

Dziedzina: nauki rolnicze
Dyscyplina: rolnictwo i ogrodnictwo

mgr inż. Krzysztof Michał Lachutta

ROZPRAWA DOKTORSKA

Wpływ różnych strategii siewu oraz nawożenia azotem na plon
i wartość technologiczną ziarna pszenicy ozimej

The effect of different sowing strategies and nitrogen fertilization on the yield and
technological quality of winter wheat grain

Praca doktorska wykonana
w Katedrze Agrotechnologii i Agrobiznesu
Wydziału Rolnictwa i Leśnictwa
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
pod kierunkiem
prof. dr hab. inż. Krzysztofa J. Jankowskiego

Spis treści

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

załącznik nr 2 do Załącznika nr 1 do Uchwały Nr 362 Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie z dnia 27 czerwca 2023 roku wprowadzającej procedurę postępowania w sprawie nadania stopnia doktora

3

Oświadczenie o samodzielnym napisaniu rozprawy doktorskiej

załącznik nr 3 do Załącznika nr 1 do Uchwały Nr 362 Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie z dnia 27 czerwca 2023 roku wprowadzającej procedurę postępowania w sprawie nadania stopnia doktora

4

Wykaz publikacji składających się na pracę doktorską

5

Streszczenie

6

Summary

8

1. Wstęp i cel pracy 10

2. Przegląd literatury 16

2.1. Plonowanie 16

2.2. Wartość technologiczna ziarna 17

3. Materiał i metody badań 20

3.1. Ścisłe doświadczenie polowe 20

3.2. Badania polowe 21

3.3. Warunki pogodowe 21

3.4. Wartość przemiałowa ziarna 21

3.5. Jakość mąki 22

3.6. Właściwości reologiczne ciasta i jakość pieczywa 22

3.7. Analiza statystyczna 23

4. Wyniki badań 24

4.1. Agrometeorologiczne uwarunkowania rozwoju roślin 24

4.2. Obsada oraz stopień rozkrzewienia roślin 25

4.3. Elementy struktury plonu 25

4.4. Plon ziarna i słomy 25

4.5. Wartość przemiałowa ziarna 26

4.6. Jakość kompleksu białkowego oraz aktywność enzymatyczna ziarna 28

4.7. Jakość mąki 29

4.8. Właściwości reologiczne ciasta i jakość pieczywa 30

5. Dyskusja 32

5.1. Elementy struktury plonu 32

5.2. Plon ziarna i słomy 33

5.3. Wartość przemiałowa ziarna 36

5.4. Jakość kompleksu białkowego oraz aktywność enzymatyczna ziarna 39

5.5. Jakość mąki 44

5.6. Właściwości reologiczne ciasta oraz jakość pieczywa 46

6. Wnioski 48

7. Spis literatury 50

Publikacje składające się na pracę doktorską

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

załącznik nr 4 do Załącznika nr 1 do Uchwały Nr 362 Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie z dnia 27 czerwca 2023 roku wprowadzającej procedurę postępowania w sprawie nadania stopnia doktora

Oświadczenie współautora

załącznik nr 5 do Załącznika nr 1 do Uchwały Nr 362 Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie z dnia 27 czerwca 2023 roku wprowadzającej procedurę postępowania w sprawie nadania stopnia doktora

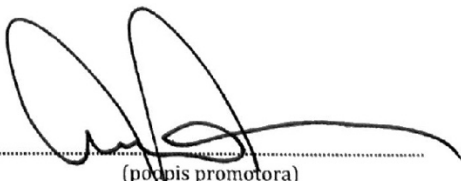
Olsztyn, 21.10.2024 r.
(miejscowość, data)

prof. dr. hab. inż. Krzysztof J. Jankowski
(stopień/tytuł naukowy, imię i nazwisko
promotora/~~promotora pomocniczego~~*)

Prof. dr hab. inż. Agnieszka Pszczółkowska
przewodnicząca Rady Naukowej
dyscypliny rolnictwo i ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie

OŚWIADCZENIE
promotora/~~promotora pomocniczego~~* rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Michała Lachutty pod tytułem **Wpływ różnych strategii siewu oraz nawożenia azotem na plon i wartość technologiczną ziarna pszenicy ozimej** została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.


(podpis promotora)

* niepotrzebne skreślić

Olsztyn, 21.10.2024 r.
(miejscowość, data)

Krzysztof Michał Lachutta
(imię i nazwisko kandydata)

rolnictwo i ogrodnictwo
(dyscyplina naukowa)

Prof. dr hab. inż. Agnieszka Pszczółkowska
przewodnicząca Rady Naukowej
dyscypliny rolnictwo i ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie

OŚWIADCZENIE
o samodzielnym napisaniu rozprawy doktorskiej

Świadomy odpowiedzialności prawnej oświadczam, że rozprawa doktorska pod tytułem **Wpływ różnych strategii siewu oraz nawożenia azotem na plon i wartość technologiczną ziarna pszenicy ozimej** została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona rozprawa nie jest i nie była wcześniej podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora.

Ponadto oświadczam, że treść rozprawy doktorskiej przedstawionej przez mnie do obrony, zawarta na przekazywanym nośniku elektronicznym, jest identyczna z jej wersją drukowaną.

W związku z powyższym oświadczam, że wyrażam zgodę na poddanie rozprawy doktorskiej procedurze antyplagiatowej.


