukcję plonu ziarna na wszystkich glebach z wyjątkiem p_{lg} (less). Stres późny ograniczał plon ziarna tylko w przypadku roślin rosnących na p_{lg}, p_{gm}, g_{pp} i g_s. Na glebie lessowej redukcję plonu ziarna jęczmienia powodowało tylko poddanie roślin działaniu obu stresów S1 + S2 (Rys. 6a). W latach 2018 i 2019 na wszystkich glebach stwierdzono redukcje plonu ziarna w wyniku wprowadzenia stresu S1 i S1 + S2 (Rys. 6b; 6c). W 2018 roku stres późny powodował zmniejszenie plonowania jęczmienia tylko na p_{gl} i p_{gm} (Rys. 6b), natomiast w 2019 roku na wszystkich glebach z wyjątkiem p_s i p_{lg} (Rys. 6c).

5. Wyniki



Rys. 6. Wpływ stresów suszy na plon ziarna z wazonu w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresse łącznie)

5. Wyniki

5.2.2. LICZBA KŁOSÓW Z WAZONU

Stwierdzono istotność wpływu wszystkich efektów głównych badanych czynników na liczbę kłosów z wazonu (Tab. 13). Istotny był również wpływ interakcji rok x gatunek gleby i stres suszy x gatunek gleby.

Tab. 13. Wyciąg z analizy wariancji liczby kłosów jęczmienia z wazonu

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	178,0	0,000
Stres suszy (S)	251,0	0,000
Gatunek gleby (G)	137,0	0,000
R x S	1,3	0,246
R x G	6,2	0,000
S x G	2,5	0,001
R x S x G	0,5	0,996

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Liczba kłosów jęczmienia z wazonu była istotnie zróżnicowana w poszczególnych latach badań (Tab. 14). Największą liczbę kłosów (średnio 67) uzyskano w 2019 roku, zaś najmniejszą w 2018 roku (średnio 58). Na liczbę kłosów istotny wpływ miał również gatunek gleby. We wszystkich analizowanych latach najwięcej kłosów rośliny wytworzyły na glebie o składzie granulometrycznym pyłu gliniastego, zaś najmniej: w 2017 roku na pl, ps i gs, w roku 2018 na pl i ps, a w 2019 roku na pl, ps, pgl oraz gs.

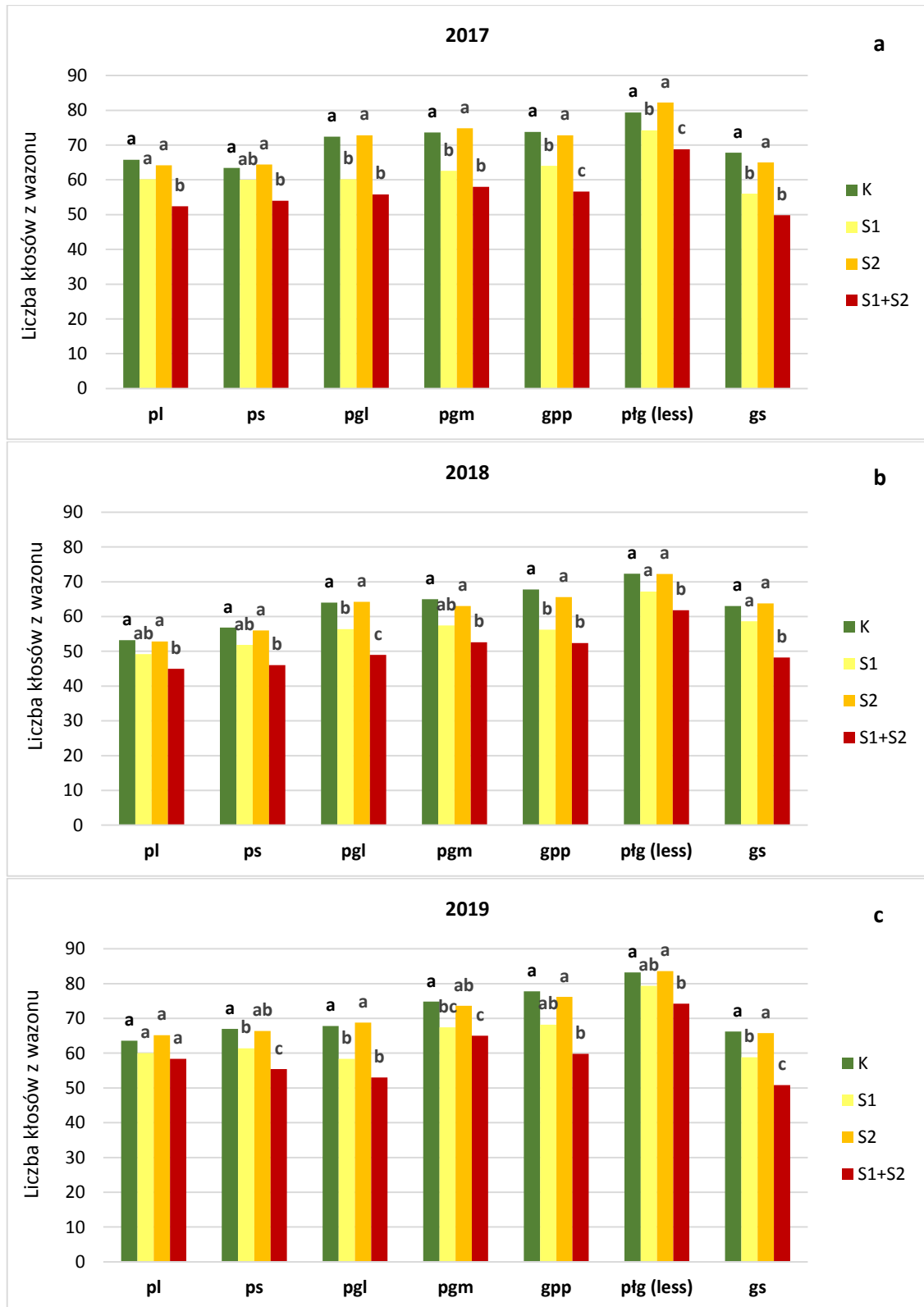
Tab. 14. Liczba kłosów jęczmienia z wazonu zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby							Średnio w latach
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	ptg (less)	gs	
2017	61 A c*	60 A c	65 A b	67 A b	67 B b	76 B a	61 A c	65 A
2018	50 B c	53 B c	58 C b	60 B b	61 C b	69 C a	58 A b	58 B
2019	62 A c	63 A c	62 B c	70 A b	71 A b	80 A a	60 A c	67 A

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie: wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby.

Stres wczesny (S1) oraz jego kombinacja ze stresem późnym (S1 + S2) miały podobny wpływ na liczbę kłosów do wpływu na plon ziarna we wszystkich analizowanych latach prowadzenia eksperymentu (Rys. 7). W 2017 roku stres wczesny istotnie zmniejszył liczbę kłosów na glebach o uziarnieniu pgl, pgm, gpp, ptg i gs (Rys. 7a), w 2018 roku na pgl i gpp (Rys. 7b), zaś w 2019 roku na ps, pgl, pgm, gpp i gs (Rys. 7c). Wprowadzenie obu stresów spowodowało redukcję liczby kłosów we wszystkich latach badań i na wszystkich badanych glebach z wyjątkiem pl w 2019 roku (Rys. 7a –c).

5. Wyniki



Rys. 7. Wpływ stresów suszy na liczbę kłosów jęczmienia z wazonu w latach 2017 – 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stropy łącznie)

5. Wyniki

5.2.3. LICZBA ZIAREN Z WAZONU

Stwierdzono istotność wpływu wszystkich badanych czynników oraz interakcji rok x stres suszy i stres suszy x gatunek gleby na liczbę ziaren z wazonu (Tab. 15).

Tab. 15. Wyciąg z analizy wariancji liczby ziaren z wazonu

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	794,2	0,000
Stres suszy (S)	822,2	0,000
Gatunek gleby (G)	490,9	0,000
R x S	2,8	0,011
R x G	1,2	0,262
S x G	3,5	0,000
R x S x G	0,9	0,631

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Uszeregowanie lat badań pod względem malejącej liczby ziaren z wazonu było takie samo jak uszeregowanie lat pod względem plonu ziarna z wazonu i przedstawia się następująco: rok 2017 > rok 2019 > rok 2018 (Tab. 16). Średnia liczba ziaren uzyskanych w roku 2017 wynosiła 1321 szt. i była około 5% większa w porównaniu do roku 2019 i około 20% większa niż w roku 2018. We wszystkich latach badań, istotny wpływ na liczbę ziaren miał zarówno stres wczesny (S1) jak i wprowadzenie obydwu stresów (S1 + S2).

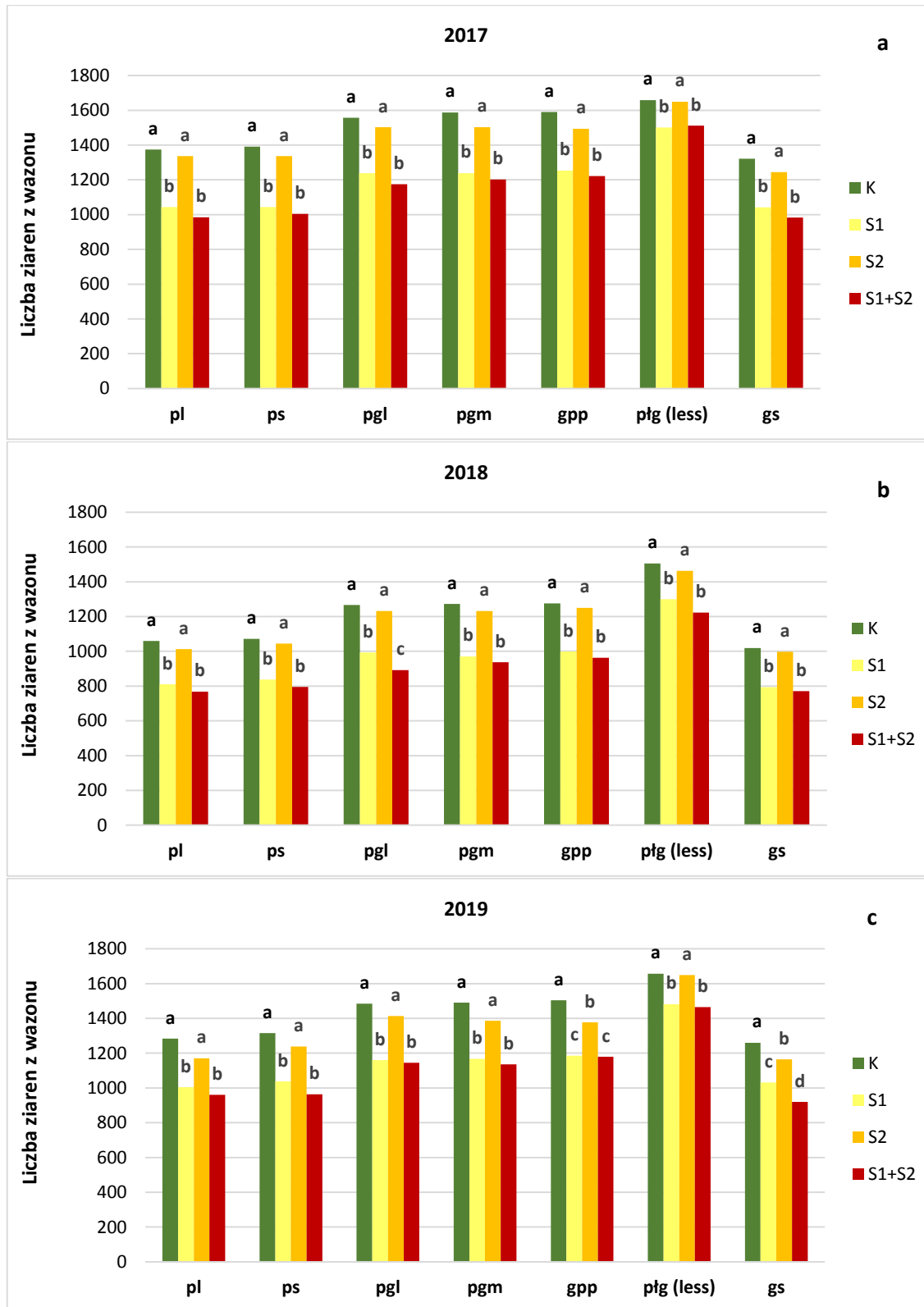
Tab. 16. Liczba ziaren z wazonu w latach prowadzenia eksperymentu zależnie od stresu suszy (K – kontrola; S1 – stres wczesny; S2 – stres późny; S1 + S2 – oba stresy łącznie)

Rok	Stres suszy				Średnio w latach
	K	S1	S2	S1 + S2	
2017	1497 A a*	1195 A b	1438 A a	1155 A b	1321 A
2018	1210 B a	958 B b	1176 C a	906 B b	1063 C
2019	1428 C a	1152 A b	1343 B a	1110 A b	1258 B

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą stresów suszy.

Stres wczesny oraz wprowadzenie obu stresów powodowało istotne zmniejszenie liczby ziaren z wazonu na wszystkich glebach, w każdym roku badań (Rys. 8 a – c). Z kolei stres późny wpłynął na istotne zmniejszenie liczby ziaren w kłosie tylko na glinie piaszczystej pylastej (9%) i glinie średniej (8%) w 2019 roku (Rys. 8c).

5. Wyniki



Rys. 8. Wpływ stresu suszy na liczbę ziaren z wazonu w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie)

5. Wyniki

5.2.4. MASA TYSIĄCA ZIAREN (MTZ)

Na masę tysiąca ziaren (MTZ) istotny wpływ miał gatunek gleby i stres suszy, a także współdziałanie czynników stres suszy x gatunek gleby (Tab. 17).

Tab. 17. Wyciąg z analizy wariancji masy tysiąca ziaren jęczmienia

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	0	0,845
Stres suszy (S)	185	0,000
Gatunek gleby (G)	85	0,000
R x S	1	0,889
R x G	0	0,964
S x G	2	0,006
R x S x G	0	1,000

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Stwierdzono istotne zróżnicowanie masy tysiąca ziaren (MTZ) jęczmienia pomiędzy gatunkami gleby (Tab. 18). Największą MTZ charakteryzowało się ziarno jęczmienia rosnącego na glinie średniej, natomiast najmniejszą na piasku luźnym i piasku słabogliniastym.

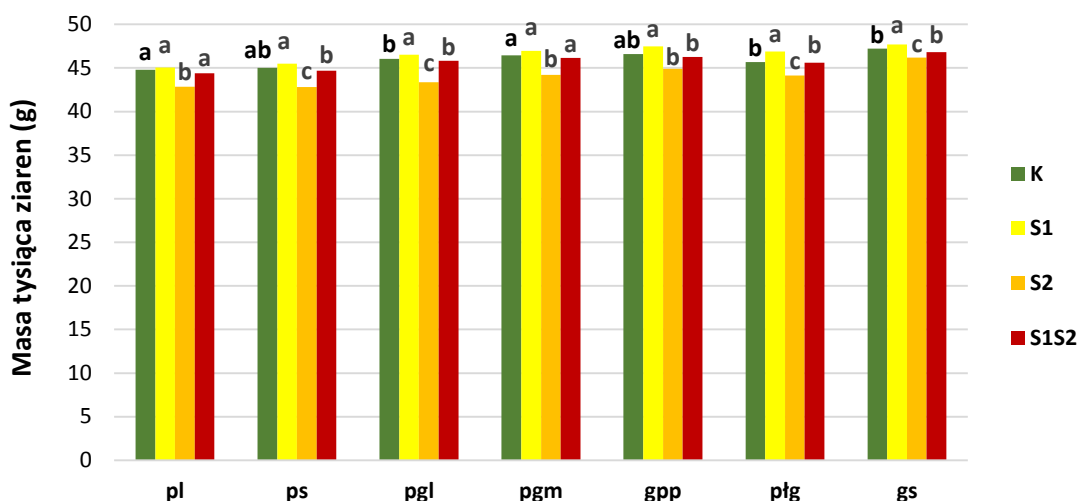
Tab. 18. Średnia masa tysiąca ziaren jęczmienia (g) zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby						
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	plg (less)	gs
Średnie MTZ (g) z lat 2017 - 2019	44,3 d	44,5 cd	45,4 bc	45,9 b	46,3 ab	45,6 b	47,0 a

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie.

Stresy suszy miały zróżnicowany wpływ na masę tysiąca ziaren jęczmienia (Rys. 9). Stres wczesny powodował zwiększenie MTZ w porównaniu do obiektu kontrolnego, jednak istotne różnice odnotowano tylko na piasku gliniastym lekkim, pyle gliniastym – lessie i glinie średniej. Z kolei stres późny wpływał na istotnie zmniejszenie MTZ we wszystkich obiektach z wyjątkiem gliny piaszczystej pylastej.

5. Wyniki



Rys. 9. Wpływ stresów suszy na MTZ jęczmienia w latach 2017 – 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie)

5.2.5. PLON SŁOMY Z WAZONU

Na masę słomy istotny wpływ wykazywały wszystkie czynniki doświadczenia oraz ich interakcje podwójne rok x stres suszy i rok x gatunek gleby, co przedstawiono w tabeli nr 19.

Tab. 19. Wyciąg z analizy wariancji masy słomy jęczmienia z wazonu

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	322,7	0,000
Stres suszy (S)	70,6	0,000
Gatunek gleby (G)	71,0	0,000
R x S	2,5	0,020
R x G	3,9	0,000
S x G	1,2	0,298
R x S x G	0,8	0,777

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

W latach 2017 i 2019 plon słomy jęczmienia był zbliżony i istotnie wyższy niż plon słomy uzyskany w roku 2018 (Tab. 20). Podobnie jak w przypadku plonu ziarna, najwyższy plon słomy uzyskano w roku 2017. Uzyskany wówczas średni plon wyniósł $144,6 \text{ g} \cdot \text{wazon}^{-1}$ i był o ok. 3% wyższy w porównaniu do roku 2019 i o ok. 11% wyższy w porównaniu do najmniej korzystnego – roku 2018. Stresy suszy powodowały na ogół

5. Wyniki

zmniejszenie plonu słomy we wszystkich latach badań. Wielkość redukcji związana była z terminem wprowadzenia stresu. Tak jak w przypadku plonu ziarna, istotne straty powodował stres wczesny S1 oraz stres wczesny i późny stosowane po sobie (S1 + S2). Stres późny ograniczał plon ziarna tylko w drugim roku badań.

Tab. 20. Plon słomy jęczmienia z wazonu (g) w latach prowadzenia eksperymentu zależnie od stresu suszy (K – kontrola; S1 – stres wczesny; S2 – stres późny; S1 + S2 – oba stresy łącznie)

Rok	Stres suszy				Średnio w latach
	K	S1	S2	S1 + S2	
2017	150,2 A a*	144,75 A b	146,2 A ab	137,3 A c	144,6 A
2018	133,4 C a	128,1 C b	129,3 B b	124,5 B c	128,8 B
2019	145,1 B a	138,2 B bc	142,4 A ab	135,1 A c	140,2 A

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą stresów suszy

Stwierdzono również istotne zróżnicowanie plonu słomy jęczmienia w latach badań pomiędzy gatunkami gleby. We wszystkich latach najwyższy plon uzyskano na glebie o uziarnieniu pyłu gliniastego – lessu, a najniższy na pl, ps, pgl i gs w roku 2017, oraz pl, ps i gs w roku 2018 i 2019 (Tab. 21).

Tab. 21. Plon słomy jęczmienia z wazonu (g) zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby						
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	płg (less)	gs
2017	138,4 A c*	138,7 A c	144,9 A bc	146,3 A b	146,7 A b	155,5 A a	141,9 A bc
2018	121,8 C c	124,0 B c	130,9 B b	129,6 B b	129,1 B b	136,6 B a	129,7 B bc
2019	131,4 B d	136,3 A cd	142,2 A bc	142,2 A bc	144,2 A b	153,3 A a	131,8 B d

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby.

5. Wyniki

5.2.6. DŁUGOŚĆ PĘDÓW GŁÓWNYCH

Wszystkie czynniki doświadczalne i ich interakcje miały istotny wpływ na długość pędów głównych roślin jęczmienia (Tab. 22).

Tab. 22. Wyciąg z analizy wariancji długości pędów głównych roślin jęczmienia

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	1141	0,000
Stres suszy (S)	1665	0,000
Gatunek gleby (G)	1118	0,000
R x S	7	0,038
R x G	8	0,000
S x G	9	0,000
R x S x G	2	0,000

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Wykazano, że długość pędów głównych jęczmienia była zbliżona, ale istotnie zróżnicowana w latach badań (Tab. 23), na co duży wpływ miał przebieg warunków termicznych. Wysokie temperatury obserwowane przez cały sezon wegetacyjny w 2018 roku sprzyjały szybszemu następowaniu kolejnych faz rozwojowych, co spowodowało skrócenie okresu wzrostu roślin, dlatego najkrótszymi pędami charakteryzowały się rośliny w drugim roku badań (średnio 46,0 cm), natomiast w pozostałych latach pędy były dłuższe średnio o 3,4 cm w 2017 r. i o 3,6 cm w 2019 r. W każdym roku prowadzenia badań, na długość pędów głównych roślin jęczmienia istotny wpływ miał stres wczesny (S1) oraz stres podwójny (S1 + S2), przy czym redukcja długości pędów głównych była większa w przypadku stresu podwójnego.

Tab. 23. Długość pędów głównych jęczmienia w latach prowadzenia eksperymentu zależnie od stresu suszy (K – kontrola; S1 – stres wczesny; S2 – stres późny; S1 + S2 – oba stresy łącznie)

Rok	Stres suszy				Średnio w latach
	K	S1	S2	S1 + S2	
2017	54,0 A a*	47,9 A b	52,9 A a	42,7 B c	49,4 A
2018	49,0 B a	45,0 B b	48,2 B a	41,8 B c	46,0 B
2019	52,6 A a	48,8 A b	51,8 A a	45,0 A c	49,6 A

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą stresów suszy.

5. Wyniki

Na długość pędów głównych istotnie wpływał również gatunek gleby. We wszystkich latach badań najdłuższe pędy stwierdzono na pyle gliniastym - lessie, zaś najkrótsze na glinie średniej w 2017 i 2019 roku oraz na piasku luźnym, piasku słabogliniastym i glinie średniej w 2018 roku (Tab. 24).

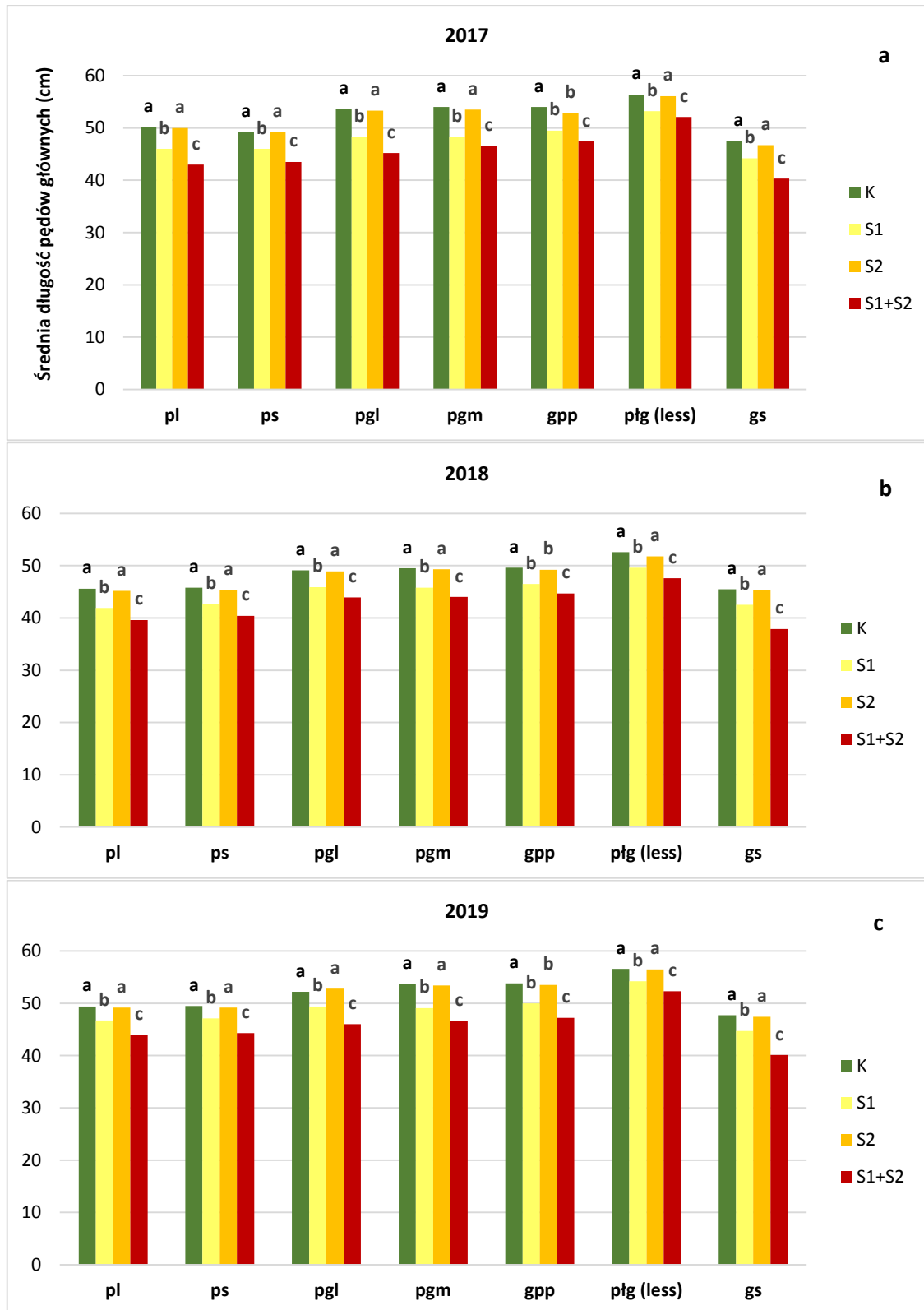
Tab. 24. Długość pędów głównych (cm) zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby						
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	płg (less)	gs
2017	47,0 A c*	47,6 A c	50,3 A b	50,6 A b	51,0 A b	54,4 A a	44,7 A d
2018	43,1 B c	43,9 B c	46,5 B b	47,2 B b	48,6 B b	50,4 B a	42,3 B c
2019	47,5 A cd	47,8 A c	50,2 A b	50,7 A b	51,1 A b	54,9 A a	45,1 A d

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; małe litery dotyczą gatunków gleby; wielkie litery dotyczą lat

Stres wczesny i wprowadzenie obu stresów po sobie powodowało istotne skrócenie długości pędów głównych na wszystkich glebach w każdym roku badań (Rys. 10 a – c).

5. Wyniki



Rys. 10. Wpływ stresów suszy na długość pędów głównych w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresse łącznie)

5. Wyniki

5.2.7. PLON CZĘŚCI NADZIEMNEJ Z WAZONU

Stwierdzono istotny wpływ wszystkich czynników doświadczalnych oraz interakcji rok x gatunek gleby na plon części nadziemnej jęczmienia z wazonu (Tab. 25).

Tab. 25. Wyciąg z analizy wariancji plonu części nadziemnej jęczmienia z wazonu

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	767,8	0,000
Stres suszy (S)	344,9	0,000
Gatunek gleby (G)	2,92,2	0,000
R x S	2,0	0,595
R x G	2,9	0,000
S x G	1,6	0,660
R x S x G	0,7	0,860

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Plon całej części nadziemnej roślin jęczmienia z wazonu był istotnie zróżnicowany w latach badań (Tab. 26). Najbardziej korzystnym dla plonowania jęczmienia był rok 2017. Uzyskany wówczas średni plon wyniósł $204,8 \text{ g} \cdot \text{wazon}^{-1}$ i był ok. 4% wyższy w porównaniu do roku 2019 i ok. 14% wyższy w porównaniu do najmniej korzystnego – roku 2018. Stwierdzono również istotne zróżnicowanie plonu części nadziemnej roślin jęczmienia pomiędzy gatunkami gleby. We wszystkich latach badań najwyższy plon uzyskano na pyle gliniastym – lessie, natomiast najniższy na piasku luźnym, piasku słabogliniastym i glinie średniej w roku 2017, na piasku luźnym i piasku słabogliniastym w roku 2018 oraz na piasku luźnym i glinie średniej w roku 2019.

Tab. 26. Plon części nadziemnej jęczmienia z wazonu (g) zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby							Średnia w latach
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	ptg (less)	gs	
2017	191 A c*	191 A c	207 A b	209 A b	211 A b	227 A a	196 A c	204,6 A
2018	164 B d	165 B d	181 C b	180 C b	181C b	199 C a	170 C c	177,1 C
2019	180 A d	187 A c	201 B b	202 B b	205 B b	224 B a	183 B cd	197,4 B

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby

5. Wyniki

5.2.8. WSKAŹNIK ZBIORU (HI -HARVEST INDEX)

Na wskaźnik zbioru istotny wpływ miały wszystkie czynniki doświadczenia oraz interakcje rok x stres suszy, rok x gatunek gleby oraz stres suszy x gatunek gleby (Tab. 27).

Tab. 27. Wyciąg z analizy wariancji wskaźnika zbioru HI jęczmienia jarego

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	119,7	0,000
Stres suszy (S)	256,9	0,000
Gatunek gleby (G)	150,7	0,000
R x S	4,5	0,000
R x G	4,8	0,000
S x G	3,7	0,000
R x S x G	0,9	0,564

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

W latach 2017 i 2019 średni wskaźnik zbioru jęczmienia jarego (HI) dla poszczególnych gleb pozostawał na zbliżonym poziomie i wynosił odpowiednio 0,292 i 0,289, natomiast w roku 2018 wartość wskaźnika była o około 7% niższa w porównaniu do roku 2017 i o około 6% niższa w porównaniu do roku 2019 (Tab. 28). We wszystkich latach badań istotne zmniejszenie wartości wskaźnika HI powodował zarówno stres wczesny S1 i stres podwójny S1 + S2, natomiast zmniejszenie wartości wskaźnika na skutek stresu późnego S2 stwierdzono tylko w roku 2019.