.....
(podpis kandydata)

Wykaz publikacji składających się na pracę doktorską

P1: Lachutta K., Jankowski K.J. 2024. An agronomic efficiency analysis of winter wheat at different sowing strategies and nitrogen fertilizer rates: A case study in northeastern Poland. *Agriculture*, 14, 442. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030442> (IF – 3,3; MNiSW – 100 pkt.)

P2: Lachutta, K.; Jankowski, K.J. 2024. The quality of winter wheat grain by different sowing strategies and nitrogen fertilizer rates: A case study in northeastern Poland. *Agriculture*, 14, 552. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040552> (IF – 3,3; MNiSW – 100 pkt.)

P3: Lachutta K., Jankowski K.J. 2024. Quality of winter wheat flour from different sowing and nitrogen management strategies: A case study in northeastern Poland. *Applied Sciences*, 14, 5167. <https://doi.org/10.3390/app14125167> (IF – 2,5; MNiSW – 100 pkt.)

Streszczenie

W pracy przedstawiono wpływ terminu i gęstości siewu oraz sposobu podziału wiosennej dawki N na plonowanie i wartość technologiczną ziarna pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.) uprawianej w warunkach agroekologicznych północno-wschodniej (NE) Polski w latach 2018–2021. W doświadczeniu uwzględniono trzy zmienne: (i) termin siewu (wczesny: 3–6 września, opóźniony o 14 i 28 dni), (ii) gęstość siewu (200, 300, 400 kiełkujących ziarniaków m^{-2}) oraz (iii) sposób podziału wiosennej dawki N (40+100, 70+70, 100+40 $kg\ ha^{-1}$ aplikowanej w BBCH 22–25 i 30–31). Doświadczenie założono w układzie split-split-plot, w 3 powtórzeniach. Powierzchnia poletka do zbioru wynosiła 15 m^2 (10 m $\times$ 1,5 m). Przedplonem był rzepak ozimy (*Brassica napus* L.).

W warunkach agroekologicznych NE Polski najwyższe plony ziarna pszenicy ozimej uzyskano przy siewie pomiędzy 17 września a 4 października (10,52–10,58 $Mg\ ha^{-1}$). Wzrost plonowania pszenicy ozimej w warunkach opóźnionych siewów był efektem zwiększonej liczby kłosów m^{-2} oraz dorodniejszego ziarna. Gęstszy siew (400 ziaren m^{-2}) był korzystniejszy dla plonowania pszenicy ozimej niż siew rzadki (200 ziaren m^{-2}) (10,25 vs. 10,02 $Mg\ ha^{-1}$). Wzrost plonowania pszenicy ozimej wysianej w zagęszczeniu 400 ziaren m^{-2} był efektem korzystnego wpływu tej gęstości siewu na liczbę kłosów m^{-2} . Najkorzystniejszym dla plonowania pszenicy było zastosowanie 100 $kg\ N\ ha^{-1}$ w stadium BBCH 22–25 i 40 $kg\ N\ ha^{-1}$ w stadium BBCH 30–31 (korzystne oddziaływanie tego sposobu podziału wiosennej dawki N na liczbę kłosów m^{-2}). Z kolei plon słomy był najwyższy (6,23 $Mg\ ha^{-1}$) w warunkach przesunięcia części dawki N do stadium BBCH 30–31 (40+100 $kg\ N\ ha^{-1}$). Plon słomy istotnie obniżał się (o 6%) w warunkach późnych siewów (początek października). Opóźnienie terminu siewu do połowy września lub początku października korzystnie wpłynęło na indeks żniwny pszenicy ozimej (wzrost o 5 lub 7%). Podział wiosennej dawki N pomimo wpływu na plon ziarna i słomy nie różnicował wartości indeksu żniwnego.

Opóźnienie terminu siewu o 14–28 dni spowodowało wzrost gęstości ziarna o 1–1,5 punktu procentowego (%p), szklistości ziarna o 3–6%p oraz zawartości białka ogólnego w ziarnie o 1–2%. Opóźnienie siewów pszenicy ozimej o 14 dni spowodowało wzrost twardości ziarna o 5%, wyciągu mąki o 1,4%p, liczby opadania o 3% oraz spadek wyrównania ziarna o 1,9%p. Z kolei opóźnienie terminu siewu o 28 dni korzystnie wpłynęło na zawartość glutenu mokrego w ziarnie (+0,5–0,6%p) oraz na jakość kompleksu białkowego mierzonego wskaźnikiem sedymentacji Zeleny’ego (+1,5%). Wzrost gęstości siewu z 200 do 300 ziaren m^{-2} spowodował spadek wyrównania ziarna o 2,6%p oraz zawartości białka ogólnego o 1,5% i glutenu mokrego o 0,7%p. Dalszy wzrost gęstości siewu zmniejszył szklistości ziarna o 1,4%p. Największą twardością (64,7), szklistością (93%), wyciągiem mąki (73,9%), zawartością białka ogólnego (134 $g\ kg^{-1}$ s.m.), glutenu mokrego (36%) oraz wartością wskaźnika sedymentacji Zeleny’ego (69 ml) charakteryzowało się ziarno pszenicy ozimej nawożonej w dawce 40+100 $kg\ N\ ha^{-1}$, w stadiach BBCH 22–25 + 30–31.

Opóźnienie terminu siewu o 28 dni spowodowało wzrost zawartości białka ogólnego w mące (o 2%), wzrost jej wodochłonności (o 1,1%p) oraz korzystnie wpłynęło na rozwój i stałość ciasta

(wydłużenie czasu, odpowiednio o: 6 i 14–33%) oraz jego rozmiękczenie (zmniejszenie współczynnika tolerancji na miesienie o 12–21%). Opóźnienie terminu siewu o 14–28 dni spowodowało zmniejszenie gęstości miękiszu chleba o 4%, nie różnicując jego objętości. Wysiew pszenicy ozimej w zagęszczeniu 400 ziaren m^{-2} korzystnie wpłynął na barwę mąki (wzrost bieli mąki o 2–3%p), stałość ciasta (wydłużenie czasu o 8–11%) oraz objętość chleba (wzrost o 1,5%). Korzystniejsze parametry barwy mąki (78,1% wzorca bieli) oraz stałości ciasta (7,7 min) uzyskano przy zastosowaniu 100+40 kg N ha^{-1} w stadiach BBCH 22–25 i 30–31. Z kolei największą zawartość białka ogólnego w mące (132 g kg^{-1} s.m.) uzyskano po zastosowaniu 40+100 kg N ha^{-1} . Jakość mąki poprawiła się, gdy pszenica ozima była wysiewana w gęstości 400 ziaren m^{-2} , w opóźnionym o 14 lub 28 dni terminie oraz nawożona wiosną w dawce 100 kg N ha^{-1} w fazie pełnego krzewienia i 40 kg N ha^{-1} w fazie pierwszego kolanka.

Słowa kluczowe: *Triticum aestivum* L., termin i gęstość siewu, podział wiosennej dawki azotu, plonowanie, wartość przemiałowa i wypiekowa

Summary

This study was undertaken to examine the influence of the sowing date, sowing density, and split spring application of N fertilizer on the grain yield and technological quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in north-eastern (NE) Poland between 2018 and 2021. The experiment involved three factors: (i) sowing date (early: 3–6 September, delayed by 14 days, and delayed by 28 days), (ii) sowing density (200, 300, and 400 live grains m^{-2}), and (iii) split application of N fertilizer in spring (40+100, 70+70, and 100+40 kg ha^{-1} in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively). The experiment had a split-split-plot design (sowing date was assigned to whole plot treatments, sowing density was assigned to subplot treatments, and the split spring application of N fertilizer was assigned to sub-subplot treatments) with three replications. Plot size was 15 m^2 (10 m by 1.5 m). The preceding crop was winter oilseed rape (*Brassica napus* L.).

In NE Poland, grain yields peaked when winter wheat was sown between 17 September and 4 October (10.52–10.58 Mg ha^{-1}). In late-sown winter wheat, grain yields increased due to a higher number of spikes m^{-2} and higher grain weight. The highest sowing density (400 live grains m^{-2}) induced a greater increase in grain yields than the lowest sowing density (200 live grains m^{-2}) (10.25 vs. 10.02 Mg ha^{-1}). In winter wheat sown at a density of 400 live grains m^{-2} , the increase in grain yields resulted in a higher number of spikes m^{-2} . Grain yields peaked in response to 100 kg N ha^{-1} applied in BBCH stages 22–25 and 40 kg N ha^{-1} applied in BBCH stages 30–31 (this split N rate increased the number of spikes m^{-2}). In turn, the highest straw yield (6.23 Mg ha^{-1}) was obtained when the second split of N fertilizer was applied in BBCH stages 30–31 (40 + 100 kg N ha^{-1}). Straw yields decreased significantly (by 6%) when winter wheat was sown late (early October). Delayed sowing (mid-September and early October) increased the harvest index (HI) of winter wheat by 5–7%. Split spring N application influenced grain and straw yields, but it had no effect on the HI of winter wheat.

A sowing delay of 14–28 days increased grain bulk density by 1–1.5 percent points (%p), vitreousness by 3–6%p, and the total protein content of grain by 1–2%. A sowing delay of 14 days increased grain hardness (by 5%), the flour extraction rate (by 1.4%p), and the falling number (by 3%) while decreasing grain uniformity (by 1.9%p). In turn, a sowing delay of 28 days increased the wet gluten content of grain (+0.5–0.6%p) and improved the quality of the protein complex in the Zeleny sedimentation test (+1.5%). An increase in sowing density from 200 to 300 live grains m^{-2} led to a decrease in grain uniformity (by 2.6%p), the total protein content (by 1.5%), and the wet gluten content of grain (by 0.7%p). A further increase in sowing density decreased grain vitreousness (by 1.4%p). The grain of winter wheat fertilized with 40 and 100 kg N ha^{-1} in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively, was characterized by the highest hardness (64.7), vitreousness (93%), flour extraction rate (73.9%), total protein content (134 g kg^{-1} DM), wet gluten content (36%), and Zeleny sedimentation index (69 mL).

A 28-day delay in sowing increased the total protein content (by 2%) and the water absorption capacity of flour (by 1.1%p), dough development time and stability, and the degree of softening (by 6%)

and 14–33%, respectively). When sowing was delayed by 14 or 28 days, crumb density decreased by 4% without affecting loaf volume. A sowing density of 400 grains m^{-2} had a positive impact on flour color (flour whiteness increased by 2–3%p), dough stability (increase of 8–11%), and loaf volume (increase of 1.5%). Flour color (78.1% of the whiteness standard) and dough stability (7.7 min) were enhanced when N was applied at 100 + 40 kg ha^{-1} in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively. In turn, the total protein content of flour (132 g kg^{-1} DM) peaked when it was applied at 40 + 100 kg N ha^{-1} . The quality of flour improved when winter wheat was sown at a density of 400 live grains m^{-2} with a delay of 14 or 28 days and supplied with 100 kg N ha^{-1} in the full tillering stage and 40 kg N ha^{-1} in the first node stage.