Tab. 28. Wskaźnik zbioru HI w latach prowadzenia eksperymentu zależnie od stresu suszy (K – kontrola; S1 – stres wczesny; S2 – stres późny; S1 + S2 – oba stesy łącznie)

Rok	Stres suszy				Średnio w latach
	K	S1	S2	S1 + S2	
2017	0,316 A a*	0,277 A b	0,303 A a	0,272 A b	0,292 A
2018	0,295 B a	0,255 B b	0,285 B a	0,248 B b	0,271 B
2019	0,312 A a	0,279 A c	0,292 AB b	0,271 A c	0,289 A

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą stresów suszy

5. Wyniki

Gatunek gleby istotnie wpływał na wskaźnik zbior HI. Najwyższą wartość wskaźnika stwierdzono na pług, gpp, pgm i pgl w roku 2017 oraz na pług w roku 2018 i 2019, zaś najniższą wartość na na pl, ps i gs we wszystkich latach badań (Tab. 29).

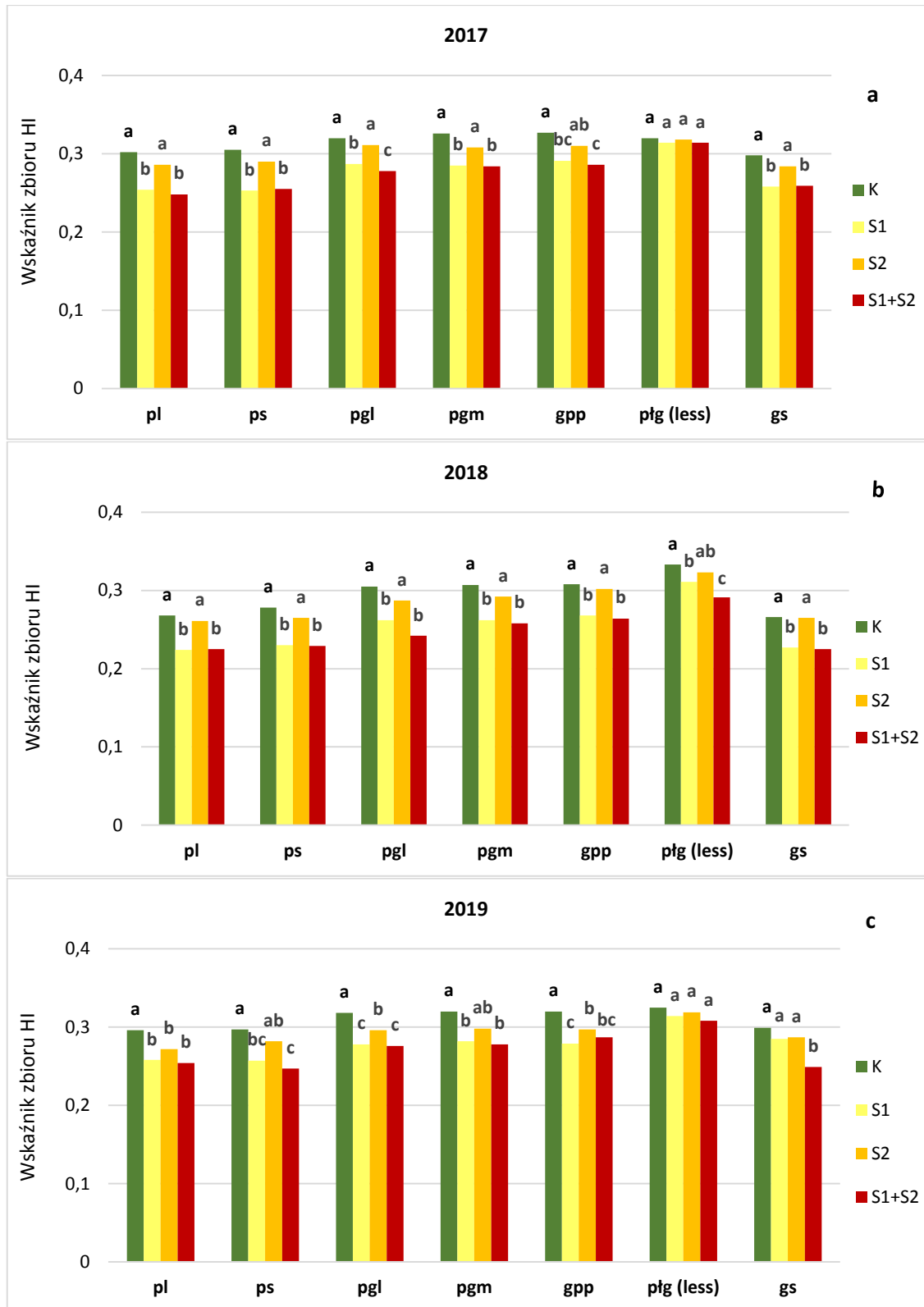
Tab. 29. Wskaźnik zbioru jęczmienia jarego zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby						
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	pług (less)	gs
2017	0,272 A b*	0,276 A b	0,299 A a	0,301 A a	0,304 A a	0,317 A a	0,275 A b
2018	0,245 B c	0,251 B c	0,274 B b	0,280 B b	0,285 C b	0,314 A a	0,246 B c
2019	0,271 A c	0,271 A c	0,292 A b	0,294 A b	0,296 B b	0,316 A a	0,280 A bc

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby

Stres wczesny (S1) miał istotny wpływ na zmniejszenie wskaźnika zbioru jęczmienia we wszystkich latach badań i na wszystkich gatunkach gleb z wyjątkiem pyłu gliniastego w latach 2017 i 2019 roku oraz gliny średniej w 2019 roku (Rys. 11a – c). Stres późny (S2) powodował zmniejszenie wartości wskaźnika jedynie w 2019 roku na piasku luźnym, piasku gliniastym lekkim i glinie piaszczystej pylastej (Rys. 11c), natomiast kombinacja z podwójnym stresem (S1 + S2) we wszystkich latach i na wszystkich glebach z wyjątkiem pyłu gliniastego w 2017 i 2019 roku (Rys. 11a; 11c).

5. Wyniki



Rys. 11. Wpływ stresów suszy na wskaźnik zbioru HI w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresse łącznie)

5. Wyniki

5.2.9. ZALEŻNOŚCI KORELACYJNE POMIĘDZY PLONEM I ELEMENTAMI STRUKTURY PLONU

W tabeli 30 przedstawiono korelacje pomiędzy plonem i jego elementami. Najsilniejszą dodatnią korelację wykazano pomiędzy plonem ziarna z wazonu a liczbą ziaren z wazonu ($r = 0,986$), co oznacza, że liczba ziaren była elementem, który niemal całkowicie decydował o plonie ziarna.

Tab. 30. Współczynniki korelacji pomiędzy plonem i elementami plonu

Cecha	Liczba kłosów z wazonu	Liczba ziaren z wazonu	Masa tysiąca ziaren (MTZ)	Plon słomy z wazonu	Długość pędów głównych
Plon ziarna z wazonu	0,827*	0,986	0,055	0,786	0,898
Liczba kłosów z wazonu		0,832	-0,039	0,690	0,860
Liczba ziaren z wazonu			-0,112	0,778	0,918
Masa tysiąca ziaren (MTZ)				0,034	-0,140
Plon słomy z wazonu					0,736

* - współczynnik korelacji; ** - pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

5.3. WSKAŹNIKI FIZJOLOGICZNE

5.3.1. WSKAŹNIKI WYMIANY GAZOWEJ.

Analiza wariancji analizowanych wskaźników fizjologicznych tj. intensywności fotosyntezy netto i przewodnictwa szparkowego wykazała istotny wpływ rozpatrywanych lat oraz współdziałania lat z czynnikami doświadczenia, dlatego wyniki przedstawiono oddzielnie dla każdego roku badań.

5.3.1.1. INTENSYWNOŚĆ FOTOSYNTEZY NETTO

Przeprowadzona analiza wariancji, we wszystkich latach badań wykazała istotny wpływ badanych czynników na intensywność fotosyntezy. Udowodniono także współdziałania pomiędzy tymi czynnikami (Tab. 31).

5. Wyniki

Tab. 31. Wyciąg z analizy wariancji intensywności fotosyntezy netto w latach prowadzenia eksperymentu

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
2017 rok		
Stres suszy (S)	151,6	0,000
Gatunek gleby (G)	116,1	0,000
Termin pomiaru (T)	5193,4	0,000
S x G	3,5	0,003
S x T	389,5	0,000
G x T	16,1	0,000
S x G x T	3,1	0,000
2018 rok		
Stres suszy (S)	62,1	0,000
Gatunek gleby (G)	64,7	0,000
Termin pomiaru (T)	6323,1	0,000
S x G	5,1	0,000
S x T	235,4	0,000
G x T	9,0	0,000
S x G x T	2,8	0,001
2019 rok		
Stres suszy (S)	173,7	0,000
Gatunek gleby (G)	82,0	0,000
Termin pomiaru (T)	4019,2	0,000
S x G	1,8	0,030
S x T	442,2	0,000
G x T	8,82	0,000
S x G x T	2,5	0,001

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Intensywność fotosyntezy netto była zbliżona w latach 2018 i 2019 i jednocześnie mniejsza niż w roku 2017. Gatunek gleby słabo różnicował poziom tempa przebiegu procesu fotosyntezy roślin jęczmienia w latach badań (Tab. 32).

5. Wyniki

Tab. 32. Średnia intensywność fotosyntezy netto ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby							Średnia w latach
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	płg (less)	gs	
2017	15,0 A c*	15,1 A c	16,4 A bc	16,7 A b	16,9 A b	18,7 A a	17,7 A ab	16,6 A
2018	14,1 C b	14,6 B b	16,0 B a	16,1 B a	16,2 B a	16,9 B a	16,6 B a	15,8 B
2019	14,4B d	14,6 B d	15,6 C c	16,0 B c	17,2 A ab	17,7 B a	16,8 B b	16,0 B

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby

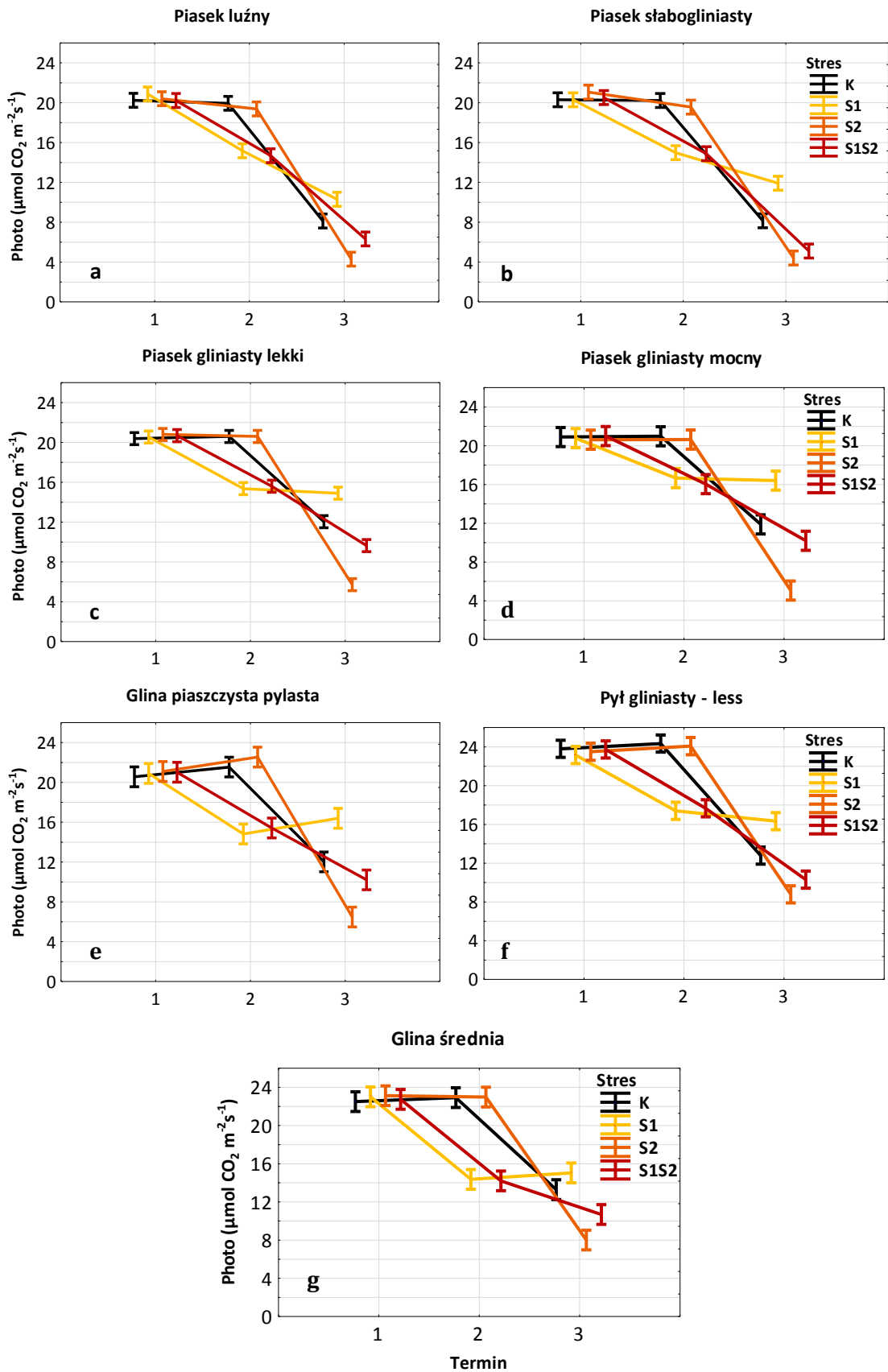
Na rysunkach 12 - 14 przedstawiono wpływ stresów suszy na zmiany intensywności fotosyntezy netto w trakcie wegetacji roślin jęczmienia na różnych gatunkach gleb, z uwzględnieniem terminów pomiarów.

Wykazano, że podczas pierwszego pomiaru (tuż przed wprowadzeniem stresu wczesnego – BBCH 31), czyli przy optymalnej wilgotności gleby, wszystkie obiekty charakteryzowały się intensywnością fotosyntezy na zbliżonym poziomie (Rys. 12 - 14).

W drugim terminie pomiarów - pod koniec fazy kwitnienia (BBCH 69), w obiektach optymalnie nawodnionych (K i S2), intensywność fotosyntezy pozostawała na stałym i wysokim poziomie. Natomiast wprowadzenie wczesnego stresu suszy (S1), wpływało na znaczne ograniczenie intensywności fotosyntezy w obiektach S1 i S1 + S2, która zmniejszała się od około 20% do nawet 45% (Rys. 12 – 14).

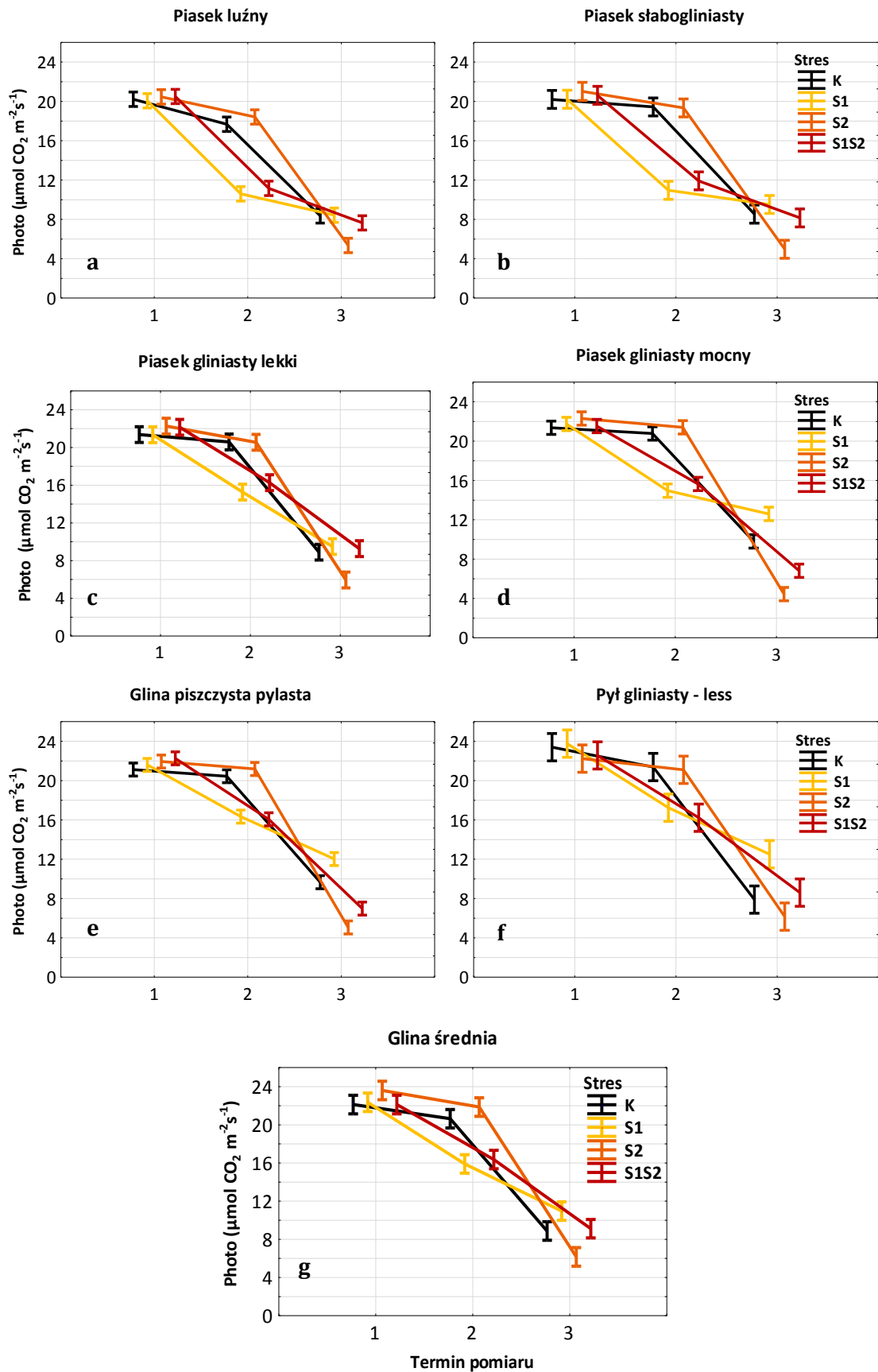
W trzecim terminie pomiarów - pomiędzy fazą dojrzałości mleczej (BBCH 75), a fazą dojrzałości woskowej (BBCH 80), najwyższymi wartościami fotosyntezy charakteryzowały się rośliny jęczmienia w obiektach, w których po zakończeniu stresu wczesnego (S1) przywrócono optymalne nawodnienie. Wprowadzenie późnego stresu suszy (S2), powodowało podobną redukcję tempa fotosyntezy roślin jak stres wczesny, tj: od około 22% do około 55% we wszystkich obiektach (z wyjątkiem płg - less w 2018 roku), w których do momentu wprowadzenia tego stresu utrzymywano warunki optymalnej wilgotności gleby. W obiektach, które uprzednio poddane były działaniu stresu S1, wpływ stresu S2 na intensywność fotosyntezy był mniejszy (4,5%-37%), ale na ogół istotny statystycznie (Rys. 12 -14).

5. Wyniki



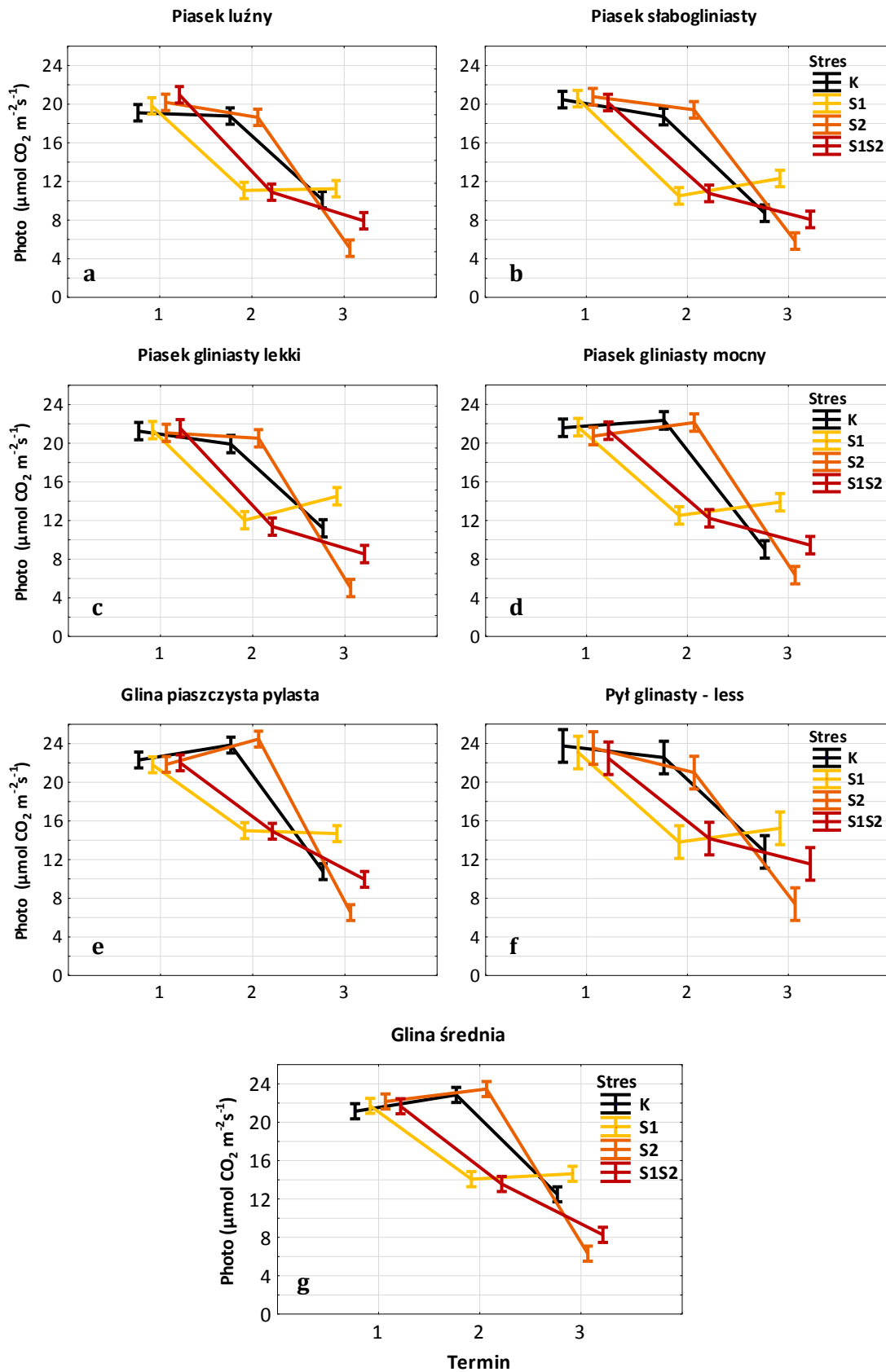
Rys. 12. Wpływ terminu pomiaru na tempo fotosyntezy netto (Photo, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) jęczmienia zależnie od stresu suszy w roku 2017 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresse łącznie)

5. Wyniki



Rys. 13. Wpływ terminu pomiaru na tempo fotosyntezy netto (Photo, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) jęczmienia zależnie od stresu suszy w roku 2018 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresse łącznie)

5. Wyniki



Rys. 14. Wpływ terminu pomiaru na tempo fotosyntezy netto (Photo, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) jęczmienia zależnie od stresu suszy w roku 2019 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie)

5. Wyniki

5.3.1.2. PRZEWODNICTWO SZPARKOWE

Przeprowadzona analiza wariancji wykazała, że przewodnictwo szparkowe w istotnym stopniu zależne było od stresu suszy, gatunku gleby jak i terminu wykonywania pomiarów. Udowodniono także współdziałania pomiędzy tymi czynnikami (Tab. 33).

Tab. 33. Wyciąg z analizy wariancji przewodnictwa szparkowego w latach prowadzenia eksperymentu

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
2017 rok		
Stres suszy (S)	223,02	0,000
Gatunek gleby (G)	178	0,000
Termin pomiaru (T)	6150,27	0,000
S x G	2,33	0,000
S x T	479,90	0,000
G x T	47,28	0,000
S x G x T	1,27	0,146
2018 rok		
Stres suszy (S)	142,25	0,000
Gatunek gleby (G)	129,29	0,000
Termin pomiaru (T)	6232,75	0,000
S x G	1,81	0,023
S x T	340,23	0,000
G x T	31,64	0,000
S x G x T	1,62	0,016
2019 rok		
Stres suszy (S)	200,26	0,000
Gatunek gleby (g)	179,36	0,000
Termin pomiaru (T)	6007,39	0,000
S x G	2,06	0,007
S x T	391,21	0,000
G x T	15,65	0,000
S x G x T	2,00	0,001

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Przeciętne wartości przewodnictwa szparkowego w latach 2017 i 2019 były zbliżone i istotnie wyższe niż w roku 2018. Stwierdzono również istotne zróżnicowanie wartości wskaźnika pomiędzy gatunkami gleby. W roku 2017 i 2019 najwyższą wartością przewodnictwa szparkowego charakteryzowały się rośliny jęczmienia rosnące na pług -

5. Wyniki

lessie, zaś w roku 2018 - na pług - lessie, gs i gpp. Z kolei najniższe wartości badanego parametru, we wszystkich latach odnotowano na glebach bardzo lekkich (pl, ps) (Tab. 34).

Tab. 34. Przewodnictwo szparkowe ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby							Średnia w latach
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	pług (less)	gs	
2017	0,174 A d *	0,182 A d	0,214 A c	0,220 A bc	0,220 B bc	0,260 A a	0,226 A b	0,214 A
2018	0,170 A d	0,178 AB d	0,191 C c	0,199 C c	0,211 C b	0,229 C a	0,225 A a	0,200 B
2019	0,168 A d	0,176 B d	0,204 B c	0,213 B c	0,230 A b	0,245 B a	0,231 A b	0,210 A

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby

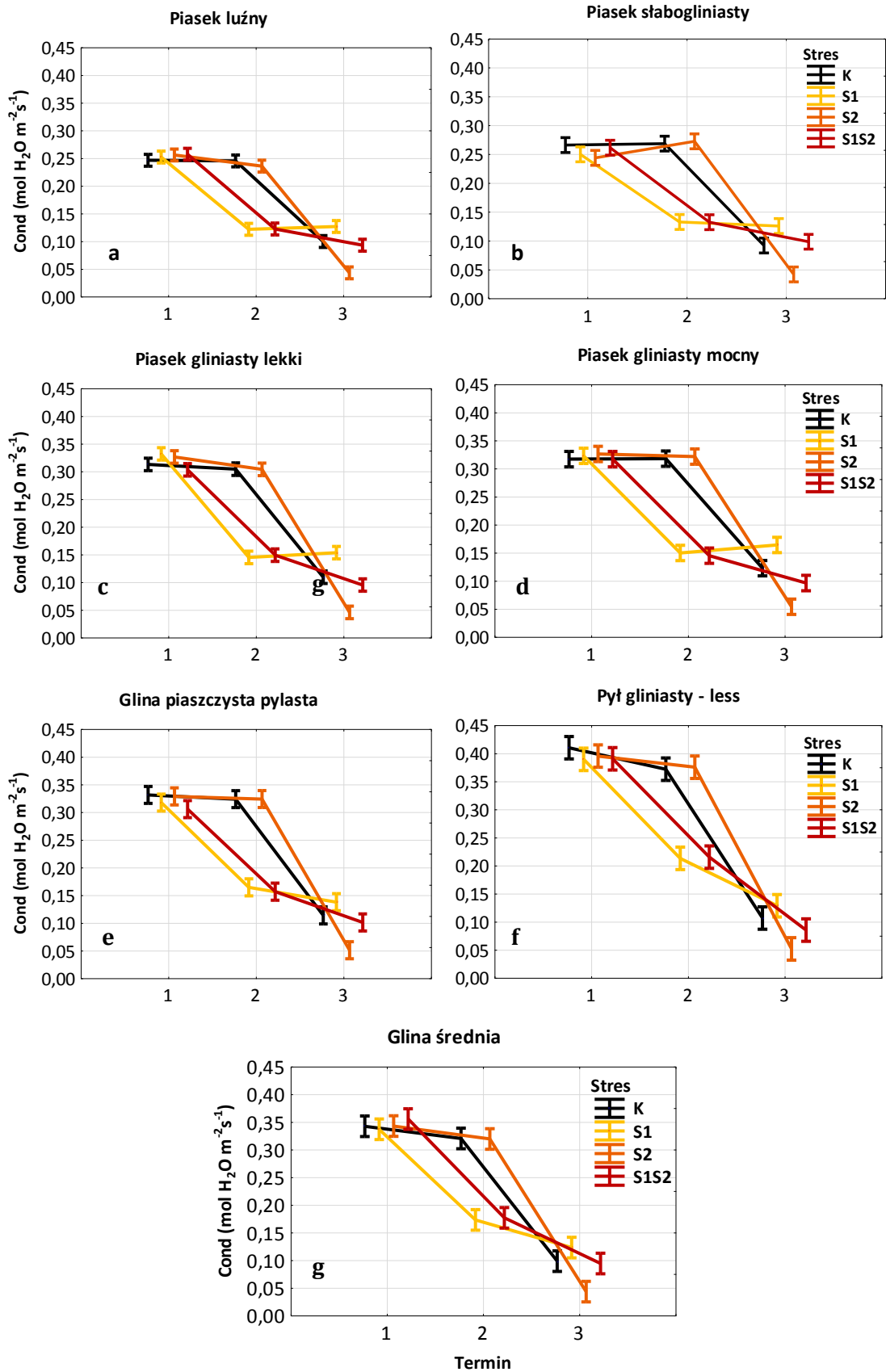
Na rysunkach 15 - 17 przedstawiono zmiany w przewodnictwie szparkowym w okresie wzrostu i rozwoju jęczmienia na różnych gatunkach gleb, z uwzględnieniem terminów prowadzonych pomiarów. Badania wykazały, że w przewodnictwo szparkowe w obiektach kontrolnych w pierwszym i drugim terminie pomiarów pozostawało na zbliżonym poziomie, natomiast w ostatnim terminie ulegało znacznemu zmniejszeniu.

W pierwszym terminie pomiarów przewodnictwo szparkowe roślin jęczmienia we wszystkich obiektach osiągało porównywalne wartości (Rys. 15 – 17).

W drugim terminie pomiarów, w obiektach, w których nie wprowadzono stresu suszy (K i S2), wartość przewodnictwa szparkowego pozostała na podobnym poziomie jak w pomiarze pierwszym. Natomiast wprowadzenie wczesnego stresu suszy (S1) w sposób istotny ograniczyło przewodnictwo szparkowe roślin (od 35% do 50%) w obiektach S1 i S1 + S2 (Rys. 15 -17).

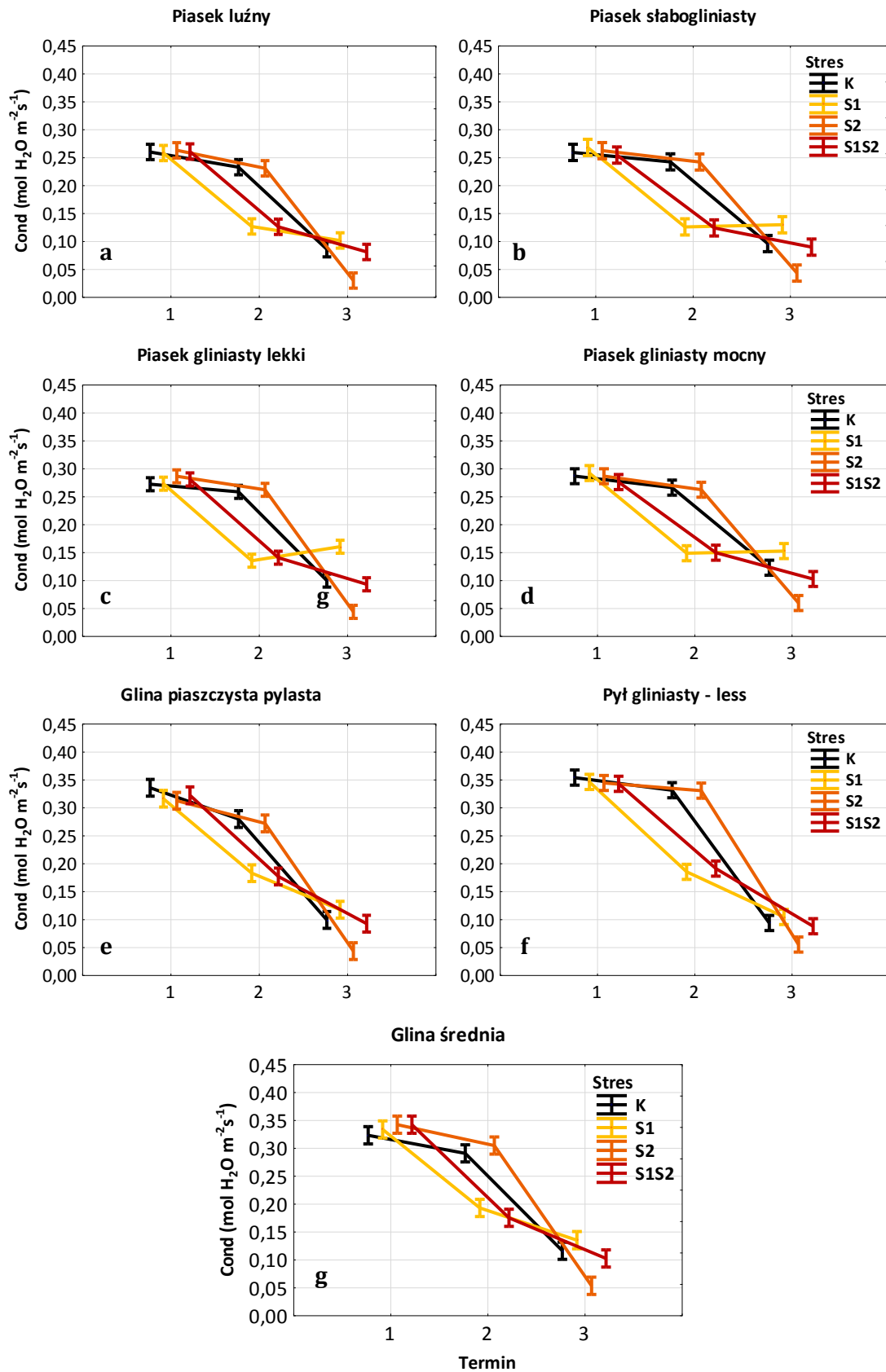
Wyniki pomiarów wykonywanych w ostatnim terminie wykazały, że wprowadzenie późnego stresu suszy (S2), ograniczyło przewodnictwo szparkowe w największym stopniu w obiektach, w których do momentu wprowadzenia stresu utrzymywano warunki optymalnego nawodnienia (S2). Wówczas średnia wartość wskaźnika była niższa od około 40% do około 70% od wartości parametru w obiektach kontrolnych. Z kolei w obiektach z obydwoma stresami, wartość przewodnictwa szparkowego była niższa od około 4% do około 35% w porównaniu do kontroli. Natomiast przywrócenie optymalnych warunków wilgotnościowych gleby po zakończeniu stresu wczesnego S1, sprawiło, że rośliny w tych obiektach charakteryzowały się najwyższymi wartościami parametru (Rys. 15 -17).

5. Wyniki



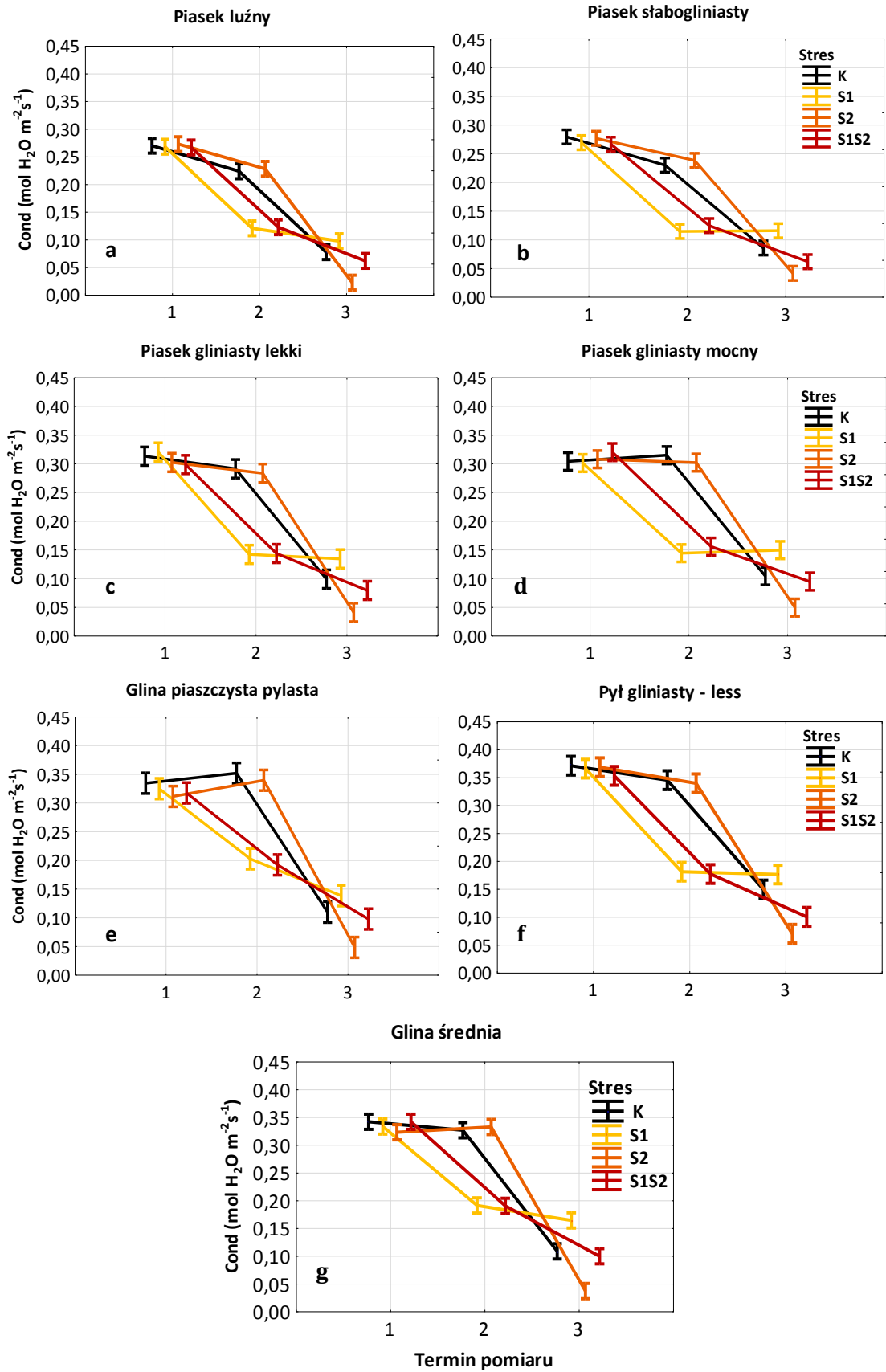
Rys. 15. Wpływ terminu pomiaru na przewodnictwo szparkowe (Cond, mol H₂O m⁻²s⁻¹) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2017(K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresse łącznie)

5. Wyniki



Rys. 16. Wpływ terminu pomiaru na przewodnictwo szparkowe (Cond, mol H₂O m⁻²s⁻¹) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2018 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie)

5. Wyniki



Rys. 17. Wpływ terminu pomiaru na przewodnictwo szparkowe (Cond, mol H₂O m⁻²s⁻¹) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2019 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie)

5. Wyniki

5.3.1.3. INTENSYWNOŚĆ TRANSPIRACJI

Z przeprowadzonej analizy wariancji (Tab. 35) wynika, że na intensywność transpiracji, w poszczególnych latach badań, istotny wpływ miały wszystkie czynniki główne oraz współdziałania pomiędzy tymi czynnikami.

Tab. 35. Wyciąg z analizy wariancji intensywności transpiracji w latach prowadzenia eksperymentu

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
2017 rok		
Stres suszy (S)	255,0	0,000
Gatunek gleby (G)	149,4	0,000
Termin pomiaru (T)	3762,5	0,000
S x G	5,3	0,000
S x T	680,2	0,000
G x T	15,1	0,000
S x G x T	3,7	0,000
2018 rok		
Stres suszy (S)	228,79	0,000
Gatunek gleby (G)	96,00	0,000
Termin pomiaru (T)	3283,31	0,000
S x G	2,07	0,007
S x T	581,85	0,000
G x T	11,77	0,000
S x G x T	2,08	0,004
2019 rok		
Stres suszy (S)	629,3	0,000
Gatunek gleby (g)	312,1	0,000
Termin pomiaru (T)	6925,9	0,000
S x G	6,1	0,000
S x T	1561,0	0,000
G x T	44,6	0,000
S x G x T	7,0	0,000

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Przeciętne wartości intensywności transpiracji były na podobnym poziomie we wszystkich latach badań. Gatunek gleby istotnie różnicował intensywność transpiracji wody z liści jęczmienia. Na ogół wartości parametru zwiększały się wraz ze wzrostem zawartości części spławialnych w glebie (Tab. 36).

5. Wyniki

Tab. 36. Intensywność transpiracji wody ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby							Średnia w latach
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	płg (less)	gs	
2017	3,00 A c*	3,12 A bc	3,35 A abc	3,45 A abc	3,66 A ab	3,90A a	3,76 A a	3,46 A
2018	2,93 A b	3,02 A b	3,20 A ab	3,26 A ab	3,59 A ab	3,74 A a	3,59 B ab	3,33 A
2019	2,96 A b	3,01 A b	3,36 A ab	3,44 A ab	3,74 A a	3,79 A a	3,67 AB a	3,42 A

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby

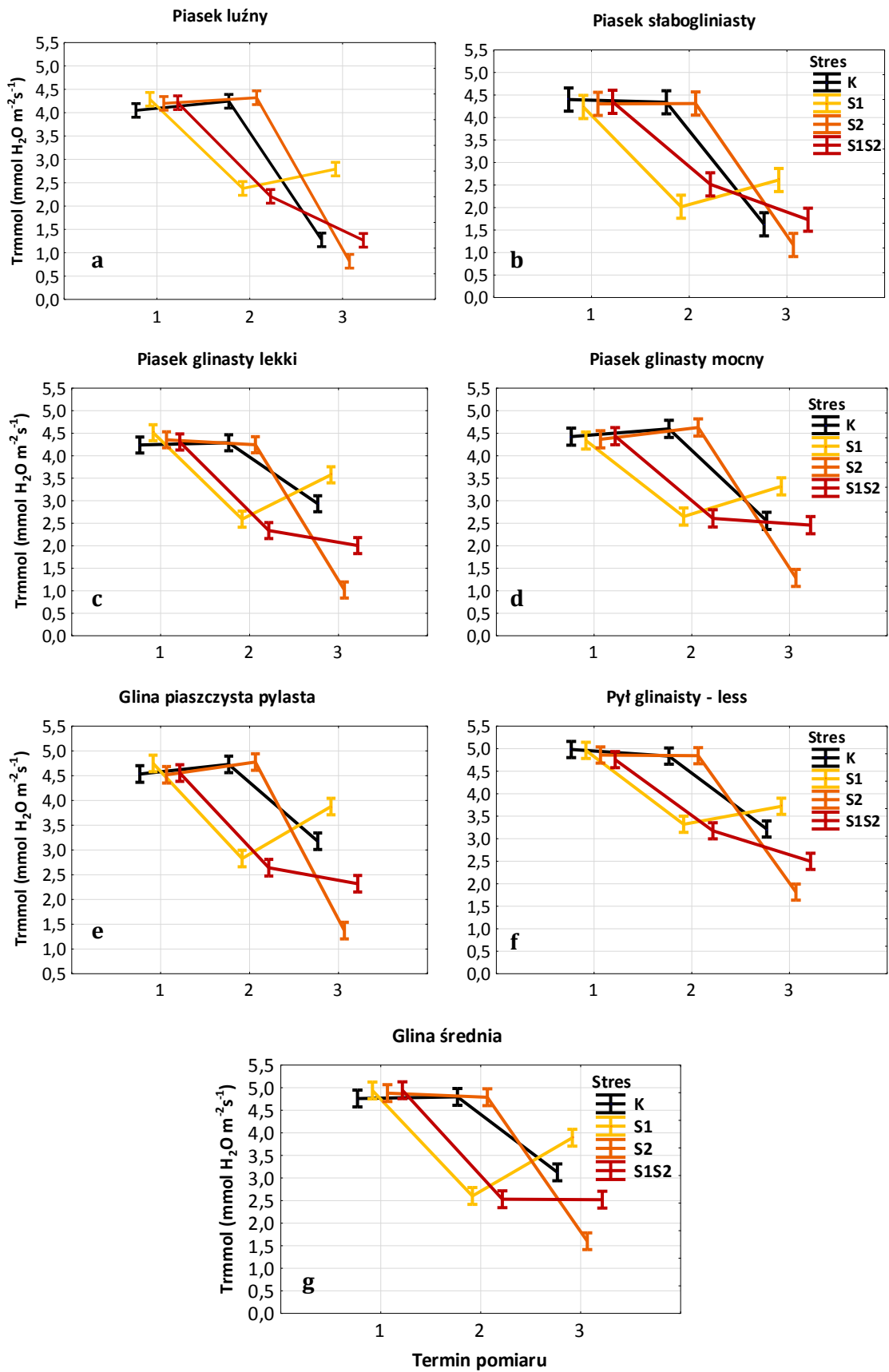
Rysunki 18 - 20 obrazują zmiany intensywności transpiracji w okresie wegetacji roślin jęczmienia na różnych gatunkach gleb, z uwzględnieniem wpływu terminów wykonywania pomiarów oraz stresów suszy. W obiektach kontrolnych woda transpirowała ze zbliżoną intensywnością podczas pierwszego i drugiego pomiaru, natomiast podczas ostatniego pomiaru intensywność procesu ulegała znacznemu zmniejszeniu.

Wykazano, że w pierwszym terminie, czyli przed wprowadzeniem stresu suszy, wartość wskaźnika we wszystkich obiektach była porównywalna (Rys. 18 -20).

Tuż po zakończeniu stresu wczesnego, czyli w drugim terminie pomiarów, w obiektach optymalnie nawodnionych (K i S2), intensywność transpiracji pozostawała na podobnym poziomie jak w pomiarze pierwszym. Wprowadzenie wczesnego stresu suszy (S1) powodowało istotne zmniejszenie intensywności procesu w porównaniu do kontroli, wynoszące od około 35% do około 50% we wszystkich obiektach i we wszystkich latach badań (Rys. 18 - 20).

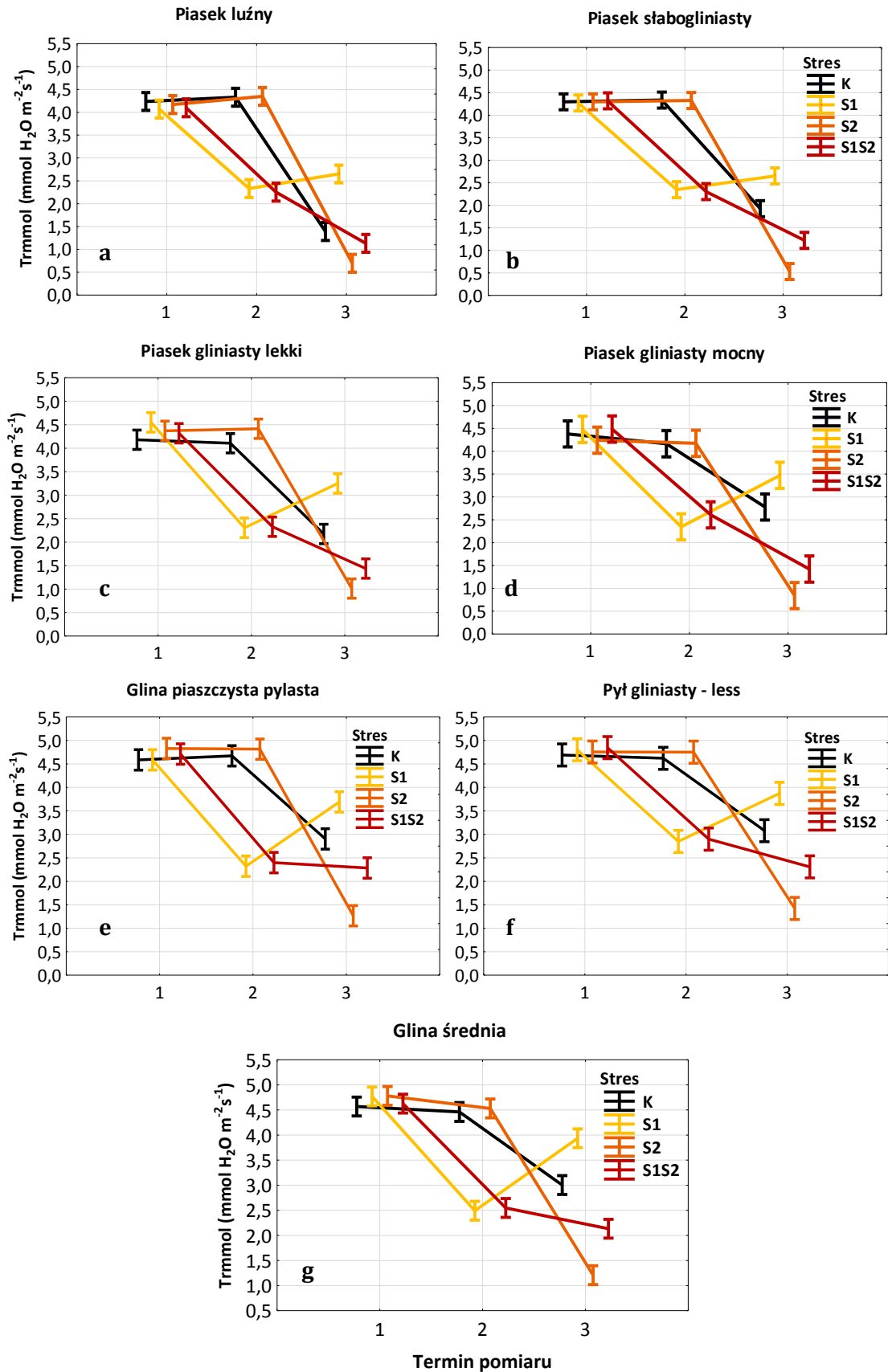
Z pomiarów wykonanych w trzecim terminie, wynika że stres późny (S2), tak jak w przypadku intensywności fotosyntezy i przewodnictwa szparkowego, w największym stopniu powodował ograniczenie intensywności w obiektach, w których do momentu wprowadzenia stresu S2 utrzymywano optymalne warunki wilgotnościowe. Wówczas wydajność procesu była mniejsza od około od 22% do 74% w stosunku do obiektów kontrolnych. Natomiast w obiektach, w których rośliny poddane były obu stresom, woda transpirowała z intensywnością od 1% do 50% mniejszą niż w kontroli. Jedynie w obiektach piaskiem słabogliniastym w 2017 transpiracja wykazywała ok. 6% większą intensywność w stosunku do kontroli. Z kolei po doprowadzeniu wilgotności gleby do poziomu optymalnego po zakończeniu stresu wczesnego, intensywność transpiracji nasilała się i osiągała wartości od ok. 12% do ok. 68% wyższe w porównaniu do poprzedniego pomiaru i od 16% do 118% w porównaniu do kontroli (Rys. 18 – 20).

5. Wyniki



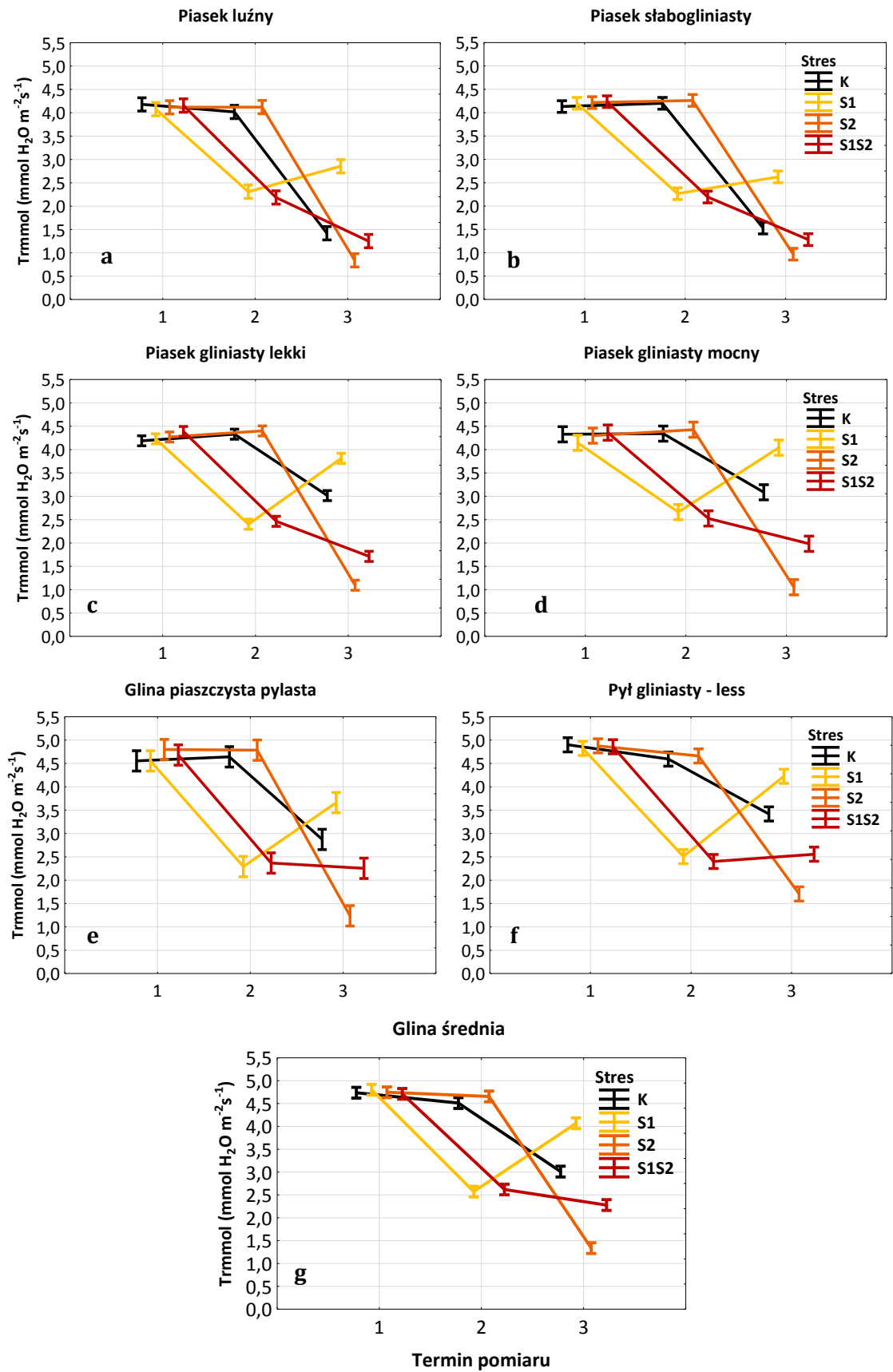
Rys. 18. Wpływ terminu pomiaru na intensywność transpiracji (Tr_{mmol} , $mmol H_2O m^{-2} s^{-1}$) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2017 (K - kontrola, S1 - stres wczesny, S2 - stres późny, S1 + S2 - oba stesy łącznie)

5. Wyniki



Rys. 19. Wpływ terminu pomiaru na intensywność transpiracji (Tr_{mmol} , $mmol H_2O m^{-2} s^{-1}$) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2018 (K - kontrola, S1 stres suszy, S2 stres późny, S1 + S2 oba stresy łącznie)

5. Wyniki



Rys. 20. Wpływ terminu pomiaru na intensywność transpiracji (T_{rmmol} , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2019 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie)

5. Wyniki

5.3.1.4. PODSUMOWANIE WSKAŹNIKÓW WYMIANY GAZOWEJ

Analiza statystyczna wykazała silne dodatnie korelacje pomiędzy wskaźnikami wymiany gazowej (Tab. 37). Wszystkie współczynniki korelacji wykazywały wysoką istotność, zatem wskaźnikami tymi można się posługiwać zamiennie, na przykład przy badaniu współdziałania wszystkich wskaźników fizjologicznych z plonem jęczmienia.

Tab. 37. Współczynniki korelacji prostej pomiędzy wskaźnikami wymiany gazowej średnio ze wszystkich lat prowadzenia badań

	Intensywność fotosyntezy netto ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Przewodnictwo szparkowe ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
Przewodnictwo szparkowe ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0,938*	
Intensywność transpiracji ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0,912*	0,900*

* pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

5.3.2. INDEKS ZIELONOŚCI LIŚCIA SPAD

Analiza wariancji wykazała istotność wpływu gatunku gleby, stresów suszy i terminów pomiarów na indeks zieloności liścia SPAD. Wykazała również współdziałania pomiędzy tymi czynnikami (Tab. 38).

Tab. 38. Wyciąg z analizy wariancji indeksu zieloności liścia SPAD w latach prowadzenia eksperymentu

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
2017 rok		
Stres suszy (S)	184	0,000
Gatunek gleby (G)	448	0,000
Termin pomiaru (T)	638	0,000
S x G	2	0,040
S x T	279	0,000
G x T	25	0,000
S x G x T	2	0,004

5. Wyniki

Tab. 38 cd. Wyciąg z analizy wariancji indeksu zieloności liścia SPAD w latach prowadzenia eksperymentu

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
2018 rok		
Stres suszy (S)	245	0,000
Gatunek gleby (G)	534	0,000
Termin pomiaru (T)	880	0,000
S x G	1	0,107
S x T	378	0,000
G x T	36	0,000
S x G x T	1	0,534
2019 rok		
Stres suszy (S)	186	0,000
Gatunek gleby (G)	498	0,000
Termin pomiaru (T)	677	0,000
S x G	2	0,001
S x T	307	0,000
G x T	37	0,000
G x S x T	1	0,074

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Wartości indeksu zieloności liścia były zbliżone w latach 2017 i 2019 i jednocześnie niższe niż w roku 2018. Stwierdzono istotny wpływ gatunku gleby na zawartość chlorofilu w liściach jęczmienia. We wszystkich latach prowadzenia eksperymentu wartość indeksu SPAD zwiększała się wraz ze wzrostem zawartości części spławialnych w glebie, z wyjątkiem pług (less), gdzie stwierdzono najniższe wartości tego parametru (Tab. 39).