Keywords: *Triticum aestivum* L., sowing date and density, split nitrogen application, milling quality, baking value.

1. Wstęp i cel pracy

W krajach Unii Europejskiej (UE) udział rolnictwa w tworzeniu produktu krajowego brutto jest niewielki (ok. 1–2%) [Domagała, 2021; Eurostat, 2023]. Jednak rolą rolnictwa nie jest stymulowanie wzrostu gospodarczego kraju/regionu, ale zapewnienie jego mieszkańcom bezpieczeństwa żywnościowego i coraz częściej również bezpieczeństwa energetycznego [Sunderji i in., 2020; Baldock i Buckwell, 2021; Bielski i in., 2021; Domagała, 2021]. Doświadczenia ostatnich kilku lat utwierdzają nas w przekonaniu, że żywność strategiczna powinna pochodzić z własnej, krajowej produkcji. W przeciwnym wypadku jakiejkolwiek zakłócenia w łańcuchu dostaw (pandemia, konflikty społeczne, gospodarcze, militarne etc.) mogą ograniczyć fizyczny i ekonomiczny dostęp do żywności i zagrozić biologicznej egzystencji narodu [Behnassi i Haiba, 2022; Mottaleb i in., 2022; Alabi i Ngwenyama, 2023].

W zaspakajaniu potrzeb żywnościowych świata szczególną pozycję zajmują zboża. Ich udział w strukturze diety (mierzony ekwiwalentem energetycznym) waha się od 30 do 80% [Alexandratos i Bruinsma 2012]. W skali świata zbożami obsiewa się ok. 51% całkowitej powierzchni gruntów ornych [Faostat, 2023]. Jednym z najbardziej rozpowszechnianych zbóż na świecie jest pszenica [Budzyński i in., 2018; Zubko i in., 2022; Faostat, 2023; Mitura i in., 2023]. Jej ziarno stanowi główny składnik pożywienia dla 36% światowej populacji ludzi [Breiman i Graur, 1995; Braun i in., 2010; Riaz i in., 2021; Khalid i in., 2023]. Zaliczana jest ona, obok ryżu i kukurydzy, do tzw. „wielkiej trójki” zbóż [Budzyński i in., 2018]. W 2021 roku światowe zbiory kukurydzy, ryżu i pszenicy wyniosły, odpowiednio: 1210, 778, i 771 mln Mg, co stanowiło aż 90% światowych zbiorów ziarna zbóż [Faostat, 2023]. Pszenica ma jednak przewagę nad pozostałymi zbożami strategicznymi ze względu na bardzo dużą plastycznością środowiskową [Shewry, 2009; Braun i in., 2010; Budzyński, 2012; Zubko i in., 2022]. Jest uprawiana od 67° N w Skandynawii i Rosji do 45° S w Argentynie, włączając w to wyniesione regiony w tropikach i subtropikach [Shewry, 2009]. Uprawiana jest ona na łącznym areale 216–221 mln ha (2019–2021), co stanowi ok. 16% udziału w światowej strukturze zasiewów [Faostat, 2023]. Obecnie 95% pszenicy uprawianej na całym świecie to heksaploidalna pszenica zwyczajna (*Triticum aestivum* L.), a większość pozostałych 5% to tetraploidalna pszenica twarda (*T. durum* Desf.) [Shewry, 2009].

Obecny przyrost światowych zbiorów zbóż pokrywa wyłącznie potrzeby zwiększającej się populacji ludzi. Nie wpływa on znacząco na wolumen produkcji *per capita*, który od wielu lat utrzymuje się na poziomie ok. 380 kg [Faostat, 2023]. Zgodnie z przewidywaniami wzrostu populacji ludzi do 9,7 miliarda w 2050 roku znaczenie pszenicy, jako gatunku strategicznego dla światowego bezpieczeństwa żywnościowego, będzie wzrastało [United States Census Bureau, 2016; Guttieri i in., 2017; United Nations, 2019]. Przewiduje się, że światowy popyt na żywność w przeliczeniu na zboża pod względem wartości odżywczych (*cereal equivalent food*) wzrośnie o 10% do 2030 r. i o 62% do 2050 r. w efekcie nasilenia presji społecznej, ekonomicznej i demograficznej [Islam i Karim, 2019]. Oczekiwany wzrost podaży ziarna pszenicy jest realny do osiągnięcia głównie poprzez poprawę plonowania [Neumann i in., 2010; Buczek i in., 2016; Jańczak-Pieniążek i in., 2022]. Ekspansja na nowe grunty jest mało prawdopodobna ze względu na negatywne skutki nie tylko środowiskowe, ale również społeczne

(zmniejszenie ilości małych gospodarstw rolnych, wypieranie ludności lokalnej, zmniejszenie dostępności gruntów do celów nie rolniczych) [Foley i in., 2011; Meyfroidt i in., 2014]. Wydaje się, że wzrost plonów ziarna pszenicy będzie możliwy głównie dzięki wprowadzeniu do uprawy nowych, wydajnych odmian oraz doskonaleniu technologii uprawy w kierunku zwiększenia efektywności agronomicznej nawożenia N (NUE - *Nitrogen Use Efficiency*) [Guttieri i in., 2017; Ren i in., 2023]. Genotypy pszenicy, które efektywniej będą wykorzystywać N mogą znacząco przyczynić się do zrównoważonego zaspokojenia rosnącego globalnego popytu na ziarno [Guttieri i in., 2017]. W związku z tym konieczne jest osiągnięcie równowagi między ilością dostarczanego N, a efektywnością jego wykorzystania w celu promowania zrównoważonego rozwoju globalnej produkcji roślinnej oraz ograniczania skutków zmian klimatycznych [Shah i in., 2017b; Cui i in., 2018]. Globalne zmiany klimatyczne są powodem podjęcia badań nad ponownym zdefiniowaniem wymagań agrotechnicznych pszenicy, w tym przyrodniczo-optimalnych terminów jej siewu [Wilcox i Makowski, 2014; Pakrooh i Kamal, 2023; Farooq i in., 2023; Zahra i in., 2023; Nóia Júnior i in., 2023].

Celem współczesnej hodowli roślin i stosowanych technologii uprawy pszenicy jest nie tylko zwiększanie produkcji ziarna, ale także poprawa jego wartości technologicznej [Jaskulska i in., 2018; Jarecki i Czernicka, 2022; Jarecki, 2023]. Uprawa pszenicy zwyczajnej ukierunkowana na cele konsumpcyjne, powinna być prowadzona w taki sposób, aby uzyskać wysoki plon ziarna o wysokiej wartości technologicznej [Guerrini i in., 2020; Dilmurodovich i in., 2022]. Wyróżnikami oceny wartości technologicznej surowca jest zespół parametrów charakteryzujący jakość ziarna, który obejmuje ocenę m. in.: (i) właściwości fizycznych ziarna determinujących ich wartość przemiałową [Jankowski i in., 2015; Stępniewska, 2016; Mitura i in., 2023] oraz (ii) kompleksu białkowego i skrobiowo-amyłololitycznego [Szafrńska i Rothkaehl, 2011]. Wartość przemiałowa określa przydatność ziarna do celów młynarskich poprzez ustalenie ich właściwości zapewniających uzyskanie mąki o dużym wyciągu [Jurga, 2006; Guzmán i in., 2016b; Wang i in., 2023]. Bezpośrednią metodą oceny wartości przemiałowej ziarna jest wykonanie tzw. próbnego przemiału laboratoryjnego [Dziki, 2023], a pośrednią - analiza cech fizycznych ziarna (twardość i szklistość ziarna, gęstość usypowa, masa 1000 ziaren i wyrównanie ziarna) [Edwards, 2010; Stępniewska, 2016]. Na podstawie twardości ziarna można ustalić, czy mamy do czynienia z surowcem o bielmie twardym (szklistym) czy miękkim (mączystym) [Hrušková i Švec, 2009; Lafiandra i in., 2022; Ma i in., 2021]. Surowiec mączysty podczas przemiału może utrudniać wydzielanie mąki (zaklejanie sit), dlatego im wyższa twardość tym większy wyciąg mąki [Jurga, 2006, Lafiandra i in., 2022; Mastanjević i in., 2023]. Z barwą bielma związana jest szklistość [Rachoń i in., 2012; Guzmán i in., 2022]. Biała barwa jest charakterystyczna dla ziarna mączystego zawierającego dużo skrobi, a mało białka. Z kolei szara barwa jest typowa dla ziarna szklistego (twardego) zawierającego więcej białka, a mniej skrobi. Szklistość podobnie, jak i twardość dostarczają wielu informacji o strukturze bielma i stopniu wypełnienia ziarna [Zhygunov i in., 2022]. Uwzględniając do tego grubość okrywy owocowo-nasiennej determinującej twardość ziarna otrzymuje się kompleks cech ziarna kształtujących jego masę objętościową, czyli gęstość ziarna [Carson i Edwards, 2009; Edwards,

2010; Rozbicki i in., 2015; Guzmán i in., 2016b; Jańczak-Pieniążek i in., 2020a; Petingco i in., 2022]. Ziarno pszenicy zwyczajnej, żeby osiągnąć wysoki wyciąg mąki powinno się charakteryzować masą objętościową co najmniej na poziomie 72 kg hl⁻¹, a najkorzystniej jest, kiedy wartość tej cechy kształtuje się >76 kg hl⁻¹ [Budzyński, 2012; Rothkaehl, 2012; Dunăreanu i Bonea 2022]. Ważnym elementem oceny przemiałowej ziarna jest jego dobre wyrównanie pod względem grubości (co najmniej 2,5 mm – im wyższe tym lepiej), ponieważ umożliwia zastosowanie optymalnego procesu technologicznego dla uzyskania wysokiej wydajności mąki [Budzyński, 2012; Manda i in., 2022; Mitura i in., 2023].