Tab. 39. Indeks zieloności liścia SPAD, zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby							Średnia w latach
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	pług (less)	gs	
2017	635 B e*	637 B e	642 B d	650 B c	655 B b	601 C f	672 B a	641,71 B
2018	644 A e	648 A e	653 A d	661 A c	668 A b	619 A f	686 A a	654,14 A
2019	636 B e	638 B e	644 B d	652 B c	659 B b	606 B f	676 B a	644,43 B

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby

5. Wyniki

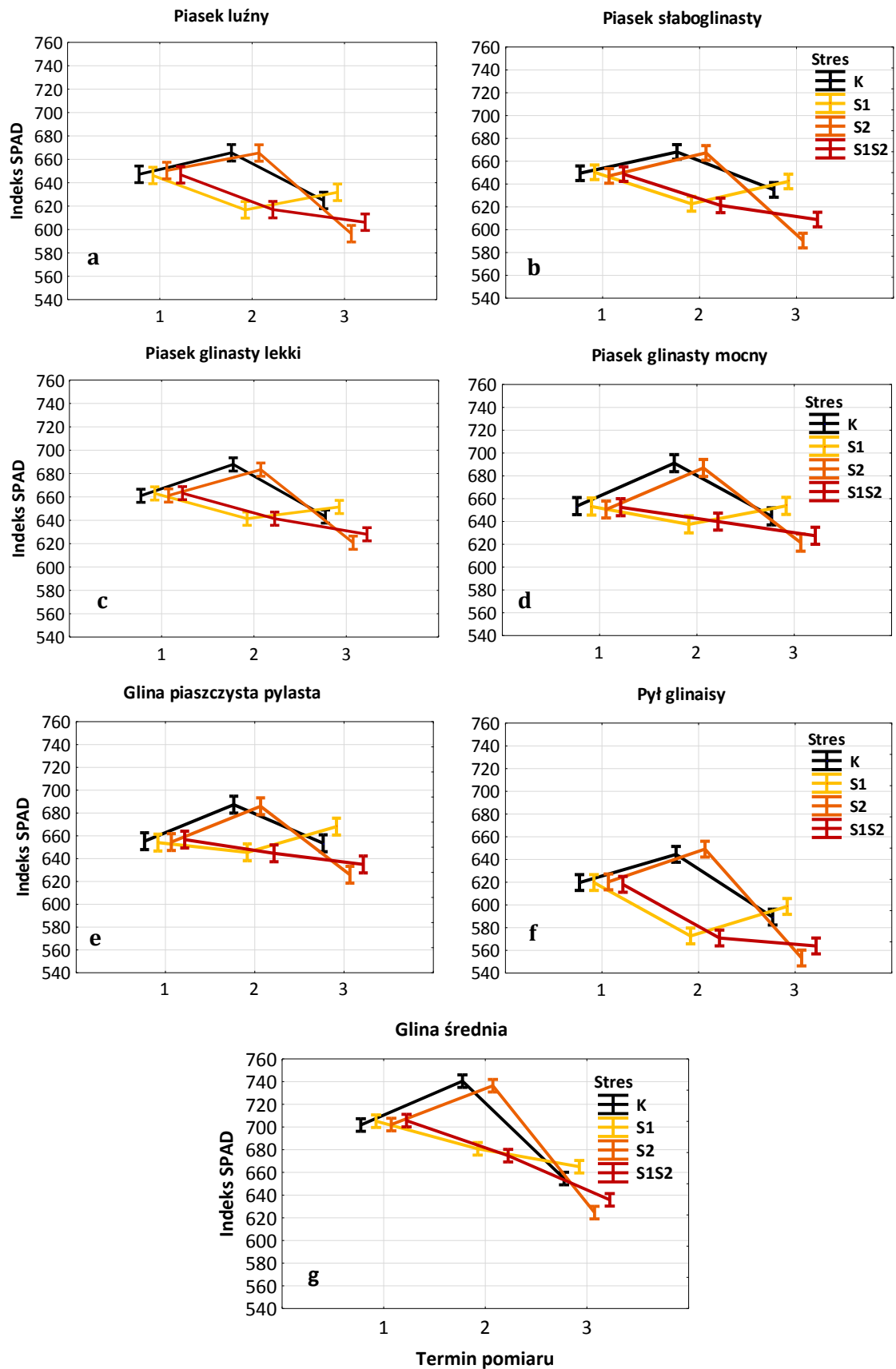
Rysunki 21 - 23 przedstawiają zmiany zawartości chlorofilu w okresie wegetacji jęczmienia zależnie od wprowadzonych stresów suszy. W obiektach kontrolnych wartość indeksu SPAD zwiększała się tylko do drugiego terminu pomiaru i zmniejszała się w ostatnim.

W pierwszym terminie pomiarów wartość indeksu SPAD we wszystkich obiektach pozostawała na zbliżonym poziomie (Rys. 21 - 23).

W czasie drugiego pomiaru zaobserwowano, że wprowadzenie stresu wczesnego (S1 oraz S1 + S2) powodowało znaczne zmniejszenie zawartości chlorofilu w porównaniu do obiektów optymalnie nawodnionych (K, S2) (Rys. 21 – 23).

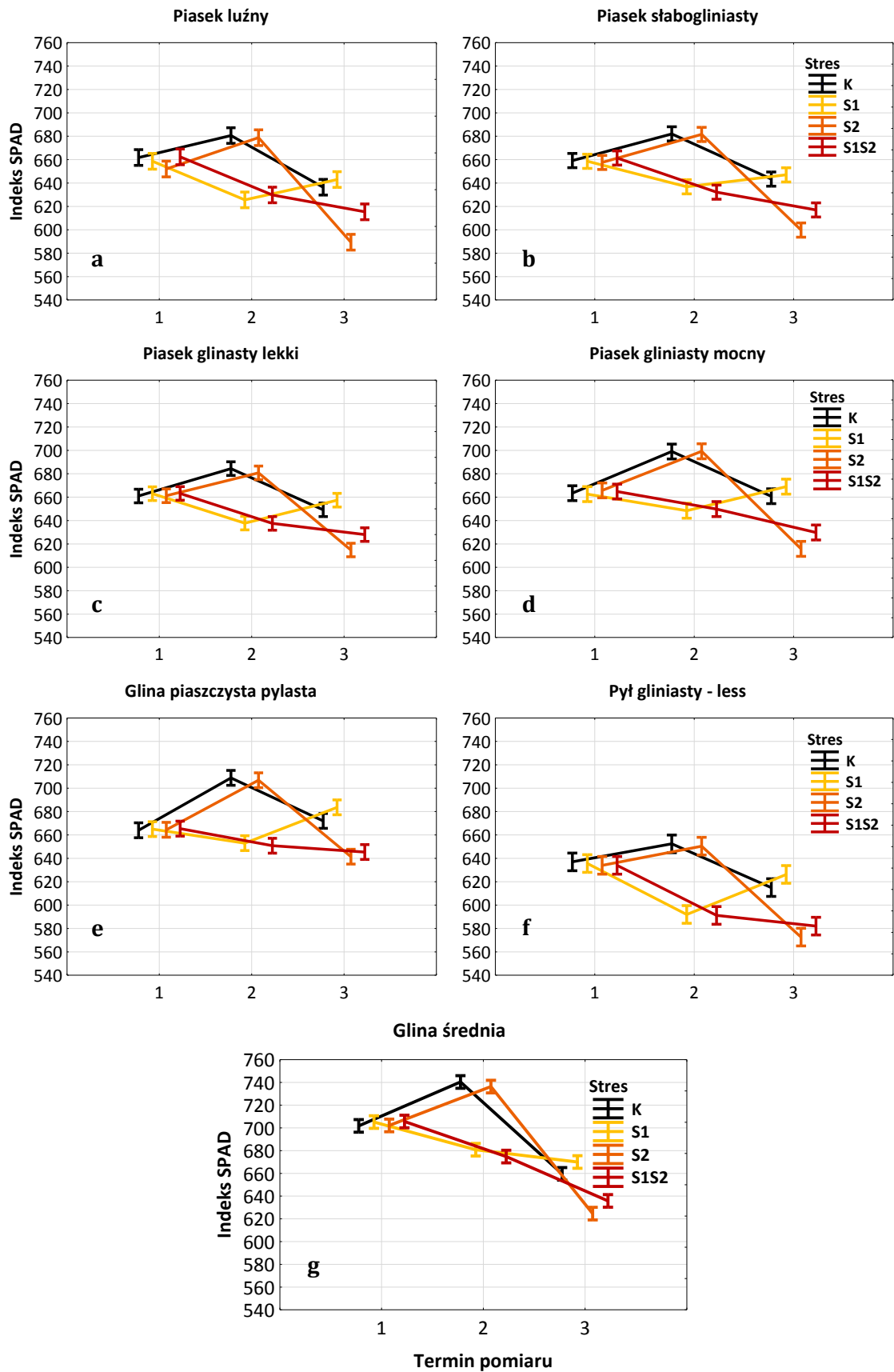
Z kolei trzeci pomiar wykazał, że po ustąpieniu stresu wczesnego zawartość chlorofilu w roślinach zwiększała się i osiągała wartości porównywalne z obiektem kontrolnym. Natomiast obiekty poddane zarówno stresowi późnemu, jak i obu stresom charakteryzowały się istotnie niższymi wartościami indeksu SPAD, w porównaniu do kontroli jak i do poprzedniego pomiaru (Rys. 21 – 23).

5. Wyniki



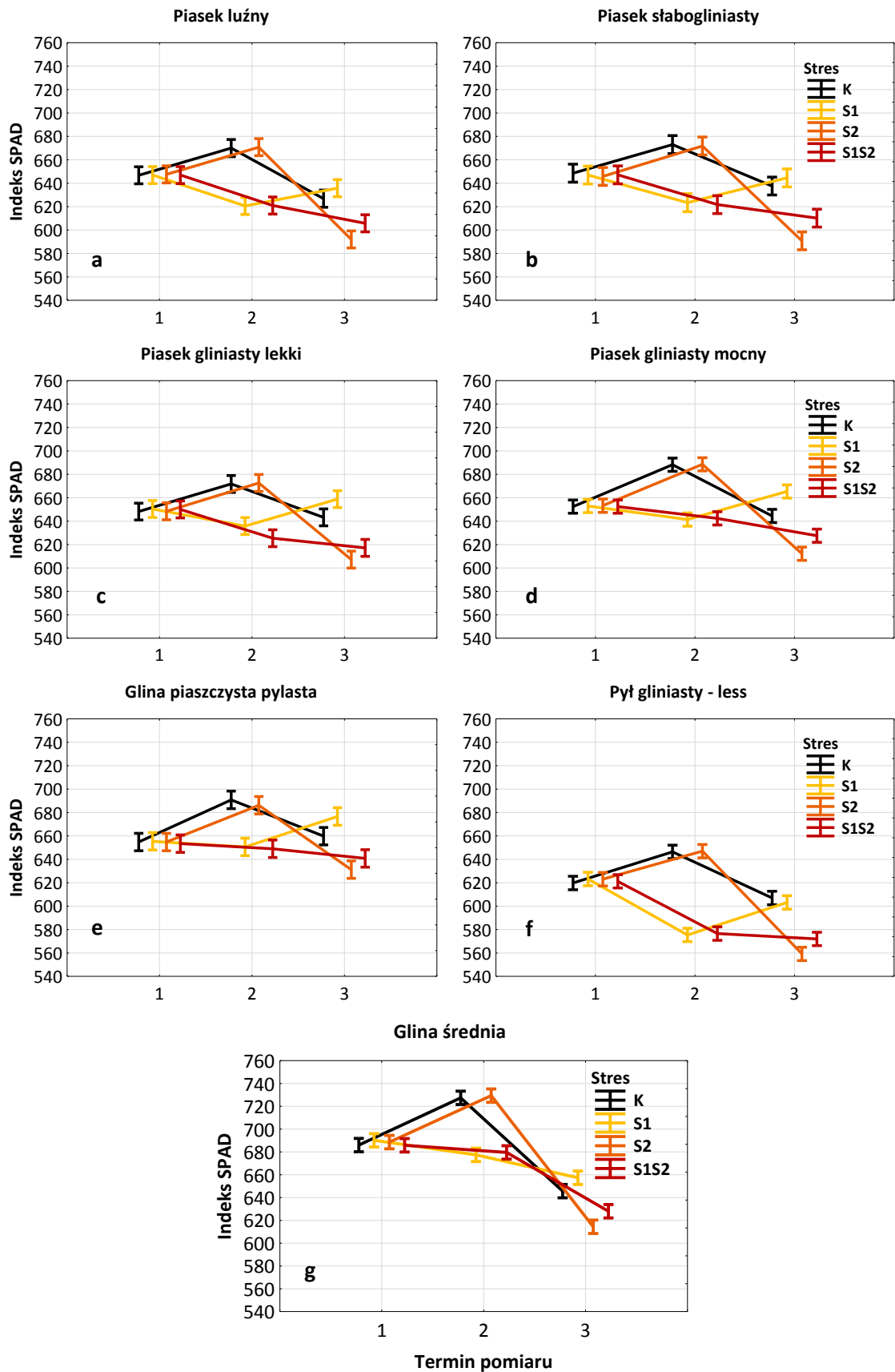
Rys. 21. Wpływ terminu pomiaru na indeks zieloności liścia SPAD jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2017 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie)

5. Wyniki



Rys. 22. Wpływ terminu pomiaru na indeks zieloności liścia SPAD jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2018 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie)

5. Wyniki



Rys. 23. Wpływ terminu pomiaru na indeks zieloności liścia SPAD jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2019 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie)

5. Wyniki

5.4. ZAWARTOŚĆ I POBRANIE AZOTU

5.4.1. ZAWARTOŚĆ AZOTU W SUCHEJ MASIE ZIARNA

Stwierdzono istotny wpływ wszystkich czynników doświadczalnych oraz interakcji rok x gatunek gleby na zawartość azotu w suchej masie ziarna jęczmienia (Tab. 40).

Tab. 40. Wyciąg z analizy wariancji zawartości azotu w suchej masie ziarna jęczmienia

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	486,6	0,000
Stres suszy (S)	26,8	0,000
Gatunek gleby (G)	99,9	0,000
R x S	0,9	0,524
R x G	4,1	0,000
S x G	0,7	0,783
R x S x G	0,6	0,969

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Zawartość azotu w suchej masie ziarna jęczmienia zależała od gatunku gleby. Najwyższymi zawartościami tego pierwiastka w roku 2017 i 2019 charakteryzowało się ziarno jęczmienia rosnącego na glinie średniej (gs) i piasku gliniastym lekkim (pgl), zaś w roku 2018 na glinie średniej (gs). Natomiast najniższe zawartościami azotu odnotowano w przypadku ziarna roślin rosnących na pyle gliniastym (płg) – lessie, piasku luźnym (pl) i piasku słabogliniastym (ps) w latach 2017 - 2018 oraz na pyle gliniastym (płg) – lessie i piasku luźnym (pl) w roku 2019 (Tab. 41).

Tab. 41. Zawartość azotu (%) w suchej masie ziarna jęczmienia, zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby							Średnia w latach
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	płg (less)	gs	
2017	2,12 B c*	2,14 C c	2,37 B ab	2,32 B b	2,30 C b	2,07 B c	2,49 B a	2,26 C
2018	2,59 A d	2,60 A cd	2,76 A bc	2,86 A b	2,87 A b	2,46 A d	3,03 A a	2,74 A
2019	2,16 B cd	2,25 B c	2,59 C a	2,38 B b	2,44 B b	2,14 B d	2,59 B a	2,36 B

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby

5. Wyniki

5.4.2. ZAWARTOŚĆ AZOTU W SUCHEJ MASIE SŁOMY

Zawartość azotu w suchej masie słomy była bardziej zróżnicowana niż zawartość w ziarnie. Stwierdzono istotny wpływ wszystkich czynników doświadczalnych oraz interakcji rok x gatunek gleby i stres suszy x gatunek gleby na zawartość azotu w suchej masie słomy jęczmienia (Tab. 42).

Tab. 42. Wyciąg z analizy wariancji zawartości azotu w suchej masie słomy jęczmienia

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	24,00	0,000
Stres suszy (S)	129,52	0,000
Gatunek gleby (G)	44,22	0,000
R x S	1,86	0,091
R x G	2,16	0,016
S x G	1,84	0,024
R x S x G	0,92	0,601

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

We wszystkich latach badań, zawartość azotu w słomie związana była z gatunkiem gleby i zwiększała się wraz ze wzrostem zawartości części spławialnych w glebie (z wyjątkiem płg – lessu). We wszystkich latach badań najwyższą zawartość tego pierwiastka stwierdzono w słomie jęczmienia rosnącego na glinie średniej (gs), a najniższą na pyle gliniastym (płg) – lessie w pierwszym roku, zaś na piasku luźnym (pl) w pozostałych latach (Tab. 43).

Tab. 43. Zawartość azotu (%) w suchej masie słomy jęczmienia, zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

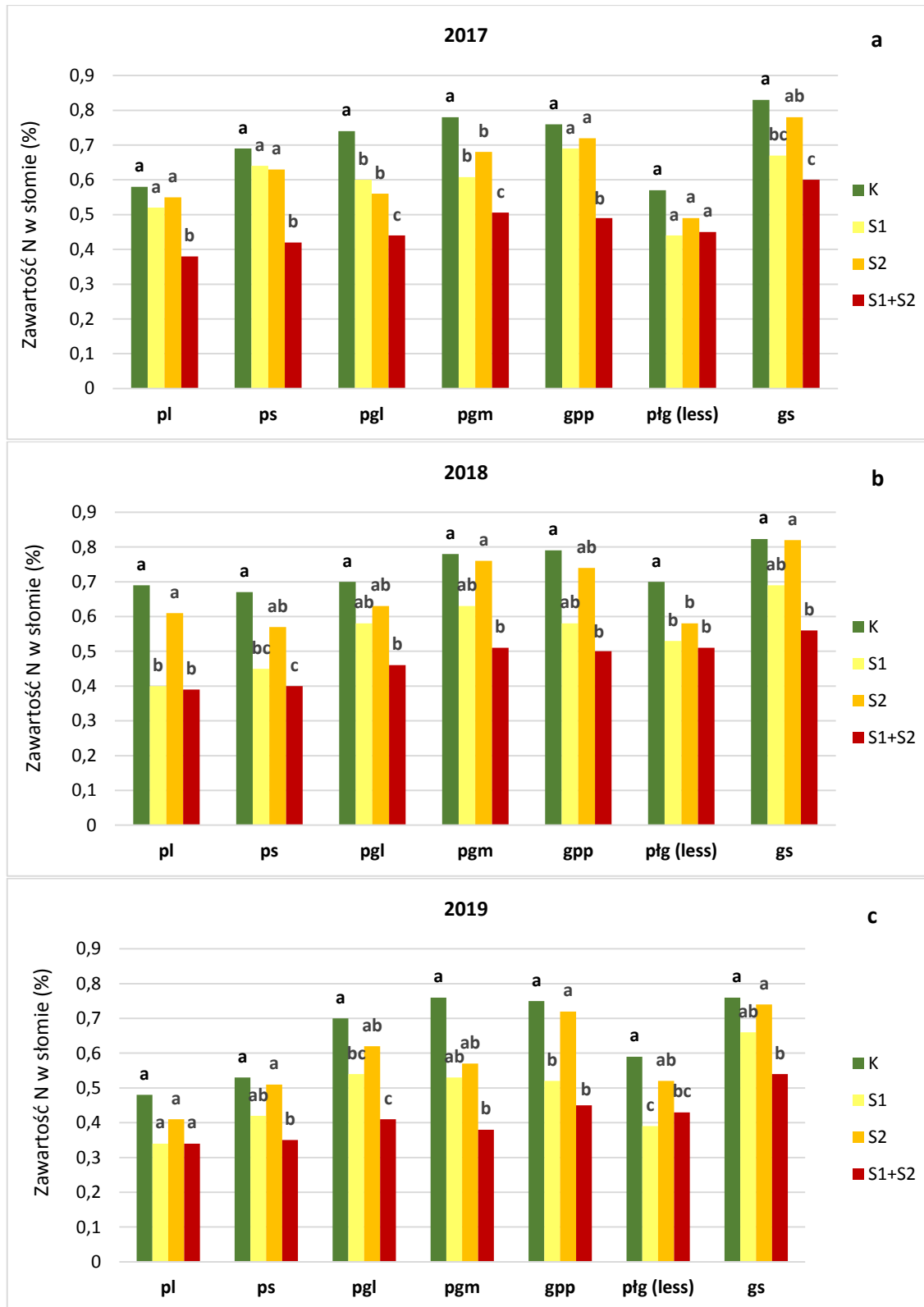
Rok	Gatunek gleby							Średnia w latach
	pl	ps	płg	pgm	gpp	płg (less)	gs	
2017	0,51 A b*	0,59 A ab	0,59 A ab	0,64 A a	0,65 A a	0,49 B b	0,72 A a	0,60 A
2018	0,51 A b	0,52 B b	0,59 A ab	0,67 A ab	0,66 A ab	0,58 A ab	0,73 A a	0,61 A
2019	0,41 B c	0,45 C bc	0,57 A abc	0,60 A ab	0,61 A ab	0,48 B bc	0,68 A a	0,54 B

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby

5. Wyniki

Wpływ stresu suszy na zawartość azotu w słomie jęczmienia w poszczególnych latach badań był zróżnicowany zależnie od gatunku gleby. Wprowadzenie stresu wczesnego powodowało zmniejszenie zawartości azotu w słomie roślin jęczmienia rosnących na pgl, pgm i gs w 2017 roku (Rys. 24a), na pl, ps i pfg - lessie w 2018 roku (Rys. 24b), oraz na pgl, gpp i pfg - lessie w 2019 roku (Rys. 24c). Stres późny S2 powodował zmniejszenie zawartość pierwiastka w słomie na piasku gliniastym lekkim (pgl) i piasku gliniastym mocnym (pgm) w roku 2017 (Rys. 24a) oraz pyłu gliniastym – lessie (pfg – less) w roku 2018 (Rys. 24b), zaś wprowadzenie obu stresów powodowało istotne zmiany we wszystkich obiektach poza pyłem gliniastym w 2017 roku i piaskiem gliniastym lekkim w 2019 roku (Rys. 24a - c).

5. Wyniki



Rys. 24. Wpływ stresów suszy na zawartość azotu w słomie jęczmienia w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie)

5. Wyniki

5.4.3. POBRANIE AZOTU PRZEZ ZIARNO JĘCZMIENIA

Analiza wariancji wykazała istotny wpływ czynników głównych doświadczenia oraz interakcji rok x gatunek gleby na pobranie azotu przez ziarno jęczmienia (Tab. 44).

Tab. 44. Wyciąg z analizy wariancji pobrania azotu przez ziarno jęczmienia

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	6,85	0,001
Stres suszy (S)	251,1	0,000
Gatunek gleby (G)	201,31	0,000
R x S	1,43	0,207
R x G	5,91	0,000
S x G	1,53	0,086
R x S x G	0,65	0,937

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Pobranie azotu przez ziarno jęczmienia w latach badań było modyfikowane przez gatunek gleby. W 2017 i 2018 roku najwięcej azotu pobrało ziarno jęczmienia rosnącego na pług – lessie, gpp, pgm i pgl, zaś w 2019 na pług, gpp, pgm, pgl i gs. Z kolei we wszystkich latach najmniej pierwiastka pobrało ziarno jęczmienia rosnącego pl i ps (Tab. 45).

Tab. 45. Pobranie azotu ($\text{g N} \cdot \text{wazon}^{-1}$) przez ziarno jęczmienia, zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

Rok	Gatunek gleby							Średnia w latach
	pl	ps	pgl	pgm	gpp	pług (less)	gs	
2017	1,09 A d*	1,13 A cd	1,61 A a	1,47 A ab	1,47 A ab	1,50 A ab	1,32 A bc	1,37 A
2018	1,03 A d	1,07 A cd	1,38 B ab	1,47 A ab	1,50 A ab	1,56 A a	1,29 A bc	1,33 A
2019	1,07 A b	1,12 A b	1,37 B a	1,42 A a	1,47 A a	1,52 A a	1,34 A a	1,33 A

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; małe litery dotyczą gatunków gleby; wielkie litery dotyczą lat

5. Wyniki

5.4.4. POBRANIE AZOTU PRZEZ CZĘŚĆ NADZIEMNĄ ROŚLIN

Stwierdzono istotność wpływu czynników doświadczenia oraz ich interakcji rok x gatunek gleby i stres suszy x gatunek gleby na pobranie azotu przez części nadziemne roślin jęczmienia (Tab. 46).

Tab. 46. Wyciąg z analizy wariancji pobrania azotu przez części nadziemne roślin jęczmienia

Czynnik	F-Ratio	Poziom istotności p
Rok (R)	30,39	0,000
Stres suszy (S)	414,27	0,000
Gatunek gleby (G)	173,64	0,000
R x S	1,80	0,102
R x G	3,64	0,000
S x G	2,51	0,001
R x S x G	0,86	0,702

Pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

Pobranie azotu przez części nadziemne roślin jęczmienia było stosunkowo mało zróżnicowane, ale statystycznie istotne pomiędzy latami badań i w niewielkim stopniu zależne od gatunku gleby. Zaobserwowano, że we wszystkich latach badań istotnie więcej azotu pobierały rośliny jęczmienia rosnące na glebach lekkich (p_{gl}, p_{gm}), średnich (g_{pp}, p_{lg} - less) i ciężkich (g_s), niż na glebach bardzo lekkich (p_l, p_s), co przedstawiono w tabeli nr 47.

Tab. 47. Pobranie azotu ($\text{g N} \cdot \text{wazon}^{-1}$) przez części nadziemne roślin jęczmienia, zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu

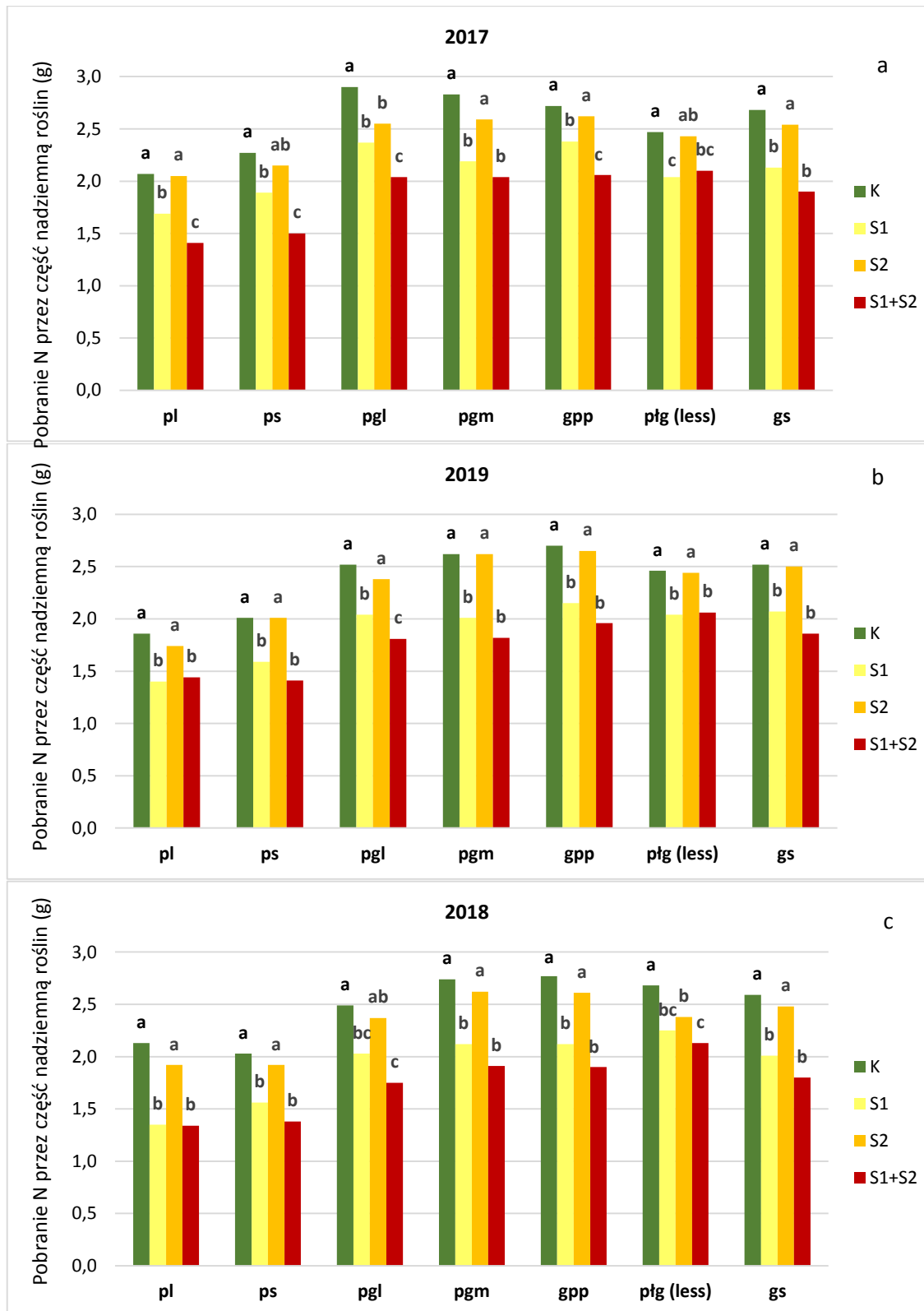
Rok	Gatunek gleby							Średnia w latach
	p _l	p _s	p _{gl}	p _{gm}	g _{pp}	p _{lg} (less)	g _s	
2017	1,80 A b*	1,95 A b	2,46 A a	2,40 A a	2,44 A a	2,26 A a	2,31 A a	2,23 A
2018	1,68 AB b	1,72 B b	2,16 B a	2,34 A a	2,34 A a	2,36 A a	2,22 A a	2,12 AB
2019	1,61 B b	1,75 B b	2,18 B a	2,26 A a	2,36 A a	2,25 A a	2,23 A a	2,09 B

*- średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie; wielkie litery dotyczą lat; małe litery dotyczą gatunków gleby

Wprowadzenie stresów suszy wpływało na ograniczenie pobrania azotu przez nadziemną część roślin, jednak istotne zmiany powodował tylko stres wczesny oraz wprowadzenie obu stresów (Rys. 25 a - c). Po wprowadzeniu stresu późnego pobranie

5. Wyniki

pierwiastka uległo zmniejszeniu tylko na piasku gliniastym lekkim (płg) w roku 2017 (Rys. 25 a) oraz pyłe gliniastym – lessie (płg – less) w roku 2019 (Rys. 25c).



Rys. 25. Wpływ stresu suszy na pobranie azotu (N) przez część nadziemną roślin jęczmienia w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie)

5. Wyniki

5.4.5. ZALEŻNOŚCI KORELACYJNE MIĘDZY ZAWARTOŚCIĄ AZOTU W ZIARNIE JĘCZMIENIA I INDEKSEM ZIELONOŚCI LIŚCIA (SPAD)

Analiza statystyczna wykazała istotną dodatnią korelację pomiędzy zawartością azotu w ziarnie jęczmienia a indeksem zieloności liścia (SPAD) (Tab. 48).