W procesie przerobu ziarna pszenicy ważna jest jakość uzyskanej mąki – jej wartość wypiekowa [Li i in., 2018; Kumar i in., 2021]. Najważniejszą rolę w kształtowaniu wartości wypiekowej mąki pszennej przypisuje się frakcjom białek zapasowych (gliadyna i glutenina), które pełnią ważną rolę podczas tworzenia ciasta [Wieser i Kieffer, 2001; Zhang i in., 2007; Li i in., 2008; Li i in., 2021]. Gliadyny zapewniają rozciągliwość i lepkość ciasta, podczas gdy gluteniny przyczyniają się do jego elastyczności i wytrzymałości [Wieser, 2007; Dizlek i in., 2022]. W obecności wody i mechanicznego mieszenia następuje łączenie obu frakcji białek, które tworzą lepką i elastyczną masę (gluten). Dzięki właściwości glutenu mąka osiąga określoną wodochłonność, a powstające ciasto pszenne cechuje się odpowiednią elastycznością i sprężystością [Zhang i in., 2022]. Jakość kompleksu białkowego ocenia się m.in. na podstawie wskaźnika sedymentacji oznaczonego metodą SDS lub testem Zeleny’ego [Simón i in., 2020; Lakić-Karalić i in., 2021; Tian i in., 2021]. Metody te polegają na wykorzystaniu różnic w wielkości cząstek gluteniny. Jednym z głównych wyróżników przydatności ziarna do przerobu w przemyśle młynarskim jest ocena ich aktywności enzymatycznej mierzona m.in. liczbą opadania [Szafrńska i Rothkaehl, 2011; Sjöberg i in., 2021]. Gwarancją uzyskania mąki pszennej na cele chlebowe jest przemiał ziarna o liczbie opadania w zakresie 250–350 s. Zbyt niska liczba opadania (<150 s) świadczy o bardzo wysokiej aktywności enzymów amylolitycznych. Z kolei wysoka liczba opadania (>400 s) świadczy o niskiej ich aktywności. W jednym i drugim przypadku uzyskuje się pieczywo złej jakości [Rothkaehl, 2015; Hu i in., 2022].

Podstawą oceny wartości technologicznej ziarna jest również ocena wypiekowa, którą przeprowadza się na podstawie składu chemicznego i właściwości fizykochemicznych mąki [Šramková i in., 2009; Al-Saleh i Brennan 2012; Budzyński 2012; Barak i in., 2015; Podolska i in., 2020]. Do głównych cech określających jakość mąki pszennej zaliczmy barwę oraz zawartość w niej białka ogólnego i popiołu surowego. Barwa mąki odgrywa znaczącą rolę w ocenie jakości mąki pszennej, szczególnie przeznaczonej do wyrobu makaronów i chleba, ponieważ wpływa na akceptację konsumentów i wartość rynkową produktów zbożowych [Zhai i in., 2018]. Barwę mące nadają głównie luteina, ksantofil, β-karoten oraz składniki mineralne (fosfor, potas, magnez, wapń etc.) wchodzące w skład popiołu surowego [Rodrighero i in., 2015; Yildirim i Atasoy, 2020]. Zawartość popiołu surowego w mące w pewnym zakresie decyduje o przydatności mąki do dalszego przerobu [Wei, 2002; Kulkarni i in., 2006; Piironen i in., 2009; Czaja i in., 2020]. Niską zawartością popiołu charakteryzuje się mąka przeznaczona do wyrobów lekkich ciast tortowych, a wyższą - mąka wykorzystana w procesie wyrobu

chleba [Zhygunov i in., 2020]. Barwa mąki świadczy o stopniu rozdrobnienia ziarna i zawartości popiołu w mące (im mniej popiołu tym jaśniejsza barwa mąki). Biała mąka produkowana jest z środkowej części ziarna, tj. z bielma, w którym zawartość popiołu nie przekracza 5 g kg⁻¹ suchej masy (s.m.). Zewnętrzną warstwę ziarna (wokół bielma) tworzy okrywa owocowo-nasienna, która ulega również w pewnym stopniu rozdrobnieniu wraz z bielmem. Zawartość popiołu surowego w okrywie owocowo-nasiennej sięga 60–100 g kg⁻¹ s.m. Stąd im większy stopień rozdrobnienia okrywy i przejście jej do mąki, tym większa zawartość popiołu w mące, a co za tym idzie ciemniejsza barwa mąki [Rothkaehl, 2012]. Zawartość białka jest jednym z głównych czynników klasyfikujących ziarno pszenicy [Li i in., 2008]. Wymagania dotyczące zawartości białka w mące różnią się w zależności od jej przetwórczego wykorzystania. Wyższa zawartość białka jest wymagana w przypadku wypieku chleba, ale nie jest pożądana w przypadku wypieku ciasta lub ciasteczek [Trevisan i in., 2022]. Coraz więcej użytkowników mąki pszennej zaczyna określać jej wymagania wypiekowe w odniesieniu do wskaźników reologicznych ciasta z wykorzystaniem farinografu [Cichoń i Ptak 2005; Simón i in., 2020]. Z wykorzystaniem farinografu można określić: wodochłonność mąki, czas tworzenia i rozwoju ciasta oraz jego rozmięczenie. Wodochłonność mąki definiowana jest jako objętość wody potrzebna do wytworzenia ciasta o maksimum konsystencji [Ellman 2011; Fu i in., 2017]. Mąka o wysokim stopniu absorpcji wody preferowana jest do produkcji ciasta o dużej objętości i wydajności oraz wpływa na cechy produktu końcowego, tj.: lepszy smak, miękka struktura miękiszu i opóźnione czerstwienie [Pühr i D'appolonia, 1992; Fu i in., 2017]. Mąka o niższej wodochłonności wykorzystywana jest do produkcji ciast oraz ciasteczek [Guttieri i in., 2001]. Elastyczne ciasto o niskiej lepkości może absorbować więcej wody podczas miesienia niż ciasto słabe [Fu i in., 2017]. Po określeniu wodochłonności uzyskuje się wykres farinograficzny, na którym zarejestrowane są zmiany konsystencji ciasta w trakcie jego tworzenia i rozwoju oraz wielkość rozmięczenia ciasta podczas procesu miesienia [Simón i in., 2020]. Czas rozwoju ciasta uzależniony jest od stabilności struktury glutenu [Li i in., 2008; Li i in., 2019]. Długi czas rozwoju ciasta jest niepożądany w przemysłowym wypieku chleba, ze względu na wysokie nakłady energii poniesione na proces miesienia ciasta. Z kolei zbyt krótki czas rozwoju ciasta charakteryzuje mąkę o niskiej jakości glutenu [Marchetti i in., 2012; Amjid i in., 2013]. Stałość ciasta to parametr wskazujący na czas, w którym ciasto zachowuje konsystencję. Wysoka wartość wskaźnika stałości ciasta wskazuje na wytrzymałość ciasta i jego tolerancję na miesienie [Marchetti i in., 2012; Li i in., 2019]. Ważną cechą technologiczną dla przemysłu piekarniczego jest stopień rozmięczenia ciast. Wysoka absorpcja wody, w połączeniu z niskim stopniem rozmięczenia świadczy o dobrej jakości mąki. Wysoki stopień rozmięczenia ciasta utrudnia m.in. proces fermentacji ciasta [Menkinoska i in., 2018] i świadczy o złej jakości mąki [Aydoğan i in., 2015]. Jednak pełną informację na temat wartości wypiekowej ziarna pszenicy uzyskuje się po wykonaniu próbnego wypieku laboratoryjnego, dzięki któremu można określić gęstość i objętość miękiszu chleba [Różyło i in., 2011]. Cechy te decydują o jakości i walorach smakowych pieczywa [Dziki i in., 2010; Różyło i Laskowski 2011]. Wysoka gęstość miękiszu oraz mała objętość chleba to cechy, które nie są pożądane przez konsumentów [Sahi i in., 2014].