Tab. 48. Współczynnik korelacji prostej pomiędzy zawartością azotu w ziarnie jęczmienia i indeksem zieloności liścia (SPAD) średnio ze wszystkich lat prowadzenia badań

	Indeks zieloności liścia (SPAD)
Zawartość azotu w ziarnie jęczmienia	0,563*

* pogrubiono wyniki istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0.05$

6. DYSKUSJA

6.1. WPŁYW STRESU SUSZY ORAZ GATUNKU GLEBY NA PLON I ELEMENTY PLONU JĘCZMIENIA JAREGO

Zależności pomiędzy wielkością plonów, a ilością dostępnej wody w okresie wegetacji wykazali w swych badaniach min. Abdelaal i in. (2020). W przeprowadzonym przez badaczy doświadczeniu, łodygi jęczmienia rosnącego w warunkach stresu suszy były o około 12% krótsze w porównaniu do kontroli. Z kolei w doświadczeniu przeprowadzonym przez Wyszyńskiego i in. (2002), w roku uznanym za suchy, w porównaniu do roku z dostateczną ilością opadów rośliny jęczmienia wytworzyły o 25% mniej kłosów i o 14% mniej ziaren. Mniejsza liczba wytworzonych kłosów i ziaren wpływała negatywnie na plon całkowity ziarna, który w roku suchym był niższy o 23%. Również synteza danych z 40 lat badań COBORU przeprowadzona przez Chmurę i in. (2009) wykazała, że niedostateczne zaopatrzenie jęczmienia jarego w okresie wegetacji w wodę powoduje straty w plonie wynoszące od 6% do 27%. Z kolei w wieloletnich badaniach Panasiewicz i Koziary (2004); Wojtasika (2004) oraz Żarskiego i in. (2015), straty plonu ziarna jęczmienia na skutek stresu suszy wynosiły od 8% do 17%, natomiast w badaniach Samarah (2005) oraz Samarah i in. (2009) od 49% do 87% .

Widocznym efektem ograniczenia dostępności wody jest ograniczenie wzrostu roślin, spowodowane głównie zahamowaniem wydłużania liści i łodyg (Osuna i in. 2007). Zahamowanie wzrostu roślin wynika głównie z ograniczenia prawidłowego przebiegu procesów podziału i wzrostu komórek (Abdelaal i in. 2017; Forouzesht i in. 2013; Khan i in. 2013). Zaburzenia te oddziałują nie tylko na plon końcowy roślin, ale również na zmiany elementów plonu, których wielkość zależy od fazy rozwojowej, w której wystąpił stres (Ahmad i in. 2009; Al-Ajlouni i in. 2016; Brisson i in. 2002; Chmura i in. 2009; Liszewski 2008; Pecio 2002; Rajala i in. 2011). Doniesienia literaturowe odnośnie wpływu stresu suszy na kształtowanie plonu jęczmienia wykazują, że skutki jakie wywołuje deficyt wody w uprawie tego gatunku, zależne są od etapu rozwoju roślin (Ahmad i in. 2009; Al-Ajlouni i in. 2016; Brisson i in. 2002; Chmura i in. 2009; Liszewski 2008; Pecio 2002; Rajala i in. 2011). Rośliny jęczmienia są szczególnie wrażliwe na niedobór wody w fazach rozwojowych od strzelania w źdźbło do kłoszenia, a także w trakcie

6. Dyskusja

wykształcania i nalewania ziaren. Są to zatem okresy krytyczne w rozwoju tych roślin (Chmura i in. 2009, Grzebisz, 2012). Dlatego też w badaniach własnych stresy suszy wprowadzono w fazie strzelania w źdźbło, w końcu fazy kwitnienia oraz w części obiektów stosowano stres w obu tych fazach.

Wyniki badań własnych potwierdziły reakcję roślin na stres suszy zależnie od terminu wprowadzenia stresu. Niezależnie od gatunku gleby, stres wczesny S1, wprowadzony w fazie 1. kolanka powodował istotne skrócenie pędów głównych, wynoszące 3,3 cm oraz zmniejszenie liczby kłosów z wazonu o 7 szt., w porównaniu do obiektów kontrolnych, co w efekcie powodowało redukcję plonu ziarna o 19% i plonu słomy o 4%. Przedstawione wyniki są zgodne z danymi literaturowymi. W badaniach Ajalli i Salehi (2012), rośliny jęczmienia na skutek stresu suszy były niższe o ok. 10 cm. W doświadczeniu wazonowym Al-Ajlouni i in. (2016), liczba kłosów na skutek stresu suszy w fazie strzelania w źdźbło uległa zmniejszeniu o 2 szt., natomiast masa ziaren była prawie 3-krotnie mniejsza. W serii doświadczeń Pecio i Wacha (2015), zrealizowanych w IUNG-PIB w latach 2011-2013, stres suszy w fazie strzelania w źdźbło wpłynął na zmniejszenie plonu ziarna średnio o 12%. Z kolei Svobodová i Míša (2004) zaobserwowali, że po wprowadzeniu ostrego stresu suszy (35%-40% pojemności wodnej), w okresie od strzelania w źdźbło do końca kwitnienia, brak wody powodował zamieranie pędów, a formowanie kłosów następowało tylko na pędach głównych, natomiast przywrócenie optymalnej wilgotności po okresie stresu suszy skutkowało powstawaniem dodatkowych pędów, które z powodu późnego stadium rozwoju, nie zostały w pełni uformowane i nie wpłynęły na plon ziarna. W efekcie końcowym, liczba kłosów w wyniku stresu zmniejszyła się o 64%, plon ziarna o 70%, a plon słomy o 25%. W doświadczeniu własnym, przywrócenie optymalnych warunków wilgotnościowych, po zakończeniu stresu wczesnego wpłynęło na wydłużenie pędów głównych (o 3 cm) i zwiększenie liczby pędów z wazonu (5 szt.). Działo się tak ponieważ, po przywróceniu optymalnego nawodnienia, rośliny wciąż były zdolne do kontynuowania wzrostu i wytworzyły dodatkowe pędy boczne. W większości były to pędy nieproduktywne, które wpłynęły na zwiększenie plonu słomy (o 3,5%).

W badaniach własnych stres późny S2 powodował istotne zmniejszenie plonu ziarna (o 9%) oraz plon słomy (o 5%). Ujemny wpływ stresu wczesnego był zatem większy niż stresu późnego. Z kolei wprowadzenie obu stresów powodowało największe straty:

6. Dyskusja

skrócenie pędów głównych średnio o 5,7 cm, zmniejszenie liczby kłosów z wazonu o 13 szt. oraz obniżenie plonu ziarna i słomy odpowiednio o 24% i 7%. Straty w plonie ziarna na skutek stresu suszy stwierdzili również Żarski i in. (2013). Badacze wykazali, że deficyt wody obejmujący fazy od początku strzelania w źdźbło do pełni dojrzałości mleczej, który w doświadczeniu własnym można porównać z obiektami poddanymi obu stresom, powodował zmniejszenie plonu ziarna wynoszące od 23% do 25%. Również Borówczak i Rębarz (2010), w podobnym doświadczeniu, w którym stres suszy wprowadzono w okresach największej wrażliwości roślin jęczmienia na niedobór wody, otrzymali plon ziarna o 30% niższy niż warunkach optymalnej wilgotności.

W doświadczeniu własnym, różny wpływ na plon ziarna i całkowity plon części nadziemnej stresu wczesnego S1, stresu późnego S2 oraz obu stresów S1 + S2, uwidaczniał się również w zmniejszeniu wskaźnika indeksu zbioru odpowiednio o 12%, 4% i 13%, w porównaniu do obiektów kontrolnych. Niewielkie zmiany wartości wskaźnika HI w obiektach poddanych stresowi późnemu, były wynikiem proporcjonalnej redukcji, zarówno plonu ziarna, jak i całkowitego plonu części nadziemnej. Z kolei liczba ziaren z wazonu była istotnie mniejsza tylko po wprowadzeniu stresu wczesnego (20%) i obu stresów (23%), zaś masa tysiąca ziaren po wprowadzeniu stresu późnego (4%). W badaniach wykazano również, że po przywróceniu optymalnych warunków wilgotnościowych, po zakończeniu stresu S1, następowało zwiększenie masy tysiąca ziaren (MTZ), co było efektem zwiększenia masy pojedynczego ziarna i wytworzenia mniejszej liczby ziaren z wazonu przez roślinę. Nie zaobserwowano natomiast istotnych zmian w liczbie ziaren oraz wartości indeksu HI. Podobny efekt w swych badaniach uzyskali wcześniej Svobodová i Míša (2004). Przedstawione przez Autorów wyniki badań wykazały, że ostry stres suszy wprowadzony w fazie strzelania w źdźbło powodował zmniejszenie indeksu zbioru (HI) o 35%, co było wynikiem znacznie większej redukcji plonu ziarna (liczba ziaren była mniejsza o 66%), niż całej części nadziemnej. Z kolei zwiększenie masy tysiąca ziaren o 7% w obiektach poddanych stresowi wczesnemu tłumaczono kompensacją mniejszej liczby ziaren przez większą masę pojedynczego ziarna. W badaniach Pecio i Wacha (2015), reakcja roślin jęczmienia na stres suszy w fazie strzelania w źdźbło zależała od genotypu jęczmienia. W przypadku genotypów wrażliwych, w obiektach poddanych stresowi suszy obserwowano zmniejszenie wartości indeksu HI o 13%, co z kolei było powodowane mniejszą produktywnością

6. Dyskusja

pojedynczego kłosa, wynikającą z mniejszej o 5% masy tysiąca ziaren, mimo mniejszej o 20% liczby ziaren w kłosie niż w obiektach z optymalnym nawodnieniem. W badaniach Al-Ajlouni (2016), niedobór wody w fazie strzelania w źdźbło powodował zmniejszenie wartości wskaźnika HI o 48%, liczby ziaren o 57% a MTZ o 20%. Żarski i in. (2013) wykazali, że deficyt wody obejmujący fazy od początku strzelania w źdźbło do pełni dojrzałości młeczej powodował redukcję MTZ wynoszącą od 4% do 6%. Natomiast w badaniach Ajalli i Salehi (2012), stres suszy utrzymujący się przez cały okres wegetacyjny wpływał na zmniejszenie MTZ o 15% w stosunku do obiektów bez stresu suszy. Z kolei inny efekt uzyskali Wyszyński i in. (2002). W badaniach tych autorów MTZ w roku suchym była wyższa o 18% w porównaniu do roku z wystarczającą ilością opadów.

Większy spadek plonu, zarówno ziarna jak i słomy, pod wpływem wczesnego stresu suszy, w porównaniu do wpływu stresu późnego w badaniach własnych można tłumaczyć faktem, że strzelanie w źdźbło jest okresem, w którym rośliny jęczmienia intensywnie zwiększają biomasę. Niedobór wody w tym okresie negatywnie wpływa na plon ziarna i słomy, ponieważ powoduje zmniejszenie powierzchni asymilacyjnej liści, hamuje przyrost organów wegetatywnych oraz powoduje redukcję liczby źdźbeł kłosonośnych (Budzyński i Szempliński 1999; Chmura i in. 2009). Poza tym, faza strzelania w źdźbło jest głównym etapem rozwoju generatywnego, podczas którego kształtowane są zawiązki elementów struktury plonu ziarna (Křen i in., 2014; Svobodová i Míša, 2004). Z kolei stres wprowadzany w fazie rozwoju ziarniaków ma już znacznie mniejszy wpływ na plon części wegetatywnej, gdyż akumulacja biomasy w tej fazie rozwojowej jest praktycznie zakończona. Wówczas woda wykorzystywana jest w celu dobrego wypełnienia ziarna (Budzyński i Szempliński 1999; Chmura i in. 2009). Niedobór wody w trakcie nalewania ziarniaków wpływa na ograniczenie syntezy węglowodanów i akumulacji suchej masy w ziarniaku (Żarski i in. 2013). Powoduje też skrócenie długości okresu wypełniania ziarna, co skutkuje wcześniejszym zamieraniem roślin (Sedlár i in. 2014; Yang i Zhang 2006) i słabym wykształceniem ziarniaków (Budzyński i Szempliński 1999; Chmura i in. 2009; Kilic i Yagbasanlar 2010). Zatem, jak podają Cossani i in. (2009), stres suszy w okresie od strzelania w źdźbło do kwitnienia ma większy ujemny wpływ na plon jęczmienia niż w okresie po kwitnieniu. Wykazany w badaniach własnych największy negatywny wpływ, na plon i jego elementy, obu stresów, wynika z tego, że

6. Dyskusja

rośliny miały ograniczony dostęp do wody w okresach krytycznych dla rozwoju jęczmienia. Z kolei po ustąpieniu stresu suszy, w sprzyjających warunkach wilgotnościowych, rośliny wykazywały zdolność do tworzenia nowych pędów i kontynuowania wzrostu i rozwoju, co jest uważane za reakcję adaptacyjną do niekorzystnych warunków, która przyczynia się do zwiększenia plonu części nadziemnej (Křena i in. 2014). Poza tym, jeżeli rośliny rozwijają się w niekorzystnych warunkach przez dłuższy czas, utrzymanie wyższego potencjału plonowania we wcześniejszych fazach wzrostu może spowodować jego większą redukcję w późniejszych fazach rozwojowych (García del Moral i in. 2003; Samarah 2005; Svobodová i Míša, 2004).

Zarówno badania własne jak i badania innych naukowców (Akram 2011; Datta i in. 2011; Noworolnik 2008 a, b; Promkhambut i in. 2010; Seghatoleslami i in. 2008; Witek 1992) wykazały, że gatunek gleby, a w szczególności zdolność gleby do magazynowania wody ma kluczowe znaczenie w zmniejszeniu niekorzystnych zmian w wielkości i strukturze plonu zbóż. Badania przeprowadzone przez Noworolnika (2008 b) wskazują, iż najlepsze plony jęczmienia uzyskuje się na glebach średnich (płz i gl) oraz na glebach lekkich (pgm) położonych na glinach lekkich. Średnie plony można uzyskać na glebach lekkich (pgm i pgl) zalegających na glinach lekkich, zaś niższe na glebach lekkich i bardzo lekkich (pgl i ps) zalegających na glinach lekkich. Również wieloletnie doświadczenia przeprowadzone przez Noworolnika (2015) oraz Noworolnika i Terelaka (2005) potwierdziły, że więźlejsze podłoże sprzyja uzyskaniu wyższego plonu ziarna jęczmienia. Badacze zwracali uwagę także na to, iż zadawalające plony można uzyskać również na glebach lżejszych, jednak gleby te muszą pozostawać w wysokiej kulturze.

W realizowanym doświadczeniu najwyższe plony uzyskano na glebie pyłowej (pył gliniasty - less), średnie plony uzyskano na piasku gliniastym lekkim, piasku gliniastym mocnym i glinie piaszczystej pylastej, natomiast najniższe na piasku luźnym, piasku słabogliniastym i glinie średniej. Wówczas plon ziarna, słomy i całej części nadziemnej na pyle gliniastym był odpowiednio o 16%, 6% i 9% wyższy do plonów na piasku gliniastym lekkim, piasku gliniastym mocnym i glinie piaszczystej pylastej oraz o 30%, 11% i 17% wyższy od polonów uzyskanych na glebach o uziarnieniu piasku luźnego, piasku słabogliniastego i gliny średniej. Gatunek gleby wpływał także na długość pędów głównych oraz liczę kłosów z wazonu. Pędy główne roślin uprawianych na pyle gliniastym były dłuższe o 3 cm od pędów uzyskanych na piasku gliniastym lekkim, piasku gliniastym

6. Dyskusja

mocnym i glinie piaszczystej pylastej oraz o 8 cm dłuższe od pędów uzyskanych na piasku luźnym, piasku słabogliniastym i glinie średniej, zaś liczba kłosów z wazonu była większa odpowiednio 10 szt. i 16 szt. Inne wyniki uzyskali Michalska i in. (2008). W przeprowadzonym przez Autorów doświadczeniu wazonowym sucha masa części nadziemnej roślin uprawianych na glebie o uziarnieniu piasku gliniastego lekkiego pylastego była o 33% niższa niż sucha masa części nadziemnej roślin rosnących na glinie ciężkiej. Z kolei Noworolnik (2008 a), w przeprowadzonym doświadczeniu polowym najlepsze plony ziarna jęczmienia uzyskał na piasku gliniastym mocnym zalegającym na glinie lekkiej. Plon ziarna na tej glebie był o około 4% wyższy niż plon ziarna uzyskany na pyle zwykłym, piasku gliniastym lekkim zalegającym na glinie lekkiej oraz glinie średniej zalegającej na glinie lekkiej, około 11% wyższy niż plon ziarna uzyskany na piasku gliniastym mocnym i o 27% wyższy niż plon ziarna uzyskany na piasku gliniastym lekkim.

W badaniach własnych zmiany w plonie ziarna i plonie całej części nadziemnej w wyniku zastosowania różnych gatunków gleb spowodowały, że indeks zbioru HI na glebach o uziarnieniu pl, ps, gs oraz o uziarnieniu pgl, pgm i gpp był odpowiednio o 16% i 8% niższy od wskaźnika HI na pyle gliniastym - lessie. Największa liczba ziaren uzyskana na pyle gliniastym była większa o 16% niż na glebach o średnim i o 29% większa niż na glebach słabszym potencjale plonowania. Z kolei największą masą tysiąca ziaren charakteryzowały się rośliny rosnące na glinie średniej. MTZ tych roślin była większa od 2% (gpp) do 6% (pl). Noworolnik (2008a; 2008b) w swoim doświadczeniu nie zaobserwował zmian w masie tysiąca ziaren pod wpływem zróżnicowanych warunków glebowych. Zaobserwowano jedynie tendencję do zwiększania badanego parametru na utworach bardziej zwięzłych.

6.2. ODDZIAŁYWANIE KRÓTKOTRWAŁYCH STRESÓW SUSZY ORAZ RÓŻNYCH GATUNKÓW GLEB NA WARTOŚCI WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW FIZJOLOGICZNYCH

Plon jęczmienia, jak i innych zbóż, zależy głównie od ilości wyprodukowanej biomasy w trakcie rozwoju wegetatywnego oraz od ilości asymilatów przemieszczonych do ziarna (Pecio 2002) i jest w dużej mierze modyfikowany przez układ warunków wilgotnościowych w sezonie wegetacyjnym (Abdelaal i in. 2020; Ajalli i Salehi 2012; Chmura i in. 2009; Francia i in., 2013; Hossain i in., 2012). Procesy fizjologiczne, takie jak

6. Dyskusja

fotosynteza i transpiracja, mają bezpośrednie przełożenie na przyrost biomasy, a tym samym wzrost produktywności roślin uprawnych (Arve i in. 2011). Stres suszy powoduje zakłócenia w gospodarce wodnej roślin (Akinci i Lösel 2012; McDowell i in. 2011). Jedną z pierwszych reakcji rośliny na deficyt wody jest zamykanie aparatów szparkowych (Breda i in. 2006; Cammarano 2019 a; Flexas i in. 2004; Hepworth i in. 2015; Lin i in. 2020; Qian i in. 2019; Wang i in. 2020), co z jednej strony pozwala roślinie w znaczny sposób ograniczyć straty wody w procesie transpiracji, z drugiej zaś, poprzez zmniejszenie pobierania dwutlenku węgla z otoczenia, ogranicza aktywność fotosyntetyczną i ostatecznie plon końcowy (Bota i in. 2004; Havrlentová i in. 2021; Kappor i in. 2020; Nayyar i Gupta 2006; Yang i in. 2006). Potwierdzają to również wyniki badań własnych.

Zastosowany w badaniach własnych niedobór wody wykazywał istotny wpływ na oznaczane parametry fizjologiczne. Średnio z lat i gatunków gleby, stres wczesny wpływał na redukcję intensywności fotosyntezy o 32%, przewodnictwa szparkowego o 46%, zaś intensywności transpiracji o 43%, natomiast stres późny powodował zmniejszenie wartości wyżej wymienionych parametrów odpowiednio o 45%, 56% i 53%, w stosunku do obiektów kontrolnych. Negatywny wpływ stresu późnego był zatem większy niż wczesnego. Z kolei w obiektach poddanych działaniu obu stresów, wprowadzenie stresu późnego powodowało redukcję wartości parametrów tylko o 16% (intensywność fotosyntezy), 13% (przewodnictwo szparkowe), 27% (intensywność transpiracji), w porównaniu do kontroli, w trzecim terminie pomiarów. Zaobserwowano również, że wartości wskaźników fizjologicznych w tych obiektach były odpowiednio o 33%, 50% i 39% wyższe od wartości wskaźników w obiektach poddanych stresowi późnemu, co pozwala na stwierdzenie, że stres wczesny spowodował dostosowanie się roślin jęczmienia do warunków niedoboru wody. Przywrócenie optymalnego nawodnienia po zakończeniu stresu wczesnego wpłynęło pozytywnie na wskaźniki, powodując wzrost ich wartości o 26% (intensywność fotosyntezy), 30% (przewodnictwo szparkowe) i 38% (intensywność transpiracji), w porównaniu do kontroli.

Negatywny wpływ deficytu wody na przebieg procesów wymiany gazowej roślin wykazano w wielu doniesieniach naukowych (Ajalli i Salehi 2012; Albrizio i in. 2010; Cossani i in. 2009; Ferrante i in. 2008; Haddadin 2015; Hossain i in. 2012; Huntingford i in. 2005; Jamieson i in. 1995; Pecio i Wach 2015; Sallam i in. 2019; Zare i in. 2011).

6. Dyskusja

W doświadczeniu wazonowym Kocoń (2006) stwierdzono zmniejszenie parametrów wymiany gazowej w warunkach stresu suszy (40% PPW) u pszenicy. Według autorki intensywność fotosyntezy, przewodnictwa szparkowego oraz transpiracji w fazie kłoszenia była mniejsza odpowiednio o 37%, 60% i 43%, zaś w fazie dojrzałości mleczej o 20%, 3% i 10% (Kocoń 2006). Również Wyszyński i in. (2002), w swych badaniach wskazali na znaczne (o 30%) zmniejszenie intensywności fotosyntezy u roślin jęczmienia w warunkach niedoboru wody. Z kolei Méndez i in. (2011), wykazali, że przewodnictwo szparkowe roślin jęczmienia na skutek ograniczenia dostępności wody w fazie nalewania ziarna zmniejszyło się średnio o 78%, w stosunku do przewodnictwa roślin w optymalnych warunkach.

W dostępnej literaturze brakuje informacji dotyczących oddziaływania gatunków gleby na intensywność procesów fizjologicznych zbóż, natomiast analiza wyników badań własnych wykazała istotny wpływ uziarnienia gleby na intensywność procesów wymiany gazowej. Niezależnie od terminu pomiaru, najwyższą wartością parametrów wymiany gazowej charakteryzowały się rośliny rosnące na pyle gliniastym - lessie. Średnio z lat badań, intensywność fotosyntezy, przewodnictwo szparkowe i transpiracja na tej glebie była wyższa od najniższych wartości tych parametrów odnotowanych na piasku luźnym odpowiednio o 13%, 29% i 14% (I pomiar), 19%, 35% i 16% (II pomiar) oraz 28%, 28% i 47% (III pomiar). Taką sytuację można tłumaczyć znacznie większą zdolnością do zatrzymywania wody przez gleby pyłowe niż piaski (Thompson i Troeh 1978), w wyniku czego zakłócenia przebiegu procesów fotosyntezy były mniejsze.

Barwniki chlorofilowe są wskaźnikiem żywotności roślin (Kozłowski 2001). Negatywny wpływ suszy na zawartość chlorofilu w liściach jęczmienia wykazują badania innych autorów (Abdelaal i in. 2018; 2020; Hafez i in. 2020). Jak podaje Rumasz-Rudnicka (2010), zawartość chlorofilu w liściach zależy głównie od warunków siedliskowych i pogodowych. W warunkach stresu suszy zawartość chlorofilu ulega na ogół zmniejszeniu (Karimpour 2019; Sayed 2003), co jest spowodowane ograniczeniem pobierania i transportu azotu (głównego składnika mineralnego niezbędnego do syntezy chlorofilu) w warunkach niedoboru wody (Kopcewicz i Lewak 2005, Li i in. 2006, Nayyar i Gupta 2006). Odmienne zależności stwierdziły Staniak i Baca (2018). W badaniach tych stres suszy wpływał na istotne zwiększenie zawartości chlorofilu w liściach koniczyny łąkowej. Taką sytuację Autorki tłumaczą reakcją obronną roślin na warunki stresowe.

6. Dyskusja

W warunkach ograniczonej dostępności wody następuje zmniejszenie i zagęszczenie komórek w liściach, co prowadzi do wzrostu stężenia związków mało- i wielkocząsteczkowych znajdujących się w komórce, na przykład chlorofilu (Jones i in. 1980).

W badaniach własnych zawartość chlorofilu ulegała istotnej redukcji w wyniku wprowadzania stresów suszy. Średnie zmniejszenie wartości indeksu zieloności liścia na skutek stresu wczesnego, w fazie strzelania w źdźbło wynosiło około 8%, a stresu późnego, w fazie kwitnienia około 6%. Z kolei po ustąpieniu stresu wczesnego zawartość chlorofilu w roślinach zwiększała się i osiągała wartości porównywalne z obiektem kontrolnym. W trzecim terminie pomiarów, obiekty poddane zarówno stresowi późnemu, jak i obu stresom, charakteryzowały się niższymi wartościami indeksu SPAD, odpowiednio o 6% i 4%. Po wykonaniu trzeciego pomiaru rośliny w obiektach poddanych obu stresom charakteryzowały się około 2% większą zawartością chlorofilu niż rośliny w obiektach poddanych stresowi późnemu, a rośliny w obiektach poddanych tylko stresowi wczesnemu około 2% większą zawartością chlorofilu niż rośliny w obiektach kontrolnych.

W przeprowadzonym doświadczeniu wykazano dodatnią korelację ($r = 0,563$) pomiędzy zawartością chlorofilu w liściach a zawartością azotu w ziarnie roślin. Taka zależność jest związana z zaopatrzeniem roślin w azot, który jest głównym składnikiem mineralnym, niezbędnym do syntezy struktury porfirynowej chlorofilu (Kopcewicz i Lewak 2007). W warunkach stresu suszy następuje pobieranie wody przez roślinę (Abdalla i in. 2007), w wyniku czego pobieranie jonów azotanowych z podłoża ulega zmniejszeniu, a ich transport we floemie zostaje spowolniony. Maleje także aktywność reduktazy azotanowej - enzymu katalizującego redukcję jonów azotanowych do amonowych, co z kolei zmniejsza podaż jonów amonowych, niezbędnych do syntezy organicznych związków azotowych chlorofilu (Kopcewicz i Lewak 2007). Innym powodem zmniejszenia zawartości chlorofilu w liściach może być również powstawanie reaktywnych form tlenu, które powodują fotooksydację barwników i degradację chlorofilu (Anjum i in. 2011).

W dostępnej literaturze brak jest informacji na temat wpływu gleby na zawartość chlorofilu w liściach roślin, natomiast w badaniach własnych wykazano wpływ uziarnienia gleby na wielkość indeksu zieloności liścia. Największą wartością indeksu

6. Dyskusja

SPAD charakteryzowały się liście jęczmienia rosnącego na glinie średniej. Wówczas wartość parametru była wyższa o około 10% od najniższej wartości indeksu zieloności liścia roślin rosnących na pyle gliniastym, co było ściśle związane z wytworzeniem znacznie mniejszej masy części nadziemnej roślin rosnących na glinie średniej i jednocześnie z naturalną wyższą zasobnością tej gleby w azot.

6.3. ODDZIAŁYWANIE STRESU SUSZY ORAZ RÓŻNYCH GATUNKÓW GLEB NA ZAWARTOŚĆ I POBRANIE AZOTU PRZEZ ROŚLINY JĘCZMIENIA

Azot stanowi źródło białka w roślinie i ze wszystkich składników pokarmowych, w największym stopniu oddziałuje na wielkość i jakość plonu roślin (Cammarano i in. 2020). Wpływ azotu na plon jęczmienia przedstawiono w wielu pracach (Andersson i Holm 2011; Beathgen i in. 1995; Moreno i in. 2003; Noworolnik 2013; Noworolnik i Leszczyńska 2002, 2005; Příklad i in. 2005; Samarah i in 2009; Shejbalová i in. 2014), z których wynika, że występowanie okresów suszy znacząco wpływa na pobieranie tego pierwiastka i jego przemieszczanie się w roślinie.

Z dostępnych informacji wynika także, że ograniczenie dostępności wody powoduje zwiększone przemieszczanie azotu z części wegetatywnych do ziarna (Bertholdsson 1999; Bulman i Smith 1994; Cammarano i in. 2019 b; de Rooter 1999; Halvorson i Reule 2007; Qureshi i Neibling 2009; Pecio 2002; Pecio i Bichoński 2006; Thompson i in. 2004). Potwierdzają to również wyniki badań własnych, w których niedobór wody powodował zmniejszenie zawartości pierwiastka w słomie - stres wczesny o 22%, natomiast oba stesy o 34%.

Z kolei w dostępnej literaturze brakuje danych na temat wpływu gatunku gleby na zawartość azotu w roślinach zbóż. Jedynie doświadczenia przeprowadzone przez Muller (1988), wskazują na wpływ gatunku gleby na zawartość azotu w ziarnie jęczmienia pod wpływem zróżnicowanej naturalnej zasobności gleb w ten pierwiastek. Przy takich samych dawkach nawozów azotowych, badacz zaobserwował większą zawartość białka w ziarnie jęczmienia rosnącego na glebie naturalnie bardziej zasobnej w azot – glinie ciężkiej, niż na glebie mniej zasobnej – piasek gliniasty. W badaniach własnych zawartość azotu w ziarnie i słomie była ściśle związana zarówno z naturalną zasobnością gleb w azot jak i z wielkością plonu ziarna jęczmienia uprawianego na

6. Dyskusja

poszczególnych glebach. Największymi zawartościami azotu charakteryzowało się ziarno i słoma jęczmienia rosnącego na glebie o uziarnieniu gliny średniej, zaś najmniejszymi ziarno i słoma jęczmienia rosnącego na glebach o uziarnieniu pyły gliniastego, piasku luźnego i piasku słabogliniastego.

Susza ogranicza pobieranie azotu z gleby (Samarah i in 2009), co potwierdzono również w badaniach własnych, w których stresy suszy powodowały istotne zmniejszenie pobranego azotu przez całą część nadziemną roślin. Pobranie azotu, wyznaczone jako iloczyn plonu suchej masy i zawartości składnika w roślinie, było zróżnicowane pomiędzy poszczególnymi wariantami stresu. Istotne zmniejszenie pobrania pierwiastka następowało na skutek wprowadzenia wczesnego stresu suszy oraz obu stresów i wynosiło odpowiednio 20% i 27%. Zmniejszenie pobrania azotu przez rośliny jęczmienia w warunkach niedoboru opadów stwierdzili również Bahrani i in. (2011) oraz Sedlár i in. (2014).

W dostępnej literaturze brak jest informacji na temat wpływu gatunku gleby na pobranie azotu przez rośliny zbóż. Badania własne wykazały, że pobranie tego pierwiastka było ściśle związane z naturalną zdolnością gleb do zatrzymywania wody oraz ich zasobnością w azot. Istotnie więcej azotu pobrały części nadziemne roślin rosnących na glebach o większych zdolnościach retencyjnych i jednocześnie bardziej zasobnych w azot (p_{gl}, p_{gm}, g_{pp}, p_{łg}, g_s), niż na glebach o małej zdolności retencyjnej i mało zasobnych w ten pierwiastek (p_l, p_s).

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W doświadczeniu wazonowym określono wpływ krótkotrwałych stresów suszy, wprowadzanych w fazie 1. kolanka (BBCH 31) lub/i na koniec fazy kwitnienia (BBCH 69) oraz 7 gatunków gleb, na plon i jego elementy, wartości wybranych wskaźników fizjologicznych oraz na zawartość i pobranie azotu przez rośliny jęczmienia jarego. Uzyskane wyniki badań potwierdzają odpowiedni dobór czynników badawczych oraz przyjęcie właściwej hipotezy pracy, która umożliwiła wykazanie ujemnego wpływu stresów suszy na plonowanie i rozwój oraz wskaźniki fizjologiczne jęczmienia jarego w warunkach zróżnicowanego uziarnienia gleby. Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano następujące wnioski:

- 1. Stres suszy wpływa na redukcję plonu ziarna z wazonu, liczby kłosów z wazonu, liczby ziaren z wazonu, masy tysiąca ziaren, plonu słomy z wazonu, długości pędów głównych, plon części nadziemnej z wazonu, jak również wartości wskaźnika zbioru Harvest Index.***

Wprowadzone w doświadczeniu stesy suszy znacząco zmniejszyły plon ziarna jęczmienia jarego z wazonu. Dwutygodniowy wczesny stres, w fazie 1. kolanka, powodował średnią redukcję plonu o 19%, w stosunku do obiektu utrzymywanego w optymalnych warunkach wilgotności podłoża. Stres późny, wprowadzony w końcowej fazie kwitnienia wpływał na zmniejszenie plonu ziarna tylko o 8,5%. Największy negatywny wpływ stwierdzono w obiektach, w których rośliny jęczmienia poddano działaniu obu stresów, w tym przypadku redukcja plonu ziarna wyniosła aż 24%.

Stres wczesny oraz wprowadzenie obu stresów suszy powodowało zbliżoną redukcję wartości parametrów plonu takich jak plon słomy i części nadziemnej z wazonu, liczby kłosów i ziaren z wazonu, długości pędów głównych i indeksu zbioru. Stres późny natomiast powodował istotne zmniejszenie plonu części nadziemnej z wazonu, indeksu zbioru oraz masę tysiąca ziaren.

W przypadku obiektów poddanych stresowi wczesnemu (S1) redukcja plonu ziarna wynikała ze zmniejszenia liczby ziarniaków w kłosie, natomiast w obiektach

7. Podsumowanie i wnioski

poddanych stresowi późnemu (S2) - ze słabego wypełnienia ziarniaków, uwidaczniającego się w zmniejszonej masie tysiąca ziaren.

- 2. Stres suszy powoduje zmniejszenie wartości intensywności fotosyntezy, przewodnictwa szparkowego, intensywności transpiracji i wskaźnika zieloności liści (SPAD). Z kolei ustąpienie stresów powoduje stymulację roślin i wzrost wartości wskaźników w porównaniu do kontroli.**

Wczesny stres suszy powodował zmniejszenie wartości intensywności fotosyntezy o 32%, przewodnictwa szparkowego o 46% i intensywności transpiracji o 43 % oraz wskaźnika SPAD o 8%, jednak po jego ustąpieniu, wartości wskaźników zwiększyły się, osiągając w kolejnym terminie pomiaru wartości wyższe niż w obiekcie kontrolnym odpowiednio o 27%, 29%, 36%, 2%. Stres późny powodował większe niż stres wczesny ograniczenie wartości wskaźników fizjologicznych wynoszące odpowiednio 43%, 56%, 56% i 6%. Stwierdzono jednak, że rośliny, które przebyły stres wczesny i następnie stres późny (S1+S2) charakteryzowały się mniejszą redukcją badanych parametrów fizjologicznych, wynoszącą odpowiednio 15%, 13%, 25%, 4% w porównaniu do kontroli.

- 3. Gatunek gleby ma istotny wpływ na wartości wskaźników wymiany gazowej i wskaźnik zieloności liści (SPAD).**

Drugi czynnik doświadczenia - gatunek gleby również istotnie wpływał na wartości wskaźników wymiany gazowej. Największą intensywnością fotosyntezy, przewodnictwa szparkowego i transpiracji odznaczały się rośliny jęczmienia rosnące na pyle gliniastym (lessie), zaś najmniejszą na piasku luźnym, co wynikało ze znacznie większej zdolności do zatrzymywania wody gleb pyłowych niż piasków.

Względna zawartość chlorofilu w liściach badanych roślin (indeks SPAD) była najwyższa na glinie średniej zaś najniższa na pyle gliniastym – lessie, co było związane ze znacznie mniejszą ilością masy części nadziemnej roślin jęczmienia uprawianego na glinie średniej niż na pyle gliniastym - lessie.

- 4. Ocena wyników plonu i elementów plonu roślin jęczmienia pozwala klasyfikować gleby według odporności na stres suszy.**

7. Podsumowanie i wnioski

Ocena wyników plonu i elementów plonu roślin jęczmienia pod względem wielkości osiągniętych parametrów, pozwoliła podzielić badane gleby w analizowanych warunkach doświadczenia na trzy grupy odporności na stres suszy: glebę lessową (pył gliniasty) jako najbardziej odporną i wykazującą najwyższy potencjał plonowania, piasek gliniasty lekki, piasek gliniasty mocny i glinę piaszczystą pylastą jako gleby średnio odporne na suszę i o średnim potencjale plonowania oraz piasek luźny i piasek słabogliniasty jako najmniej odporne na suszę i o słabszym potencjale plonowania.

5. Stres suszy wpływa na zawartość i pobranie azotu przez rośliny jęczmienia.

Na zmniejszenie zawartości azotu w słomie w porównaniu do obiektów kontrolnych oraz pobranie pierwiastka przez ziarno i całą część nadziemną roślin, miało wpływ wprowadzenie obu stresów suszy lub tylko stresu wczesnego.

6. Gatunek gleby istotnie wpływa na zawartość azotu w ziarnie oraz słomie jęczmienia, a także na pobranie pierwiastka przez ziarno i całą nadziemną część roślin.

Największą zawartością azotu charakteryzowało się ziarno i słoma roślin rosnących na glinie średniej, zaś najmniejszą - ziarno roślin rosnących na pyle gliniastym oraz słoma roślin rosnących na pyle gliniastym i piasku luźnym. Z kolei najwięcej pierwiastka pobierało ziarno i słoma roślin rosnących na pyle gliniastym a najmniej na piasku luźnym.

8. BIBLIOGRAFIA

1. Abdelaal K.A.A., Attia K.A., Alamery S.F., El-Afry M.M., Ghazy Al., Tantawy D.S., Al-Doss A.A., El-Shawy E.S.E., Abu-Elsaoud A.M., Hafez Y.M., 2020. Exogenous application of proline and salicylic acid can mitigate the injurious impacts of drought stress on barley plants associated with physiological and histological characters. *Sustainability*. 12(5), 1736.
2. Abdelaal K.A.A., Hafez Y.M., El-Afry M.M., Tantawy D.S., Alshaal T., 2018. Effect of some osmoregulators on photosynthesis, lipid peroxidation, antioxidative capacity, and productivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) under water deficit stress. *Environ. Sci. Pollut. Res* 25, 30199–30211.
3. Abdelaal K.A.A.; Hafez Y.M.; EL Sabagh A.; Saneoka H., 2017. Ameliorative effects of Abscisic acid and yeast on morpho-physiological and yield characteristics of maize plant (*Zea mays* L.) under drought conditions. *Fresenius Environ. Bull.* 26, 7372–7383.
4. Abid M., Ali S., Qi L.K., Zahoor R., Tian Z., Jiang D., Snider J.L., Dai T., 2018. Physiological and biochemical changes during drought and recovery periods at tillering and jointing stages in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*, 4615(8): 1 – 15.
5. Ahmad S., Ahmad R., Ashraf M.D.Y.N, Ashraf M. i Waraich E. A., 2009. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Response to drought stress at germination and seedling growth stages. *Pak. J. Bot.* 41, 647-654.
6. Ajalli J., Salehi M., 2012. Evaluation of drought stress indices in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Annals of Biological Research*, 3(12): 5515-5520.
7. Akıncı Ş., Lösel D.M. 2012. Plant water-stress response mechanisms. *Water Stress*. Rahman I.Md.M. (ed.). InTech (www.intechopen.com/books).
8. Akram M., 2011. Growth and yield components of wheat under water stress of different growth stages. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 36: 455-468.
9. Albrizio R., Todorovic M., Matic T., Stellacci A.M., 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crop Research*, 115: 179-190.
10. Al-Ajloun Z.I., Al-Abdallat, Al-Ghzawi A.L.A., Ayad J.Y., Abu Elenein J.M., Al-Quraan N.A., Baenziger P.S., 2016. Impact of pre-anthesis water deficit on yield and yield components in barley (*Hordeum vulgare* L.) plants grown under controlled conditions. *Agronomy*, 6,33.
11. Alcamo J., Moreno J.M., Nowak B., Bindi M., Corobov R., Devoy R.J.N., Giannakopoulos C., Martin E., Olesen J.E., Shvidenko A., 2007. Europe. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group ii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, M.L.

8. Bibliografia

- Parry, Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E., Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 541–580.
12. Alqudah A.M., Samarah N.H., Mullen R.E., 2011. Drought stress effect on crop pollination, seed set, yield and quality. In: Lichtfouse E (ed) alternative farming systems, biotechnology, drought stress and ecological fertilisation, sustainable agriculture reviews 6. Springer Science+Business Media B.V., pp. 193-213.
 13. Andersson A., Holm L., 2011. Effects of mild temperature stress on grain quality and root and straw nitrogen concentration in malting barley cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197: 466–476.
 14. Anjum S.A., Xie X., Wang L., Saleem M.F., Man C., Lei W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *Afr. J. Agric. Res.* 6(9): 2026–2032.
 15. Anjum S.A., Ashraf U., Zohaib A., Tanveer M., Naeem M., Ali I., Nazir U., Tabassum T., 2017. Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review. *Zemdirbyste-Agriculture*, 104(3): 267-276.
 16. Appiah M., Bracho-Mujica G., Ferreira N.C.R., Schulman A.H., Rotter .R.P., 2023. Projected impacts of sowing date and cultivar choice on the timing of heat and drought stress in spring barley grown along a European transect. *Field Crops Research*. vol. 291, 108768.
 17. Athar H.R., Ashraf M., 2009. Strategies for crop improvement against salinity and drought stress: an overview, W: *Salinity and Water Stress: Improving Crop Efficiency*, Ashraf, M., Ozturk, M., Athar, H.R. Springer Verlag, New York, USA,1-16.
 18. Arve L., Torre S., Olsen J., Tanino K. 2011. Stomatal responses to drought stress and air humidity. In: *Abiotic stress in plants-mechanisms and adaptations*. IntechOpen, Rijeka 2011, s. 267-280.
 19. Baethgen W.E., Christianson C.B., Lamothe A.G., 1995. Nitrogen fertilizer effects on growth, grain yield and yield components of malting barley. *Field Crop Research*, 43: 87–99.
 20. Barnabas B., Jagner K., Feher A., 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals, *Plant Cell Environ.* 31, 11-38.
 21. Basu S., Ramegowda V., Kumar A., Pereira A., 2016. Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 5, 1554.
 22. Beltrano J. i Ronco M.G., 2008. Improved tolerance of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) to drought stress and rewatering by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus claroideum*: Effect on growth and cell membrane stability. *Braz. J. Plant Physiol.* 20, 29-37.

8. Bibliografia

23. Bernstein L.; Bosch P.; Canziani O.; Chen Z.; Christ R.; Riahi K., 2008. Climate Change 2007: Synthesis Report; IPCC: Geneva, Switzerland, 104 ss.
24. Bertholdsson N. O., 1999. Characterization of malting barley cultivars with more or less stable grain protein content under varying environmental conditions. *European Journal of Agronomy*, 10: 1-8.
25. Boanta E. A., Muntean L., Russu F., Ona A. D., Porumb I., Fili, E., 2019. Barley (*Hordeum vulgare* L.): medicinal and therapeutic uses - review. *Hop and Medicinal Plants*, XXVII, 1-2: 87-95.
26. Borówczak F., Rębarz K., 2010. Efekty produkcyjne i ekonomiczne różnych systemów uprawy jęczmienia jarego odmiany stratus w zależności od deszczowania. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, vol. 55(3): 29-32.
27. Bota J., Medrano H., Flexas J., 2004. Is photosynthesis limited by decreased Rubisco activity and RuBP content under progressive water stress? *New Phytologist*. 162: 671–681.
28. Bray E.A., Bailey-Serres, J., Weretilnyk E., 2000. Responses to abiotic stress. In *Biochemistry and molecular biology of plants*, 1st ed.; Buchanan. B.B.; Gruissen, W.; Jones, R.L.; Rockville, Maryland, USA, 2000: 1158-1249.
29. Breda N., Huc R., Granier A., Dreyer, E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63(6), 625–644.
30. Brisson N., Rebière B., Zimmer D. i Renault P., 2002. Response of the root system of a winter wheat crop to waterlogging. *Plant and Soil*, 243, 43–55.
31. Bu X., Gu X., Zhou X., Zhang M., Guo Z., Zhang J., Zhou I., Chen X., Wang X., 2018. Extreme drought slightly decreased soil labile organic C and N contents and altered microbial community structure in a subtropical evergreen forest. *Forest Ecology and Management*, 429: 18–27.
32. Budzyński W., Szempliński W., 1999. Jęczmień. 191-233. Jasińska Z., Kotecki A., Szczegółowa uprawa roślin. Akademia Rolnicza, Wrocław.
33. Bulman P., Smith D.L., 1994. Post heading uptake, retranslocation and partitioning in spring barley. *Crop Science*. 34, 977-984.
34. Cammarano D., Hawes C., Squire G., Holland J., Rivington M., Murgia T., Roggero P.P., Fontana F., Casa R., Ronga D., 2019 a. Rainfall and temperature impacts on barley (*Hordeum vulgare* L.) yield and malting quality in Scotland. *Field Crop Research*, 241, 107559.
35. Cammarano D., Hawes C., Squire G., Holland J., Rivington M., Murgia T., Roggero P.P., Fontana F., Casa R., Ronga D., 2019 b. Rainfall and temperature impacts on barley

8. Bibliografia

- (*Hordeum vulgare* L.) yield and malting quality in Scotland. *Field Crop Research*, 241, 107559.
36. Cammarano D., Holland J., Ronga D., 2020. Spatial and Temporal Variability of Spring Barley Yield and Quality Quantified by Crop Simulation Model. *Agronomy*, 10(3), 393.
 37. Carter A.J., Hawes M.C., Ottman M.J., 2019. Drought-Tolerant Barley: I. Field Observations of Growth and Development. *Agronomy*, 9(5): 221.
 38. Ceccarelli S., Grando S., 1996. Drought as a challenge for the plant breeder. *Plant Growth Regulation*, 20: 149–155.
 39. Chmura K., Chylińska E., Dmowski Z., Nowak L., 2009. Rola czynnika wodnego w kształtowaniu plonu wybranych roślin polowych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 9: 33-44.
 40. Choat B., Jansen S., Brodribb T.J., Cochard H., Delzon S., Bhaskar R., i in., 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 29;491(7426): 752–755.
 41. Chojnacka W., Faryn A., Dybowski M., Sekulsak E., Stachowicz T., Deniszewska I., 2018. Jęczmień jary. 59-69. Wyniki porejestrowych doświadczeń odmianowych w województwie mazowieckim. Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych, Stacja Doświadczalna Oceny Odmian w Seroczyniu, Seroczyn.
 42. Ciscar J.-C., 2012. The impacts of climate change in Europe (the PESETA research project). *Climatic Change*, 112, 1-6.
 43. Cossani C.M., Slafer G.A., Savin R., 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crop Research*, 112: 205-213.
 44. Czyż E. A., Dexter A. R., 2015. Fizyczne właściwości gleb. Wademekum klasyfikatora gleb. Praca zbiorowa pod redakcją F. Wocha. IUNG-PIB. Puławy 22-95.
 45. Czyż E. A., Dexter A. R., Niedźwiecki J., 2003. Retencja wodna gleb wieloletnich statycznych doświadczeń poletkowych. *Roczniki Gleboznawcze*. 56, 3: 27-37.
 46. Datta, J.K., Mondal T., Banerjee A., Mondal N.K, 2011. Assessment of drought tolerance of selected wheat cultivars under laboratory condition. *Journal of Agricultural Technology*, 7, 383-393.
 47. de Ruiter J.M., 1999. Yield and quality of malting barley (*Hordeum vulgare* L. Valetta) in response to irrigation and nitrogen fertilisation. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 27: 307–317.
 48. Demidowicz G., Doroszewski A., Górski T., 1996. Wpływ niedoboru opadów na straty w produkcji ziemniaka i buraka cukrowego. *Zeszyty Problemowe Nauk Rolniczych*. 438: 43.

8. Bibliografia

49. Doroszewski A., Jadczyzyn J., Kozyra J., Pudełko R., Stuczyński T., Mizak K., Łopatka A., Koza P., Górski T., Wróblewska E., 2012. Podstawy Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. 12(2(38)): 77-9.
50. Doroszewski A., Józwicki T., Wróblewska E., i in., 2014. Susza rolnicza w Polsce w latach 1996-2010 Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy. ss 137.
51. Dz.U. nr 75, poz. 480, 2010: Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju wsi z dnia 9 czerwca 2009 r. w sprawie klimatycznego bilansu wodnego dla poszczególnych gatunków roślin uprawnych i gleb.
52. Eitzinger J., Trnka M.; Semerádová D., Thaler S., Svobodová E., Hlavinka P., Šiška B., Takác J., Malatinská L., Nováková M., Dubrovský M., Žalud Z., 2012. Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe—Hotspots, regional differences and common trends. *Journal of Agricultural Science*, 151: 787–812.
53. FAO 2018. The impact of disasters and crises on agriculture and food security. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 168 pp. ISBN: 978-92-5-130359-7.
54. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev*, 29: 185–212.
55. Fathi A., Tari D.B., 2016. Effect of drought stress and its mechanism in plants. *International Journal of Life Sciences*. 10(1): 1-6.
56. Ferrante A., Savin A., Slafer G.A., 2008. Wheat and barley floret development in response to nitrogen and water availability. *Italian Journal of Agronomy/Rivista di Agronomia*, 3 suppl.: 205-206.
57. Flexas J., Bota J., Cifre J., Escalona J. M., Galmés J., Gulías J., Lefi E-K., MartínezCañellas S. F., Moreno M. T., Ribas-Carbó M., Riera D., Sampol B. & Medrano H.. 2004. Understanding down-regulation of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. *Annals of Applied Biology*. 144(3), 273–283.
58. Forouzesh E., Goel A., Mackenzie S.A. Turner J.A. 2013. In vivo extraction of Arabidopsis cell turgor pressure using nanoindentation in conjunction with finite element modeling. *The Plant Journal*, 73, 509-520.
59. Forster B., 2004. Genotype and phenotype associations with drought tolerance in barley 14 tested in North Africa. *Annals of Applied Biology*. 144(2): 157–168.
60. Francia E., Tondelli A., Rizza F., Badeck F.W., Thomas W.T.B., van Eeuwijk, Romagosa I., Stanca A.M., Pecchioni N., 2013. Determinants of barley grain yield in drought-prone Mediterranean environments. *Italian Journal of Agronomy*, 8(1)

8. Bibliografia

61. Friedt W., 2011. Barley breeding history, progress, objectives, and technology. 160-220. Ullrich S.E., Barley: Production, Improvement, and Uses. Wiley-Blackwell
62. Gaj R., 2013. Efektywne wykorzystanie składników mineralnych z nawozów we współczesnym rolnictwie. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie o. w Poznaniu, Poznań, ss. 39.
63. Gąsiorowski H., 2010. Jęczmień chemia i technologia, PWRiL Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. 285 ss.
64. Główny Urząd Statystyczny 2021. Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej. Zakład Wydawnictw Statystycznych.
65. Grzebisz W. 2012. Technologie nawożenia roślin uprawnych – fizjologia plonowania. Tom 2. Zboża i kukurydza, PWRiL, Poznań, 279 ss.
66. Grzebisz W., Gransee A., Szczepaniak W., Diatta J., 2013. The effects of potassium fertilization on water-use efficiency in crop plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci*, 176: 355–374.
67. Górski T., 2006. Zmiany warunków agroklimatycznych i długość okresu wegetacyjnego w ostatnim stuleciu. w: Długotrwałe przemiany krajobrazu Polski w wyniku zmian klimatu i użytkowania ziemi. IGBP-Global Change, Poznań, 65–77.
68. Górski T., Zaliwski A., 2002. Model Agroklimatu Polski. *Pamiętnik Puławski*, 130(1): 251-260.
69. Górski T., Kozyra J., Doroszewski A., 2008. Field crop losses in Poland due to extreme weather conditions: case studies. In: *The influence of extreme phenomena on the natural environment and human living conditions*, S. Liszewski (ed.), Łódź. ŁTN, 2008, 35-49.
70. Hafez Y., Attia K., Alamery S., Ghazy A., Al-Doss A., Ibrahim E., Rashwan E., El-Maghraby L., Awad A., Abdelaal K., 2020. Beneficial effects of biochar and chitosan on antioxidative capacity, osmolytes accumulation, and anatomical characters of water-stressed barley plants. *Agronomy*. 10(5), 630.
71. Haddadin M. F., 2015. Assessment of drought tolerant barley varieties under water stress. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 5(2): 131-137.
72. Halvorson A.D., Reule C.A., 2007. Irrigated, no-till corn and barley response to nitrogen in Northern Colorado. *Agronomy Journal*, 99(6): 1521–1529.
73. Havrlentová M., Kraic J., Gregusová V., Kováčsová B., 2021. Drought stress in cereals – A review. *Agriculture (Poľnohospodárstvo)*, 67(2): 47 – 60.
74. Hepworth C.; Doheny-Adams T.; Hunt L.; Cameron D.D.; Gray J.E. 2015. Manipulating stomatal density enhances drought tolerance without deleterious effect on nutrient uptake. *New Phytologist*. 208, 336–341.

8. Bibliografia

75. Hewelke P., Gnatowski T., Żakowicz S., 2013. Analiza zdolności retencjonowania wody przez mineralne utwory glebowe. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus*, 12(1): 43-52.
76. Hossain Md. A., Uddin S. N., 2011. Mechanisms of waterlogging tolerance in wheat: Morphological and metabolic adaptations under hypoxia or anoxia. *Australian Journal of Crop Science*, 59, 1094-1101.
77. Hossain A., Teixeira da Silva J.A., Lozovskaya M.V., Zvolinsky V.P., Mukhortov V.I., 2012. High temperature combined with drought affect rainfed spring wheat and barley in south-eastern Russia: Yield, relative performance and heat susceptibility index. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 4(11): 184-196
78. Huntingford C., Hugo Lambert F., Gash J.H.C., Taylor C.M., Challinor A.J., 2005. Aspects of climate change prediction relevant to crop productivity. *Philosophical Transaction Royal Society B: Biol. Sci.* 360 (1463): 1999–2009.
79. Hussain S., Hussain S., Qadir T., Khaliq A., Shraf U., Parveen A., Saqib M., Rafiq M., 2019. Drought stress in plants: an overview on implications, tolerance mechanisms and agronomic mitigation strategies. *Plant Science Today*, 6: 389-402.
80. https://coboru.gov.pl/Polska/Rejestr/odm_w_rej.aspx?kodgatunku=JEZJ (dostęp: 23.02.2021).
81. <https://susza.iung.pulawy.pl/mapa-kategorii/>
82. Igras J., Lipiński W., 2006. Regionalne zróżnicowanie stanu agrochemicznego gleb w Polsce. Raporty PIB. IUNG-PIB Puławy, Z.3 71-79.
83. Jadczyzyn J., Bartosiewicz B., 2020. Procesy osuszania i degradacji gleb. *Studia i Raporty IUNG-PIB Puławy*, 64(18): 49-60.
84. Jadczyzyn J., Bartosiewicz B., 2021. Praktyki zwiększające retencję glebową i wykorzystanie wody w polowej produkcji roślinnej. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 66(20): 117-127.
85. Jastrzębska M., Kostrzewska M.K., Wanic M., 2016. Wpływ deficytu wody i interakcji międzygatunkowych na wybrane parametry fizjologiczne roślin jęczmienia jarego i koniczyny czerwonej. *Fragmenta Agronomica*, 33(4): 44-59.
86. Jamieson P.D., Martin M.J., Francis G.S., 1995. Drought influences on grain yield of barley, wheat, and maize. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 23: 55-66.
87. Jedmowski C., Ashoub A., Brüggemann W., 2013. Reactions of Egyptian landraces of *Hordeum vulgare* and *Sorghum bicolor* to drought stress, evaluated by the OJIP fluorescence transient analysis. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(2), 345-354.

8. Bibliografia

88. Jones M.B., Leafe E.L., Stilles W. 1980. Water stress in field-grown perennial ryegrass. II. Its effects on leaf water status, stomatal resistance and leafy morphology. *Annals of Applied Biology*, 96, 103-110.
89. Kacperska A., 2002. *Gospodarka wodna. Fizjologia roślin. Praca zbiorowa pod redakcją J. Kopcewicza i S. Lewaka. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 192-227.*
90. Kadam N. N., Xiao G., Melgar R. J., Bahuguna R. N., Quinones C., Tamilselvan A., Prasad P.V.V., Jagadish K.S.V., 2014. Chapter Three - Agronomic and physiological responses to high temperature, drought, and elevated CO₂ interactions in cereals. *Advances in Agronomy*. 127: 111–156.
91. Kalaji H.M., Jajoo A., Oukarroum A. Brestic M., Zivcak M., Samborska I.A., Cetner M.D., Łukasik I., Goltsev V., Ladle R.J, 2016. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38, 102.
92. Kamanga R.M., Mbega E., Ndakidemi P., 2018. Drought tolerance mechanisms in plants: physiological responses associated with water deficit stress in *Solanum lycopersicum*. *Advances in Crop Science and Technology*, 6: 362.
93. Kapoor D., Bhardwaj S., Landi M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., Sharma, A. 2020. The Impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, 10(16), 5692.
94. Karimpour M., 2019. Effect of drought stress on RWC and chlorophyll content on wheat (*Triticum durum* L.) genotypes. *World Essays Journal*, 7: 52-56.
95. Kebede A., Manjit S. K., Endashaw B., 2019. Advances in mechanisms of drought tolerance in crops, with emphasis on barley. *Advances in Agronomy*, ncrease crop production. *Applied Sciences*, 10(16): 1 – 19.
96. Khalili M., Aboughadareh A.P., Naghavi M.R., 2013. Screening of drought tolerant cultivars in barley using morpho-physiological traits and Integrated Selection Index under water deficit stress conditio. *Advanced Crop Science*, 3(7): 462–471.
97. Khan M. A., Iqbal M, Akram M., Ahmad M., Hassan M. W., Jamil M., 2013. Recent advances in molecular tool development for drought tolerance breeding in cereal crops: A review. *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 100, No. 3, p. 325–334.
98. Kilic H., Yagbasanla T., 2010. The effect of drought stress on grain yield, yield components and some quality traits of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum) cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici*. 38:164–170.
99. Kopcewicz J., Lewak S. 2005. *Fizjologia roślin. PWN, Warszawa 806 ss.*
100. Kozłowski S., Goliński P., Golińska B. 2001. Barwniki chlorofilowe jako wskaźniki wartości użytkowej gatunków i odmian traw. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 474, 215-223.