Jakość technologiczna ziarna pszenicy jest determinowana przede wszystkim odmianą, jej profilem genetycznym [Budzyński, 2012; Buczek i in., 2020; Fu i in., 2022; Lou i in., 2021; Jańczak-Pieniążek i in., 2022] oraz układem warunków klimatycznych w okresie rozwoju generatywnego roślin [Budzyński, 2012; Buczek i in., 2016; Dupont i in., 2006; Erekuł i Köhn, 2006; Jaskulska i in., 2018; Woźniak i Rachoń, 2020; Buczek i in., 2021; Djouadi i in., 2021]. Szczególnie duże znaczenie dla wartości technologicznej ziarna pszenicy ma przebieg pogody w okresie kwitnienia i dojrzewania ziarna. Przesunięcie okresu trwania tych faz rozwojowych na okres wyższych temperatur powietrza i niższych opadów atmosferycznych może sprzyjać uzyskaniu lepszej jakości surowca technologicznego. Jednym ze sposobów pozwalających na modyfikację rozwoju fenofazowego roślin pszenicy ozimej jest termin siewu [Meena i in., 2016]. Strategie zarządzania siewem (termin i gęstość siewu) nabierają obecnie coraz większego znaczenia ze względu na zmiany klimatyczne. Spośród operacji agrotechnicznych najsilniej na wartość technologiczną ziarna pszenicy oddziałuje nawożenie N [Budzyński, 2012; Tomaz i in., 2021]. Istotną rolę odgrywa nie tylko dawka, ale także sposób i termin jej aplikacji [Knapowski i Ralcewicz, 2004; Podolska i in., 2007; Budzyński i Bielski, 2008; Piekarczyk i in., 2010; Ma i in., 2021]. W literaturze brak jest badań dotyczących wpływu sposobu zarządzania N na jakość ziarna pszenicy ozimej uprawianej w zróżnicowanych warunkach siewu. Wobec globalnych zmian klimatycznych, optymalne strategie siewu powinny zostać ponownie określone, aby zapewnić stabilną produkcję ziarna charakteryzującego się wysoką przydatnością do przetwarzania [Meena i in., 2016]. Dotychczas wiele prowadzonych badań skupiało się na ocenie wpływu pojedynczych czynników agrotechnicznych na plon i jakość ziarna pszenicy ozimej. Brakuje badań, które kompleksowo identyfikują najkorzystniejsze strategie siewu i nawożenia N dla optymalizacji plonu oraz wartości technologicznej ziarna pszenicy ozimej. Badania realizowane w ramach pracy doktorskiej mogą przyczynić się do udoskonalenia praktyk zarządzania uprawą pszenicy ozimej w kontekście wydajności i jakości ziarna.

Celem badań było określenie wpływu różnych sposobów podziału wiosennej dawki N (40+100, 70+70, 100+40 kg ha⁻¹) oraz zróżnicowanego terminu (wczesny oraz opóźniony o 14 i 28 dni) i gęstości siewu (200, 300, 400 ziarniaków m⁻²) na:

- elementy struktury plonu pszenicy ozimej (liczba kłosów m⁻², liczba ziarników w kłosie, masa 1000 ziarniaków);
- plonowanie pszenicy ozimej (plon ziarna, plon słomy, index żniwny);
- wartość przemiałową ziarna (gęstość ziarna, szklistość ziarna, wyrównanie ziarna, wyciąg mąki);
- jakość kompleksu białkowego i aktywność enzymatyczną ziarna (zawartość białka ogólnego, zawartość glutenu mokrego, wskaźnik sedymentacji Zeleny'ego, liczba opadania);
- jakość mąki (zawartość popiołu surowego, barwa mąki, zawartość białka ogólnego);
- właściwości reologiczne ciasta (wodochłonność mąki, rozwój ciasta, stałość ciasta, rozmiękczenie ciasta);
- jakość pieczywa (objętość chleba, gęstość miękiszu).