8. Bibliografia

101. Kozyra J., Górski T., 2008. Wpływ zmian klimatycznych na rolnictwo w Polsce. Zmiany klimatu, a rolnictwo i obszary wiejskie. Fundacja na Rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa, Warszawa s. 35–40.
102. Kozyra J., Doroszewski A., Nieróbca A., 2009. Zmiany klimatyczne i ich przewidywany wpływ na rolnictwo w Polsce. *Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy*, 14: 243-257.
103. Křen J., Klem K., Svobová I., Míša P., Neudert L., 2014. Yield and Grain quality of spring barley as affected by biomass formation at early growth stages. *Plant Soil Environment*, 60(5): 221-227.
104. Kręgiel B., Jarosińska E., 2009. Obecny stan monitoringu zjawiska suszy w Polsce I na świecie. *Środowisko. Czasopismo Techniczne*. 11: 87-99.
105. Kuczyńska A., Surma M., Adamski T., Krajewski P., Mikołajczak K., Ogrodowicz P., Kempa M., Ćwiek-Kupczyńska H., Trzeciak R., 2019. Wpływ stresu niedoboru wody na rozwój i architekturę systemu korzeniowego u jęczmienia (*Hordeum vulgare* L.). *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Rroślin*. Nr 286: 117-121.
106. Kumar S., Sachdeva S., Bhat K.V., Vats S., 2018. Plant responses to drought stress: physiological, biochemical and molecular basis. pp. 1-25. In: *Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
107. Kundzewicz Z.W., Kozyra J., 2011. Ograniczenie wpływu zagrożeń klimatycznych w odniesieniu do rolnictwa i obszarów wiejskich. *Polish Journal of Agronomy*. 7: 68-81.
108. Kuś J., 2016. Gospodarowanie wodą w rolnictwie. *Studia i raporty IUNG-PIB*. 47(1): 83-104.
109. Lawlor D.W., Tezara W., 2009. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in waterdeficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annal of Botany*, 103(4): 561–579.
110. Li R., Guo P., Michael B., Stefania G. 2006. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. *Agriculture in Sciences in China* 5(10), 751–757.
111. Lee D.K., Jung H., Jang G., Jeong J.S., Kim Y.S., Ha S.H., Choi Y.D., Kim J.K., 2016. Overexpression of the OsERF71 transcription factor alters rice root structure and drought resistance. *Plant Physiology*, 172, 575–588.
112. Leszczyńska D., Noworolnik K., 2012. Ogólne zasady agrotechniki istotne w integrowanej ochronie roślin. 4-16. Marek Korbasa., Marek Mrówczyński. *Metodyka Integrowanej ochrony jęczmienia ozimego i jarego dla producentów*. Wyd. IOR-PIB, Poznań.

8. Bibliografia

113. Lin, Q., Wang, S., Dao, Y., Wang, J., Wang, K. 2020. Arabidopsis thaliana trehalose-6-phosphate phosphatase gene TPPI enhances drought tolerance by regulating stomatal apertures. *Journal of Experimental Botany*, 6;71(14): 4285-4297.
114. Lipiec J., Doussan C., Nosalewicz A., Kondracka K., 2013. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. *International Agrophysics*, 27: 463-477.
115. Liszewski M., 2008. Reakcja dwóch form jęczmienia jarego pastewnego na zróżnicowane technologie uprawy. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu*, 565, Rozprawy 254: ss 108.
116. Liszewski M., Błażewicz J., 2016. Effect of nitrogen fertilization on grain yield and quality of naked spring barley cultivar. Wpływ nawożenia azotem na wysokość i jakość plonu nagoziarnistej odmiany jęczmienia jarego. *Fragmenta Agronomica*, 33(1), 65-75.
117. Łabędzki L., 2006. Susze rolnicze. Zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, Rozpr. Nauk. Monogr.*, nr 17, IMUZ Falenty, ss. 107.
118. Małecka I., Swędryńska D., Bleharczyk A., Dytman-Hagedorn M., 2012. Wpływ systemów uprawy roli pod groch na właściwości fizyczne, chemiczne i biologiczne gleby. *Fragmenta Agronomica*, 29(4): 106–116.
119. Marschner P., 2012. *Marshner's mineral nutrition of higher plants*, 3rd ed. Academic Press: London, UK. 651 ss.
120. Majewski W., 2017. *Woda w inżynierii środowiska. Monografie instytutu meteorologii i gospodarki wodnej państwowego instytutu badawczego. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, 172 ss.
121. Méndez A.M., Castillo D., del Pozo A., Matus I., Morcuende R., 2011. Differences in stem soluble carbohydrate contents among recombinant chromosome substitution lines (RCSLs) of barley under drought in Mediterranean-type environment. *Agronomy Research*, 9: 433-438.
122. Michalska M., Wanic M., Kostrzewska M.K., 2008. Konkurencja pomiędzy jęczmieniem jarym a grochem siewnym w zróżnicowanych warunkach glebowych. Cz. I Akumulacja biomasy i tempo wzrostu roślin. *Acta Scientiarum Polonorum, Agricultura* 7 (2), 69-86.
123. Mirkowska Z., 2009. *Konsekwencje zmian klimatycznych dla rolnictwa. Instytut Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej – PIB Warszawa. artykuł_ZER209:ZER_projekt 2009-06-10.*
124. Mizak K., Pudełko R., Kozyra J., Nieróbca A., Doroszewski A., Świtaj Ł., Łopatka A., 2011. Results of monitoring agricultural drought in winter wheat crops in Poland in the years 2008–2010. Wyniki monitoringu suszy rolniczej w uprawach pszenicy ozimej w Polsce w latach 2008-2010. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, t.11 z. 2(34): 95-107.

8. Bibliografia

125. Moreno A., Moreno M.M., Ribas F., Cabello J., 2003. Influence of nitrogen fertilizer on grain yield of barley (*Hordeum vulgare* L.) under irrigated conditions. Spanish Journal of Agricultural Research, 1(1): 91-100.
126. Mostafavi K., 2011. A study effects of drought stress on germination and early seedling growth of flax (*Linum Usitatissimum* L.) cultivars. Advances in Environmental Biology, 5, 3307-3311.
127. Nayyar, H., Gupta, D., 2006. Differential sensitivity of C3 and C4 plants to water deficit stress: association with oxidative stress and antioxidants. Environmental Experimental Botany, v.58, 106–113.
128. Nevo E., Beiles A., Kaplan D., Starch N., ZOohary D., 1986. Genetic diversity and environmental associations of wild barley, *Hordeum spontaneum* (Poaceae) in Iran, Plant Systematics and Evolution, 153: 141–164.
129. Nieróbca A., Kozyra J., Mizak K., Wróblewska E., 2013. Zmiana długości okresu wegetacyjnego w Polsce. Woda-Srodowisko-Obszary Wiejskie. T.13.z.2 (42): 81-94.
130. Noworolnik K., 1998. Dostosowanie głównych czynników agrotechniki jęczmienia jarego do warunków glebowych. Wyd. IUNG, Seria K, 15/I: 393-398.
131. Noworolnik K, 2003. Wpływ wybranych czynników agrotechnicznych na plonowanie jęczmienia jarego w różnych warunkach siedliska. Monografie i Rozprawy Naukowe IUNG-PIB, 8: ss 66.
132. Noworolnik K., 2008 a. Wpływ jakości gleby na plonowanie pszenicy jarej i jęczmienia jarego. Acta Agrophysica, 11(2): 457-464.
133. Noworolnik K., 2008 b. Wpływ wybranych cech jakości gleby na plonowanie pszenicy ozimej i jęczmienia ozimeg. Acta Agrophysica, 12(2): 477-485.
134. Noworolnik K., 2013. Plonowanie i jakość ziarna odmian jęczmienia jarego w zależności od dawki azotu. Fragmenta Agronomica, 30(3): 123-131.
135. Noworolnik K., 2014. Agrotechnika w kształtowaniu plonu i jakości ziarna jęczmienia jarego na cele pastewne i spożywcze. Studia i Raporty IUNG-PIB, 41(15): 21-37.
136. Noworolnik K., 2015. Porównanie plonowania odmian jęczmienia jarego w różnych warunkach glebowych. Polish Journal of Agronomy, 23, 69-73.
137. Noworolnik K., Leszczyńska D., 2002. Porównanie reakcji odmian jęczmienia jarego na poziom nawożenia azotem. Biuletyn IHAR 221: 67–72.
138. Noworolnik K., Leszczyńska D., 2005. Wpływ dawki azotu na plonowanie odmian jęczmienia jarego w doświadczeniu wazonowym. Biuletyn IHAR 237/238: 67–73.
139. Noworolnik K., Terelak H., 2005. Plonowanie jęczmienia jarego i owsa oraz ich mieszanki w zależności od warunków glebowych. Roczniki Gleboznawcze, (56) 3/4: 60 - 66.

8. Bibliografia

140. Noworolnik K., Terelak H., 2006. Wpływ agrochemicznych właściwości gleb na plon ziarna i białka jęczmienia jarego i owsa oraz ich mieszanek. Roczniki Gleboznawcze, (57) 3/4; 72-79.
141. Osuna D., Usadel B., Morcuende R., Gibon Y., Bläsing O., Höhne M., Günter M., Kamlage B., Trethewey R., Scheible W-R., Stitt M., 2007. Temporal responses of transcripts, enzyme activities and metabolites after adding sucrose to carbon-deprived Arabidopsis seedlings. The Plant Journal. 49(3), 463–491.
142. Paluszek J., 2011. Kryteria oceny jakości fizycznej gleb uprawnych Polski. Acta Agrophysica. PAN Lublin, Rozprawy i monografie, 2, ss 139.
143. Paulo A.A., Pereira L.S. 2006. Drought concepts and characterization. Comparing drought indices applied at local and regional scales. Water International, 31(1): 37-49.
144. Pasela E., 1975. Kształtowanie się masy korzeniowej jęczmienia jarego w poszczególnych warstwach profilu glebowego w zależności od wilgotności gleby i niektórych elementów meteorologicznych. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie nr 103 (35): 1–86.
145. Panasiewicz K., Koziara W., 2004. Wpływ deszczowania, nawożenia azotem oraz stymulatorów odporności na plon i komponenty plonowania jęczmienia jarego. Roczniki AR w Poznaniu, CCCLXI: 13-25.
146. Pecio A., 2002. Środowiskowe i agrotechniczne uwarunkowania wielkości plonu ziarna jęczmienia browarnego. Fragmenta Agronomica, (XIX) 4(76): ss19.
147. Pecio A., Bichoński A. 2006. Reakcja wybranych odmian jęczmienia browarnego na zróżnicowane nawożenie azotem. Pamiętnik Puławski, 142: 333-348.
148. Pecio A., Wach D., 2015. Grain yield and yield components of spring barley genotypes as the indicators of their tolerance to temporal drought stress. Polish Journal of Agronomy, 21: 19-27.
149. Promkhambut A., Younger A., Polthanee A. i Akkasaeng C., 2010. Morphological and physiological responses of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to waterlogging. Asian Journal of Plant Sciences, 9, 183-193.
150. Příklad M., Richter R., Zimolka J., Cerkal R., 2005. The influence of the year, fore-crops and fertilisation on yield and content of crude protein in spring barley. Plant, Soil and Environment. 51(3): 144-150.
151. Qian D., Zhang Z., He J., Zhang P., Ou X., Li T., i inni., 2019. Arabidopsis ADF5 promotes stomatal closure by regulating actin cytoskeleton remodeling in response to ABA and drought stress. Journal of Experimental Botany 70, 435-446.
152. Qureshi Z.A., Neibling H., 2009. Response of two-row malting spring barley to water cutoff under sprinkler irrigation. Agricultural Water Management, 96: 141–148.

8. Bibliografia

153. Radzka E., 2014. Klimatyczny bilans wodny okresu wegetacyjnego (według wzoru Iwanowa) w środkowowschodniej Polsce. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, T.14.z.1: 67-76.
154. Rahdari P., Hoseini S.M., 2012. Drought stress: a review. *International Journal of Agronomy and Plant Production*. 3 (10): 443 - 446.
155. Rajala A., Hakala K., Mäkelä P., Peltonen-Sainio P., 2011. Drought effect on grain number and grain weight at spike and spikelet level in six-row spring barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197: 103-112.
156. Rehman S., Harris P.J.C., Ashraf M., 2005. Stress environments and their impact on crop production. W: *Abiotic Stresses: Plant Resistance Through Breeding and Molecular Approaches*, Ashraf, M., Harris, P.J.C., Haworth Press, New York, USA, 3–18.
157. Rozbicki J., Studnicki M., Sobczyński G., 2019. Jak stres suszy i nadmiar wilgoci oddziałuje na plon roślin i jego składowe. *Susza – zagrożenie dla roślin rolniczych w Polsce*. PAN, IHAR PIB, Radzików, 8-9.
158. Sallam A., Ahmad M. A., Mona F. A. D., Baenziger P. S., Börner A. 2019. Drought stress tolerance in wheat and barley: Advances in physiology, breeding and genetics research. *International Journal of Molecular Sciences*. 20(13): 3137.
159. Samarah H. N., 2005. Effects of drought stress on growth and yield of barley. *Agronomy for Sustainable Development*. 25, 145–149.
160. Samarah N. H., Alqudah A. M., Amayreh J. A., McAndrews G. M., 2009. The effect of late-terminal drought stress on yield components of four barley cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 195 (6): 427–441.
161. Sanaullah M., Chabbi A., Rumpela C., Kuzyakov Y., 2012. Carbon allocation in grassland communities under drought stress followed by ¹⁴C pulse labelling. *Soil Biology and Biochemistry*. 55: 132-139.
162. Sayar R., Khemira H., Kameli A. i Mosbahi M., 2008. Physiological tests as predictive appreciation for drought tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Agronomy Research* 6, 79-90.
163. Sayed O.H., 2003. Chlorophyll fluorescence as a tool in cereal crop research. *Photosynthetica*, 41(3), 321-330.
164. Sedlár O., Balík J., Cerný J., Peklová L, Kubeřová K., 2014. Influence of precipitation amount during grain filling on nitrogen uptake and grain yield of spring barley fertilized by ammonium injection. *Cereal Research Communications* 42(2): 338–345.
165. Seghatoleslami M.J., Kafi M. i Majidi E., 2008. Effect of drought stress at different growth stages on yield and water use efficiency of five proso millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes. *Pakistan Journal of Botany*, 40(4): 1427-1432.

8. Bibliografia

166. Shangguan Z., Shao M., Dyckmans J. 1999. Interaction of osmotic adjustment and photosynthesis in winter wheat under soil drought. *J. Plant Physiol.* 154, 753–758.
167. Shejbalová Š., Černý J., Vašák F., Kulhánek M., Balík J., 2014. Nitrogen efficiency of spring barley in long-term experiment. *Plant, Soil and Environment.* 60(7): 291-296.
168. Solomon S., 2007. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007; Volume 4.*
169. Staniak M., Baca E. 2018. Plon suchej masy i białka oraz indeks zieloności liścia SPAD koniczyny łąkowej i festulolium w zależności od sposobu uprawy i poziomu wilgotności gleby. *Polish Journal of Agronomy.* 34, 34-43.
170. Staniak M., Fartiszewska A., 2014. Produktywność traw pastewnych w warunkach suszy. *Studia I Raporty IUNG-PIB,* 41(15): 195-208.
171. Sułek A., Leszczyńska D., 2016. Nawożenie zbóż jarych w warunkach zmieniającego się klimatu. *Studia i Raporty IUNG-PIB,* 50(4); 53-64.
172. Sułek A., Podolska G., Leszczyńska D., Noworolnik K., 2007. Reakcja zbóż na nawożenie azotem. *Studia i Raporty IUNG-PIB,* 9: 29-36.
173. *Susza w Polsce – 2006 rok (przyczyny, natężenie, zasięg, wnioski na przyszłość). Raport IMiGW Warszawa, 2006, ss. 33*
174. Sun Y., Chen H. Y. H., Jin L., Wang C., Zhang R., Ruan H., Yang J., 2020 a. Drought stress induced increase of fungi: bacteria ratio in a poplar plantation. *Catena* 193, 104607.
175. Sun Y., Wang C., Chen HYH and Ruan H., 2020 b. Response of plants to water stress: a meta-analysis. *Frontiers in Plant Science,* 11:978.
176. Szwed M., 2018. Variability of precipitation in Poland under climate change. *Theoretical and Applied Climatology,* 135: 1003-1015.
177. Svobodová I., Míša P., 2004. Effect of drought stress on the formation of yield elements in spring barley and the potential of stress expression reduction by foliar application of fertilizers and growth stimulator. *Plant Soil Environment,* 10: 439-446.
178. Ślusarczyk E., 1979. Określenie retencji użytecznej gleb mineralnych do prognozowania i projektowania nawodnień. CBS i PWM „Bipromel”. Nr 10/75. *Melioracje Rolnicze, Biuletyn Informacyjny,* Z. 3.
179. Thompson T.L., Ottman M.J., Riley-Saxton E., 2004. Basal steam nitrate tests for irrigated malting barley. *Agronomy Journal,* 96, 516–524.
180. Thompson L.M., Troeh F.R., 1978. *Gleba i jej żyzność. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa. ss 547.*
181. Trenberth K.E., 2011. Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.,* 47, 123-138.

8. Bibliografia

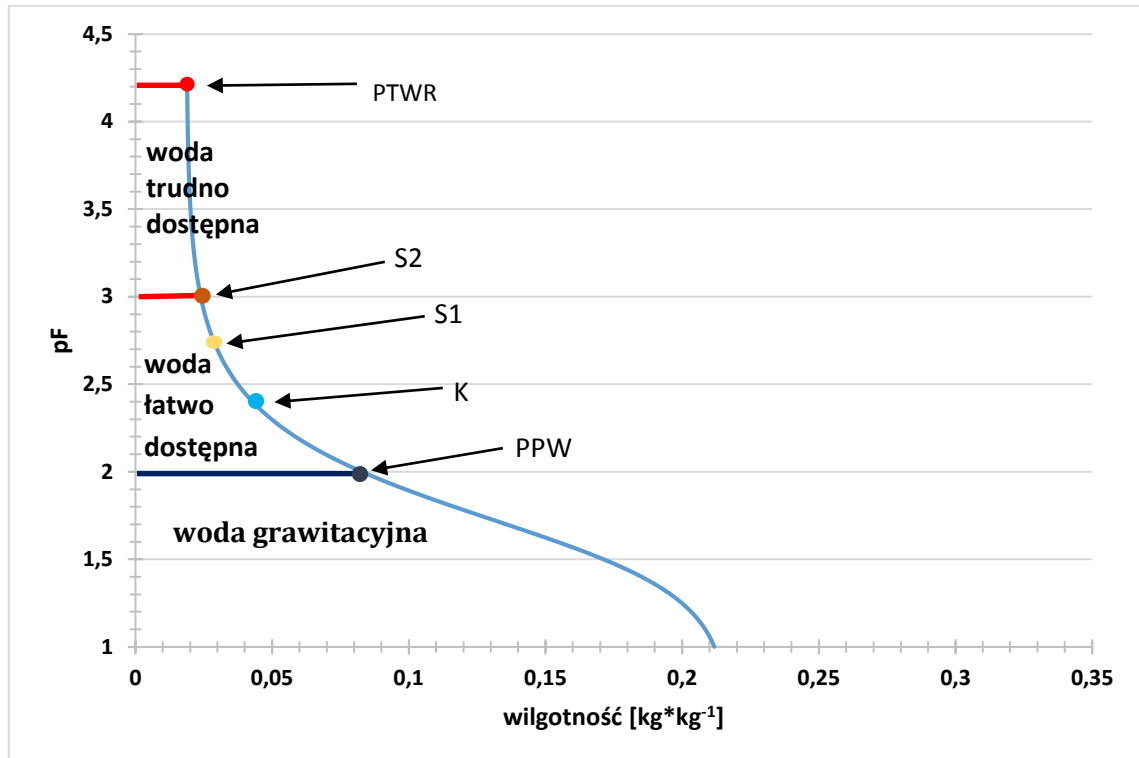
182. ul-Haq A., Vamil R., Agnihotri R.K., 2010. Effect of osmotic stress (PEG) on germination and seedling survival of lentil (*Lens culinaris* MEDIK.). *Research Journal of Agricultural Sciences* 1, 201-204.
183. Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2002 a. Hydrofizyczne charakterystyki mineralnych gleb ornych Polski. *Acta Agrophysica*, 79, 1-64.
184. Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2002b. Spatial characteristic of hydro-physical properties in arable mineral soils in Poland as illustrated by field water capacity (FWC). *Int. Agrophysics*, 16, 151-159.
185. Wang Q., Wu J., Lei T., He B., Wu Z., Liu M., Mo X., Geng G., Li X., Zhou H., Liu L., 2014. Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. *Quaternary International*. 349: 10–21.
186. Wang R., Gao M., Ji S., Wang S., Meng Y., Zhou Z., 2016. Carbon allocation, osmotic adjustment, antioxidant capacity and growth in cotton under long-term soil drought during flowering and boll-forming period. *Plant Physiol. Biochem.* 107, 137–146.
187. Wang, J., Vanga, S.K., Saxena, R., Orsat, V., RaghavaN. V., 2018. Effect of climate change on the yield of cereal crops: A review. *Climate*, 6(2), 1– 19.
188. Wang W., Chen Q., Xu S., Liu W. C., Zhu X., Song C. P., 2020. Trehalose-6-phosphate phosphatase E modulates ABA-controlled root growth and stomatal movement in *Arabidopsis*. *Journal of Integrative Plant Biology* 62, 1518-1534.
189. Wigley T.M., Raper S.C., 2001. Interpretation of high projections for global-mean warming. *Science*, 293: 451-454.
190. Witek T., 1992. Produktywność gruntów ornych i użytków zielonych. W. *Zalecenia Agrotechniczne IUNG*, 41-60.
191. Wojtasik D., 2004. Wpływ deszczowania i nawożenia mineralnego na plonowanie jęczmienia browarnego i pastewnego uprawianego na glebie lekkiej. cz.II. Plon i jakość ziarna. *Acta Scientiarum Polonarium, Agricultura*. 3(2): 131–142.
192. Wójcik I., Doroszewski A., Wróblewska E., Koza P., 2018. Susza rolnicza w uprawie zbóż ozimych w Polsce w latach 2006-2017. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T.18.z. 4 (64): 75-92.
193. Wyszynski Z., Gozdowski D., Łoboda T., Pietkiewicz S., Wołejko E. 2002. Reakcja jęczmienia jarego browarnego w latach o zróżnicowanych opadach przy różnym nawożeniu azotem. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. 481: 349-355.
194. Vadez V., Kholova J., Choudhary S., Zindy P., Terrier M., Krishnamurth L., Kumar P.R., and Turner N.C., 2011. Whole plant response to drought under climate change. In: *Crop adaptation to climate change* (Eds S.S. Yadav, R. Redden, J.L. Hatfield, H. Lotze-Campen, A.E. Hall). Chichester-Wiley-Blackwell.

8. Bibliografia

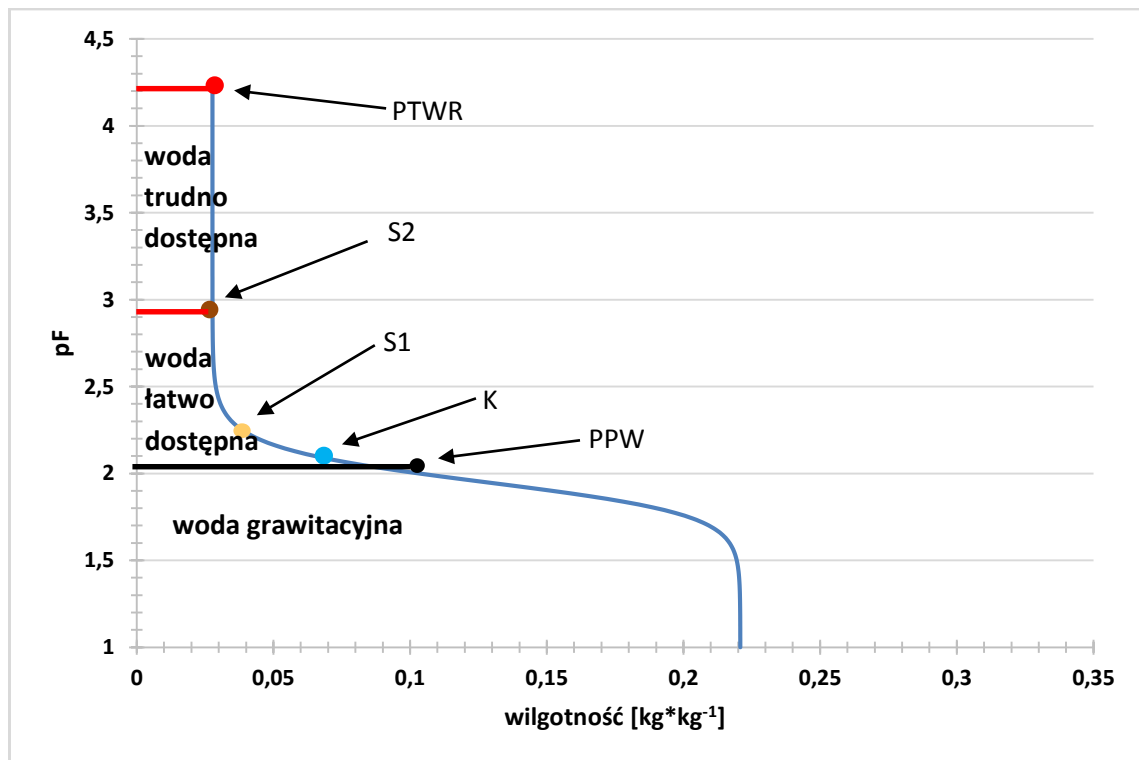
195. Yang J.C., Zhang J.H., 2006. Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist*. 169:223–236.
196. Yang X., Chen X., Ge Q., Li B., Tong Y., Zhang A., Li Z., Kuang T., Lu C., 2006. Tolerance of photosynthesis to photoinhibition, high temperature and drought stress in flag leaves of wheat: a comparison between a hybridization line and its parents grown under field conditions. *Plant Science*, v.171, 389–397.
197. Yang X., Lu M., Wang Y., Wang Y., Liu Z., Chen S., 2021. Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulturae*, 7, 50: 1-36.
198. Yawson D.O., Adu M.O., Armah F.A., 2020. Impacts of climate change and mitigation policies on malt barley supplies and associated virtual water flows in the UK. *Scientific Reports*. 10, 376.
199. Yordanov I., Velikova V., Tsonev T., 2003. Plant responses to drought and stress tolerance. *Bulg. J. Plant Physiol. Special Issue* 187–206.
200. Zalecenia Nawozowe. 1990. Część I. Liczby graniczne dla wyceny zawartości w glebach makro i mikroelementów. IUNG, Puławy, Seria P (44): 1-26.
201. Zare M., Azizi M.H., Bazrafshan F., 2011. Effect of drought stress on some agronomic traits in ten barley (*Hordeum vulgare*) cultivars. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(3): 57-62.
202. Ziernicka-Wojtaszek A., 2009. Weryfikacja rolniczo-klimatycznych regionalizacji Polski w świetle współczesnych zmian klimatu. *Acta Agrophysica*, 13(3) s. 803–812.
203. Zlatev Z.S., Yordanov I.T. 2005. Effects of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 30, 3 - 18.
204. Zscheischler J., Estler M., Staudacher W., Gross F., Burgstaller G., Dtreyl H., Rechmann Th. 1990. *Handbuch Mais*. DLG-Verlag Frankfurt (Main), 320 ss.
205. Żarski J., Dudek S., 2005. Wpływ deszczowania na plonowanie jęczmienia browarnego. *Zeszyty problemowe postępów nauk rolniczych*, 506: 575-582.
206. Żarski J., Dudek S., Kuśmierk-Tomaszewska R., 2009. Wpływ deszczowanie i nawożenia azotem na plonowanie jęczmienia browarnego na glebie lekkiej. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 3: 69-78.
207. Żarski J., Dudek S., Kuśmierk-Tomaszewska R., Błażewicz J., Zembold-Guła A., 2013. Ocena wpływu deszczowania i nawożenia azotem na wysokość i jakość plonu dwóch odmian jęczmienia browarnego. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2/1: 77-92.
208. Żarski J., Błażewicz J., Dudek S., Kuśmierk-Tomaszewska R., Geldarska A., 2015. Ocena efektywności deszczowania jęczmienia jarego w aspekcie poprawy przydatności słodowniczej ziarna. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, III/1: 593-602.

209. Żyłowska K., Kozyra J., 2022. Zmiany warunków agroklimatycznych w Polsce. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy, 67(21): 9-23.

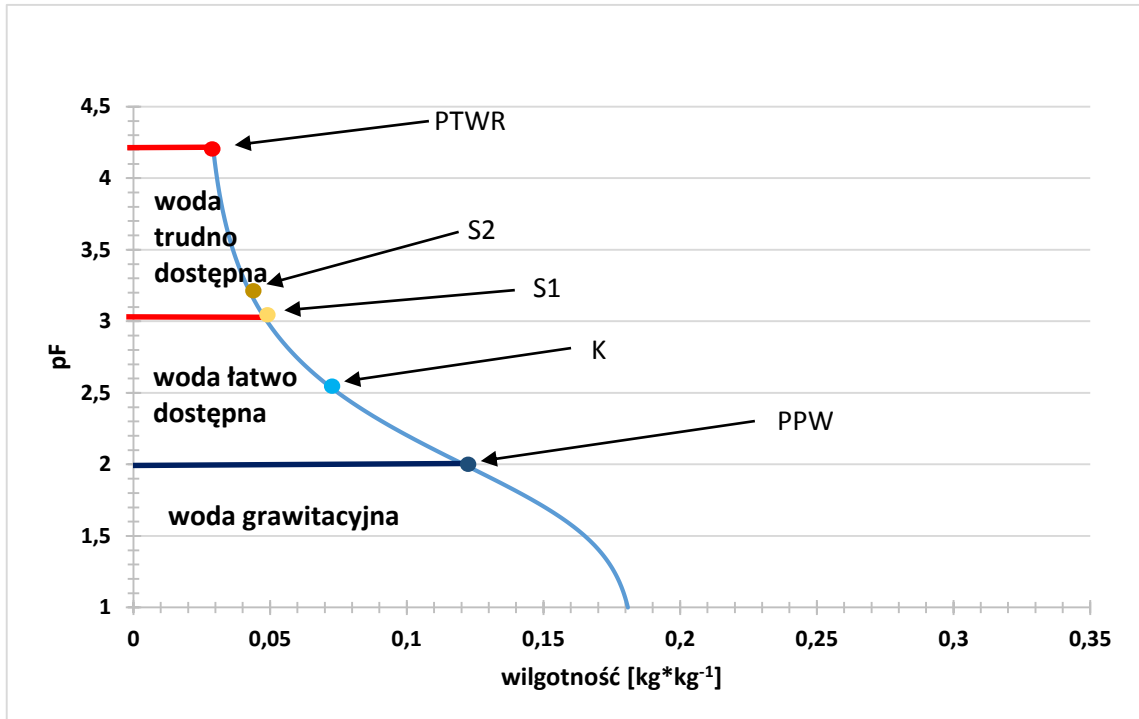
9. ANEKSY



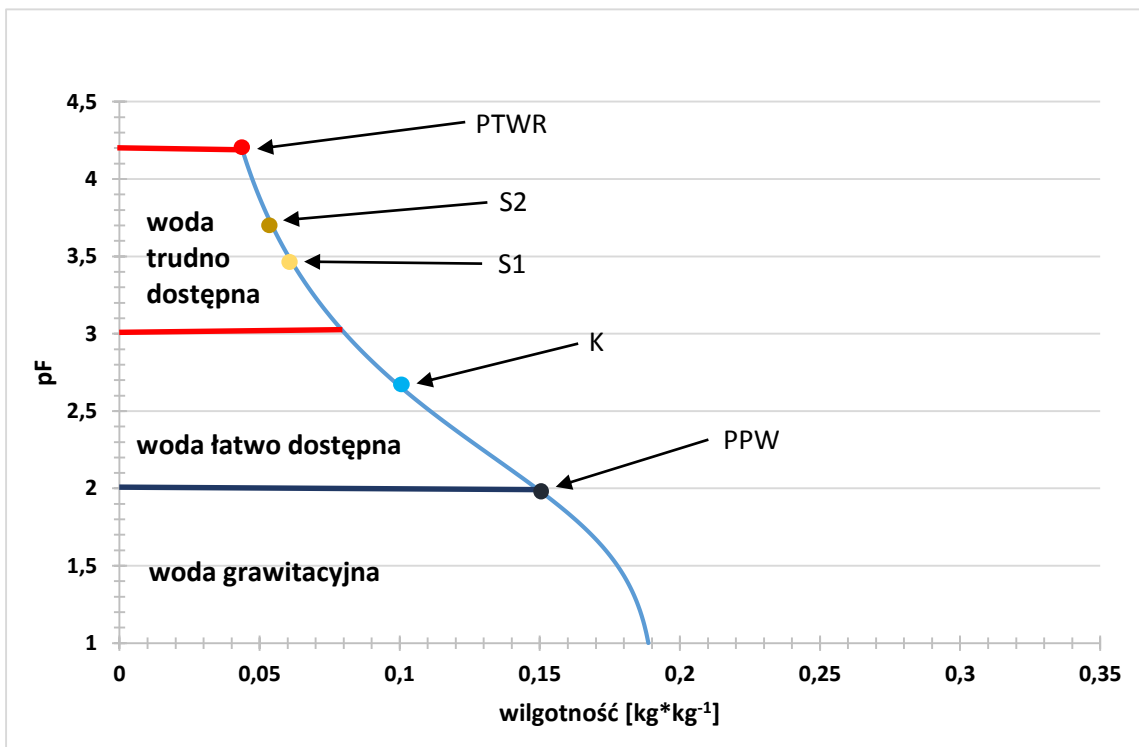
Rys. A1. Krzywa retencji wody dla piasku luźnego



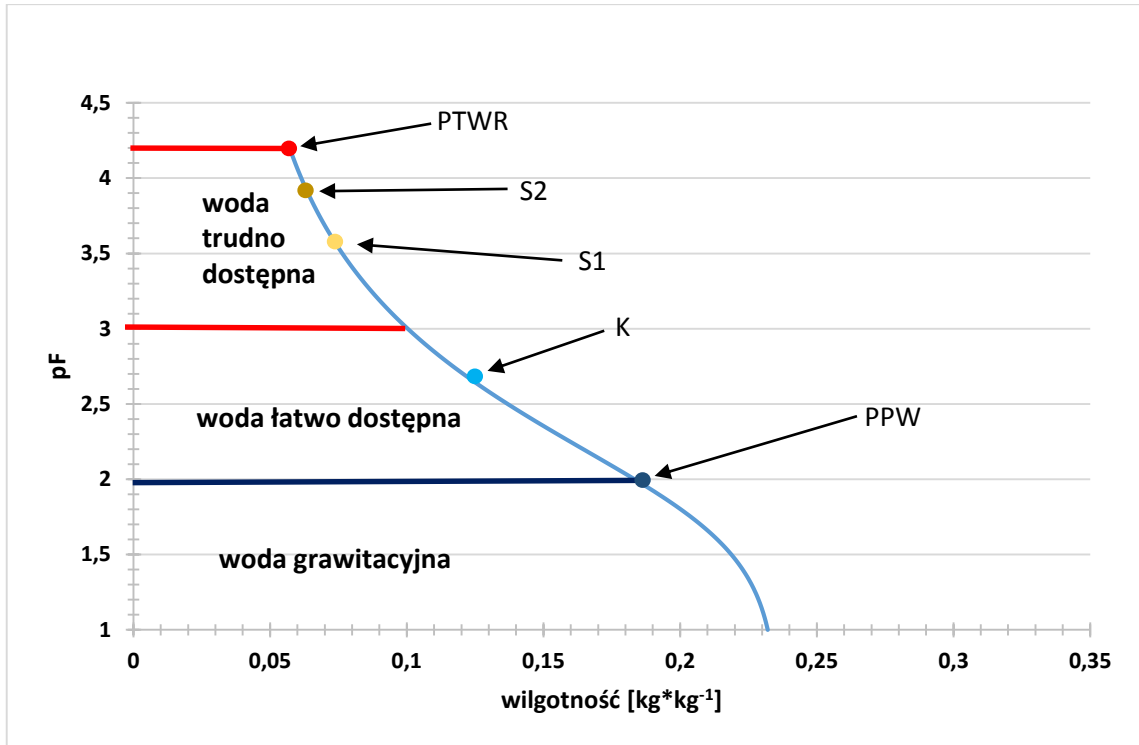
Rys. A2. Krzywa retencji wody dla piasku słabogliniastego



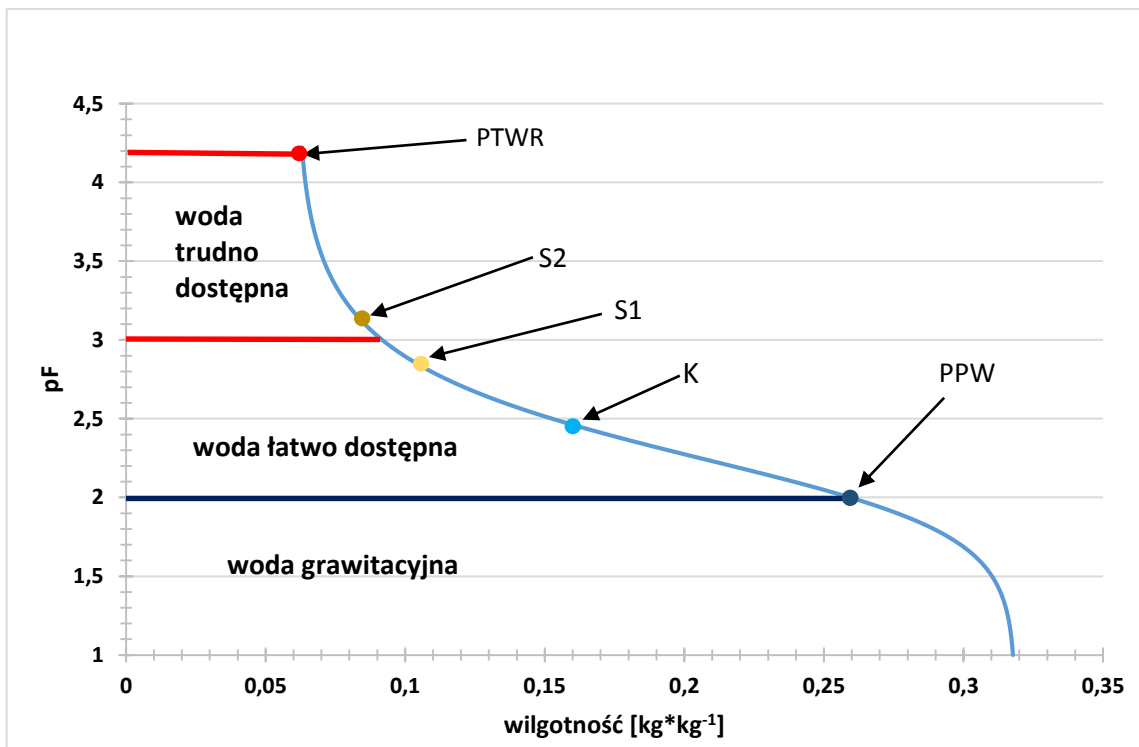
Rys. A3. Krzywa retencji wody dla piasku gliniastego lekkiego



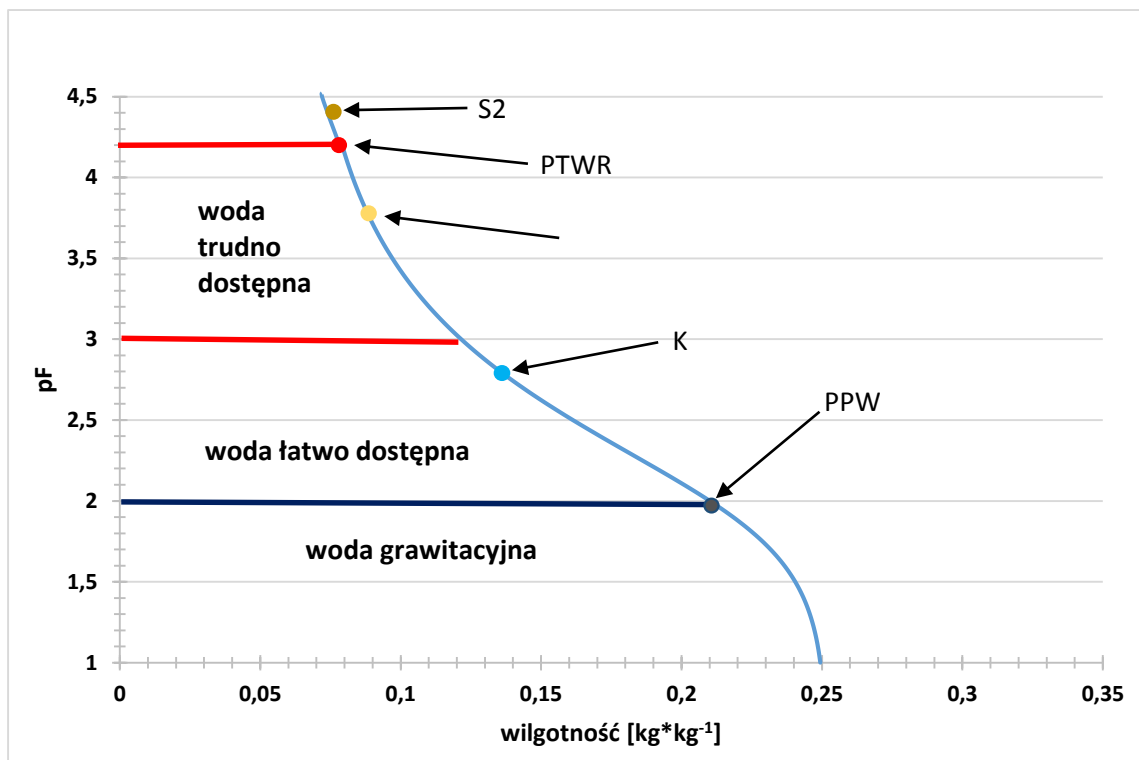
Rys. A4. Krzywa retencji wody dla piasku gliniastego mocnego



Rys. A5. Krzywa retencji wody dla gliny piaszczystej pylastej



Rys. A6. Krzywa retencji wody dla pyłu gliniastego (lessu)



Rys. A7. Krzywa retencji wody dla gliny średniej

9. STRESZCZENIE

Słowa kluczowe: jęczmień jary, stres suszy, gatunek gleby, fotosynteza, transpiracja, przewodnictwo szparkowe, indeks zieloności liścia (SPAD), plon, azot

Susza jest jednym ze stresów abiotycznych, który stanowi ogromne zagrożenie dla bezpieczeństwa światowej gospodarki. Prognozy klimatyczne na przyszłe lata wskazują, że problem niedoboru opadów będzie się pogłębiał, co skutkować będzie znacznym zmniejszeniem plonów roślin uprawnych.

Jęczmień jest zbożem o dużym znaczeniu gospodarczym, dominującym w strukturze zasiewów zbóż jarych w Polsce. Jęczmień jary jest wrażliwy na stres suszy, nawet jeśli jest on przejściowy, a jego plon w największym stopniu ogranicza niedobór wody w fazie strzelania w źdźbło i kłoszenia oraz wykształcanie i nalewanie ziarna.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu krótkotrwałych stresów suszy na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych oraz plon i elementy plonu jęczmienia jarego, ocena wpływu gatunku gleby na wartości wskaźników fizjologicznych i plonowanie jęczmienia jarego w warunkach stresu suszy oraz określenie wpływu stresów suszy i gatunku gleby na zawartość azotu w ziarnie i słomie jęczmienia oraz pobranie składnika przez ziarno i część nadziemną roślin.

Eksperyment wazonowy przeprowadzono w latach 2017-2019 w hali wegetacyjnej RZD IUNG-PIB w Grabowie. Podstawową jednostką badawczą był wazon wypełniony 9 kg gleby pobranej z warstwy ornej (0-25 cm) pól uprawnych. Trzyczynnikowe doświadczenie założono w układzie kompletnie zrandomizowanym w 5 powtórzeniach z 10 roślinami jęczmienia jarego odm. Rubaszek w wazonie. Pierwszym czynnikiem była wilgotność podłoża utrzymywana w 4 wariantach: kontrola, trzy obiekty stresowe: stres wczesny S1 wprowadzany w fazie strzelania w źdźbło (BBCH 31), stres późny S2 w końcu fazy kwitnienia (BBCH 69) oraz sumaryczny stres wczesny i stres późny. Drugim czynnikiem był gatunek gleby. W eksperymencie zastosowano 7 gatunków gleb: piasek luźny (pl), piasek słabogliniasty (ps), piasek gliniasty lekki (pgl), piasek gliniasty mocny (pgm), glina piaszczysta pylasta (gpp), pył gliniasty - less (płg-less) oraz glinę średnią (9gs). Trzecim czynnikiem był termin wykonywania pomiarów wskaźników fizjologicznych: przed wprowadzeniem stresu S1, po zakończeniu stresu S1

9. Streszczenie

i po zakończeniu stresu S2. W każdym z terminów pomiarów określano przyżyciowo metodami instrumentalnymi wskaźniki, wymiany gazowej (LI-6400 Portable Photosynthesis System) oraz zawartość chlorofilu mierzonego w jednostkach SPAD (Hydro-N-tester). Po zbiorze określano plon i elementy plonu oraz oznaczano zawartość azotu w ziarnie i słomie jęczmienia (Elementarney Analizator Vario Macro Cube) oraz pobranie składnika przez ziarno i rośliny.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- stres suszy wpływa na redukcję plonu ziarna z wazonu, liczby kłosów z wazonu, liczby ziaren z wazonu, masy tysiąca ziaren, plonu słomy z wazonu, długości pędów głównych, plonu części nadziemnej z wazonu, jak również wartości wskaźnika zbioru Harvest Index,
- stres suszy powoduje zmniejszenie wartości intensywności fotosyntezy, przewodnictwa szparkowego, intensywności transpiracji i wskaźnika zieloności liści (SPAD),
- ustąpienie stresów powoduje stymulację roślin i wzrost wartości wskaźników w porównaniu do kontroli,
- stres suszy wpływa na zawartość i pobranie azotu przez rośliny jęczmienia,
- gatunek gleby powoduje istotne zmiany w wartości wskaźników wymiany gazowej i wskaźnika zieloności liści (SPAD),
- gatunek gleby istotnie wpływa na zawartość azotu w ziarnie oraz słomie jęczmienia, a także na pobranie pierwiastka przez ziarno i całą nadziemną część roślin.

10. ABSTRACT

Keywords: spring barley, drought stress, soil texture, photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, leaf greenness index (SPAD), yield, nitrogen

Drought is one of the abiotic stresses that pose a massive threat to the security of the global economy. Climate projections for future years indicate that the problem of rainfall deficiency will worsen, resulting in a significant reduction in crop yields.

Spring barley is an economically important cereal crop, dominating the sowing structure of spring cereals in Poland. However is sensitive to drought stress, even if a temporary one. Yield of spring barley is mostly limited by water deficiency at the stage of stem elongation and heading, as well as grain formation and grain filling.

This study aimed to determine the effect of short-term drought stress on the values of selected physiological indices and yield and yield components of spring barley, the effect of soil texture on the values of physiological indices, yield, nitrogen content and uptake of spring barley and determination of the effects of both drought stress and soil texture on the nitrogen content of barley grain and straw and nitrogen uptake by grain and aboveground parts.

The pot experiment was conducted in 2017-2019 years at the plant growth facility (greenhouse) of the RZD IUNG-PIB in Grabów, Poland. The basic test unit was the pot filled with 9 kg of soil taken from the arable layer (0-25 cm) of cultivated fields. A three-factor experiment was set up in complete randomization design, with 5 repetitions and 10 plants of spring barley cv. Rubaszek per pot. The first factor was soil moisture at 4 levels: control, two stress treatments, introduced at the stem elongation stage (BBCH 31) and at the end of the flowering stage were visible (BBCH 69), and finally, the sum of early stress and late stress. The second factor was soil texture. Seven soil texture types were used in the experiment: loose sand, slightly loamy sand, loamy light sand, loamy silty light sand, sandy silty loam, loamy silt – loess and medium loam. The third factor was the time of the measurements of the physiological indicators: before the introduction of stress S1, after stress S1 and after stress S2. At each measurement date, gas exchange (LI-6400 Portable Photosynthesis System) and chlorophyll content measured in SPAD units (Hydro-N-tester) were determined. After harvest, yield and

10. Abstract

yield components were determined and the nitrogen content of barley grain and straw was analyzed (Elementary Analyser Vario Macro Cube).

The results of the study showed that:

- drought stress reduced: grain yield per pot, number of ears per pot, number of grains per pot, thousand grain weight, straw yield per pot, main shoot length, the yield of aboveground part per pot, as well as Harvest Index values,
- drought stress causes a reduction in the values of photosynthesis intensity, stomatal conductance, transpiration intensity and leaf greenness index (SPAD),
- the cessation of the stress causes stimulation of the plants and an increase in the values of the indices compared to the control,
- soil texture significantly effects the values of gas exchange rates and leaf greenness index (SPAD),
- drought stress affects the nitrogen content of barley grain and straw,
- soil type significantly influenced the nitrogen content of barley grain and straw, as well as the uptake of the element by grain and the whole aboveground part of plants.

11. SPIS RYSUNKÓW, FOTOGRAFII I TABEL

11.1 SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Klimatyczny bilans wodny w Polsce od kwietnia do września. Źródło: (Górski i Zaliwski 2002); opracowanie mapy: Jerzy Kozyra.....	8
Rys. 2. Charakterystyka retencji wodnej gleb w warstwie 0 - 20 cm, wykreślona jako logarytm dziesiąty wartości ciśnień ssących gleb (h) (hPa) w funkcji zawartości wody (kg·kg ⁻¹ gleby) (Czyż i in. 2003).....	11
Rys. 3. Mapa kategorii podatności gleb na suszę rolniczą Źródło: (Jadczyzyn i Bartosiewicz 2020); opracowanie mapy: Jan Jadczyzyn	13
Rys. 4. Schemat terminów wykonywania pomiarów wskaźników fizjologicznych.....	24
Rys. 5. Temperatury powietrza w hali wegetacyjnej w okresie wegetacji, w latach prowadzenia badań; – S1 i S2 oznaczają stresy suszy	31
Rys. 6. Wpływ stresów suszy na plon ziarna z wazonu w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie).....	37
Rys. 7. Wpływ stresów suszy na liczbę kłosów jęczmienia z wazonu w latach 2017 – 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie)	39
Rys. 8. Wpływ stresu suszy na liczbę ziaren z wazonu w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie).....	41
Rys. 9. Wpływ stresów suszy na MTZ jęczmienia w latach 2017 – 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie).....	43
Rys. 10. Wpływ stresów suszy na długość pędów głównych w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie).....	47
Rys. 11. Wpływ stresów suszy na wskaźnik zbioru HI w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie).....	51
Rys. 12. Wpływ terminu pomiaru na tempo fotosyntezy netto (Photo, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) jęczmienia zależnie od stresu suszy w roku 2017(K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie).....	55

Rys. 13. Wpływ terminu pomiaru na tempo fotosyntezy netto (Photo, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) jęczmienia zależnie od stresu suszy w roku 2018 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie).....	56
Rys. 14. Wpływ terminu pomiaru na tempo fotosyntezy netto (Photo, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) jęczmienia zależnie od stresu suszy w roku 2019 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie).....	57
Rys. 15. Wpływ terminu pomiaru na przewodnictwo szparkowe (Cond, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2017(K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie)	60
Rys. 16. Wpływ terminu pomiaru na przewodnictwo szparkowe (Cond, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2018 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie)	61
Rys. 17. Wpływ terminu pomiaru na przewodnictwo szparkowe (Cond, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2019 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie)	62
Rys. 18. Wpływ terminu pomiaru na intensywność transpiracji (Trmmol, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2017 (K - kontrola, S1 - stres wczesny, S2 - stres późny, S1 + S2 - oba stesy łącznie)	65
Rys. 19. Wpływ terminu pomiaru na intensywność transpiracji (Trmmol, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2018 (K - kontrola, S1 stres suszy, S2 stres późny, S1 + S2 oba stesy łącznie).....	66
Rys. 20. Wpływ terminu pomiaru na intensywność transpiracji (Trmmol, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2019 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie).....	67
Rys. 21. Wpływ terminu pomiaru na indeks zieloności liścia SPAD jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2017 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie)	71
Rys. 22. Wpływ terminu pomiaru na indeks zieloności liścia SPAD jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2018 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie)	72
Rys. 23. Wpływ terminu pomiaru na indeks zieloności liścia SPAD jęczmienia jarego zależnie od stresu suszy w roku 2019 (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie)	73
Rys. 24. Wpływ stresów suszy na zawartość azotu w słomie jęczmienia w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stesy łącznie)	77

Rys. 25. Wpływ stresu suszy na pobranie azotu (N) przez część nadziemną roślin jęczmienia w latach 2017 - 2019 zależnie od gatunku gleby (K – kontrola, S1 – stres wczesny, S2 – stres późny, S1 + S2 – oba stresy łącznie).....	80
Rys. A1. Krzywa retencji wody dla piasku luźnego	113
Rys. A2. Krzywa retencji wody dla piasku słabogliniastego.....	113
Rys. A3. Krzywa retencji wody dla piasku gliniastego lekkiego	114
Rys. A4. Krzywa retencji wody dla piasku gliniastego mocnego	114
Rys. A5. Krzywa retencji wody dla gliny piaszczystej pylastej	115
Rys. A6. Krzywa retencji wody dla pyłu gliniastego (lessu)	115
Rys. A7. Krzywa retencji wody dla gliny średniej.....	116

11.2. SPIS FOTOGRAFII

Fot. 1. Hala wegetacyjna w RZD IUNG-PB w Grabowie (fotografia własna)	19
Fot. 2. Rośliny jęczmienia po redukcji do 10 szt. w wazonie – widok z góry (fotografia własna).....	23
Fot. 3. Układ sterujący systemem nawadniania oraz zastosowanie nawodnienia w wazonie (fotografia własna).....	25
Fot. 4. LI-6400 Portable Photosynthesis System (LI-COR Inc., USA).....	27
Fot. 5. LI-6400 Portable Photosynthesis System (LI-COR Inc., USA).....	28
Fot. 6. Analizatora elementarny Vario Macro Cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Niemcy).....	29

11.3. SPIS TABEL

Tab. 1. Zróżnicowanie pokrywy glebowej Polski według kategorii podatności gleb na suszę (Dz.U. nr 75, poz. 480, 2010; www.susza.iung.pulawy.pl).....	12
Tab. 2. Częstotliwość występowania suszy rolniczej w Polsce w latach 1961-2010 dla zbóż jarych na glebach I-IV kategorii (Doroszewski i in. 2014).....	13
Tab. 3. Częstotliwość występowania suszy średnio w latach 1961-2010 na glebach kategorii I-IV (Doroszewski i in. 2014)	14
Tab. 4. Zawartość procentowa frakcji granulometrycznych wg BN-78/9180-11	20

Tab. 5. Zawartość procentowa frakcji granulometrycznych wg PTG 2008	20
Tab. 6. Właściwości chemiczne gatunków gleb zastosowanych w doświadczeniu.....	21
Tab. 7. Skład pożywki mineralnej stosowanej w doświadczeniu wazonowym	22
Tab. 8. Charakterystyka retencji wodnej gleb użytych w doświadczeniu, określona na podstawie krzywej pF	25
Tab. 9. Średnia długość okresu wegetacji oraz faz rozwojowych wyrażona w dniach po siewie zależnie od gatunku gleby	33
Tab. 10. Średnie opóźnienie (-) bądź szybsze następowanie (+), określone liczbą dni, pojawianie się faz rozwojowych w wyniku stresu wczesnego (S1), późnego (S2) i obu stresów suszy (S1S2) w stosunku do obiektu kontrolnego	34
Tab. 11. Wyciąg z analizy wariancji plonu ziarna jęczmienia z wazonu.....	35
Tab. 12. Plon ziarna jęczmienia z wazonu (g) w latach prowadzenia eksperymentu zależnie od stresu suszy (K – kontrola; S1 – stres wczesny; S2 – stres późny; S1 + S2 – oba stesy łącznie)	35
Tab. 13. Wyciąg z analizy wariancji liczby kłosów jęczmienia z wazonu	38
Tab. 14. Liczba kłosów jęczmienia z wazonu zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	38
Tab. 15. Wyciąg z analizy wariancji liczby ziaren z wazonu	40
Tab. 16. Liczba ziaren z wazonu w latach prowadzenia eksperymentu zależnie od stresu suszy (K – kontrola; S1 – stres wczesny; S2 – stres późny; S1 + S2 – oba stesy łącznie)	40
Tab. 17. Wyciąg z analizy wariancji masy tysiąca ziaren jęczmienia	42
Tab. 18. Średnia masa tysiąca ziaren jęczmienia (g) zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	42
Tab. 19. Wyciąg z analizy wariancji masy słomy jęczmienia z wazonu.....	43
Tab. 20. Plon słomy jęczmienia z wazonu (g) w latach prowadzenia eksperymentu zależnie od stresu suszy (K – kontrola; S1 – stres wczesny; S2 – stres późny; S1 + S2 – oba stesy łącznie)	44
Tab. 21. Plon słomy jęczmienia z wazonu (g) zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	44
Tab. 22. Wyciąg z analizy wariancji długości pędów głównych roślin jęczmienia.....	45
Tab. 23. Długość pędów głównych jęczmienia w latach prowadzenia eksperymentu zależnie od stresu suszy (K – kontrola; S1 – stres wczesny; S2 – stres późny; S1 + S2 – oba stesy łącznie)	45

Tab. 24. Długość pędów głównych (cm) zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	46
Tab. 25. Wyciąg z analizy wariancji plonu części nadziemnej jęczmienia z wazonu	48
Tab. 26. Plon części nadziemnej jęczmienia z wazonu (g) zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu.....	48
Tab. 27. Wyciąg z analizy wariancji wskaźnika zbioru HI jęczmienia jarego	49
Tab. 28. Wskaźnik zbioru HI w latach prowadzenia eksperymentu zależnie od stresu suszy (K – kontrola; S1 – stres wczesny; S2 – stres późny; S1 + S2 – oba stropy łącznie)	49
Tab. 29. Wskaźnik zbioru jęczmienia jarego zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	50
Tab. 30. Współczynniki korelacji pomiędzy plonem i elementami plonu	52
Tab. 31. Wyciąg z analizy wariancji intensywności fotosyntezy netto w latach prowadzenia eksperymentu	53
Tab. 32. Średnia intensywność fotosyntezy netto ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	54
Tab. 33. Wyciąg z analizy wariancji przewodnictwa szparkowego w latach prowadzenia eksperymentu	58
Tab. 34. Przewodnictwo szparkowe ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	59
Tab. 35. Wyciąg z analizy wariancji intensywności transpiracji w latach prowadzenia eksperymentu	63
Tab. 36. Intensywność transpiracji wody ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu.....	64
Tab. 37. Współczynniki korelacji prostej pomiędzy wskaźnikami wymiany gazowej średnio ze wszystkich lat prowadzenia badań.....	68
Tab. 38. Wyciąg z analizy wariancji indeksu zieloności liścia SPAD w latach prowadzenia eksperymentu	68
Tab. 39. Indeks zieloności liścia SPAD, zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	69
Tab. 40. Wyciąg z analizy wariancji zawartości azotu w suchej masie ziarna jęczmienia	74
Tab. 41. Zawartość azotu (%) w suchej masie ziarna jęczmienia, zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	74

Tab. 42. Wyciąg z analizy wariancji zawartości azotu w suchej masie słomy jęczmienia	75
Tab. 43. Zawartość azotu (%) w suchej masie słomy jęczmienia, zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	75
Tab. 44. Wyciąg z analizy wariancji pobrania azotu przez ziarno jęczmienia.....	78
Tab. 45. Pobranie azotu ($\text{g N} \cdot \text{wazon}^{-1}$) przez ziarno jęczmienia, zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu	78
Tab. 46. Wyciąg z analizy wariancji pobrania azotu przez części nadziemne roślin jęczmienia	79
Tab. 47. Pobranie azotu ($\text{g N} \cdot \text{wazon}^{-1}$) przez części nadziemne roślin jęczmienia, zależnie od gatunku gleby w latach prowadzenia eksperymentu.....	79
Tab. 48. Współczynnik korelacji prostej pomiędzy zawartością azotu w ziarnie jęczmienia i indeksem zieloności liścia (SPAD) średnio ze wszystkich lat prowadzenia badań.....	81

12. OŚWIADCZENIE PROMOTORA, PROMOTORA POMOCNICZEGO I AUTORA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