W hipotezach roboczych założono, że: (i) opóźnienie terminu siewu nie spowoduje spadku plonu ziarna pszenicy ozimej ze względu na zmieniające się warunki klimatyczne; (ii) wzrost gęstości siewu zminimalizuje ewentualne negatywne skutki opóźniania terminu siewu, (iii) zwiększenie pierwszej, wczesnowiosennej dawki N korzystnie wpłynie na krzewienie produktywne pszenicy i plon ziarna; (iv) opóźnienie terminu siewu pszenicy ozimej korzystnie wpłynie wartość technologiczną ziarna ze względu na przesunięcie fazy dojrzewania ziarna na korzystniejsze warunki termiczne (wyższe temperatury powietrza); (v) zwiększenie pierwszej, wczesnowiosennej dawki N negatywnie wpłynie na wartość technologiczną ziarna pszenicy ozimej. Analiza wyników badań pozwoli na sformułowanie rekomendacji dotyczących optymalnych praktyk zarządzania uprawą pszenicy ozimej w warunkach agroeologicznych NE Polski przy uwzględnieniu terminu i gęstości siewu oraz nawożenia N w celu osiągnięcia wysokich plonów ziarna o pożądanej wartości technologicznej.

2. Przegląd literatury

2.1. Plonowanie

W skali globalnej, uprawa pszenicy odpowiada za prawie 30% zużycia nawozów N [Economic Research Service, 2019]. Nawożenie tym makroskładnikiem istotnie przyczynia się do wzrostu plonów, jednak nadmierna jego ilość niesie ze sobą liczne negatywne konsekwencje, m. in.: zakwaszenie gleby, emisje gazów cieplarnianych, zanieczyszczenie wód etc. [Cui i in., 2018; Liang i in., 2018; Zhang i in., 2019]. Niewłaściwe zarządzanie N może prowadzić nie tylko do obniżenia plonów pszenicy, lecz także do strat tego składnika związanych z wypłukiwaniem, erozją powierzchniową, ulatnianiem, denitryfikacją etc. [Carvalho i in., 2016; Ladha i in., 2016; Rossini i in., 2018]. Wzrost dawki N prowadzi również do obniżenia NUE [Shah i in., 2017a; Bhattacharya, 2019; Zhang i in., 2019; Bhattarai i in., 2021].

Zawartość N w glebie zazwyczaj wystarcza podczas jesienno-zimowej wegetacji pszenicy ozimej, natomiast jest niewystarczająca podczas intensywnego wzrostu wiosennego [Efretuei i in., 2016]. W europejskich warunkach agroekologicznych w okresie wiosenno-letniej wegetacji pszenicy ozimej N jest najczęściej aplikowany w 3 terminach [Litke i in., 2018; Zörb i in., 2018; Moitzi i in., 2020; Tabak i in., 2020]. Pierwsza dawka N przypada na początek wiosennej wegetacji, co w przypadku plantacji prawidłowo prowadzonych odpowiada fazie pełni krzewienia (BBCH 22–25, Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie [Meier, 2018]) [Wall i Plunkett, 2020]. Na tym etapie dynamicznego wzrostu roślin pszenicy ozimej, dobre ich zaopatrzenie w N przyczynia się do zwiększenia NUE [Limaux i in., 1999]. Pierwsza wiosenna dawka N stymuluje rozwój pędów bocznych i w efekcie liczbę kłosów na jednostce powierzchni. Wielkość dawki N powinna być ściśle powiązana z kondycją łanu po przezimowaniu. Łany dobrze rozkrzewione jesienią, o dobrym przezimowaniu nie powinny być zasilane bardzo dużymi, wczesnymi dawkami N. Nadmierne nawożenie N, w tym okresie, może powodować obumieranie części wytworzonych źdźbeł, a konkurencja między pędami będzie ograniczała rozwój systemu korzeniowego [Grzebisz, 2012]. Z kolei słabo rozkrzewione łany pszenicy ozimej należy wczesną wiosną intensywniej nawozić N [Budzyński, 2012]. Druga dawka N stosowana w stadiach strzelania w źdźbło (BBCH 30–32) reguluje rozwój pędów bocznych, zapobiega redukcji liczby kłosek i ziaren w kłosach, przedłuża efekt zieloności łanu. Nadmierna dawka N, w tym okresie, może powodować bujny rozwój masy wegetatywnej, szybki wzrost pędów, co najczęściej prowadzi do zwiększonego wylegania łanu [Budzyński, 2012]. Na znacznych obszarach Europy w uprawie pszenicy ozimej, której ziarno przeznaczone jest na cele konsumpcyjne istnieje potrzeba zastosowania trzeciej wiosennej dawki N (BBCH 37–51) [Efretuei i in., 2016; Litke i in., 2018]. Ma ona znaczenie korekcyjne, jakościowe. Zwiększa przede wszystkim zawartość białka i glutenu w formującym się ziarnie, a w niewielkim zakresie kształtuje plon ziarna [Budzyński, 2012].

Plon ziarna pszenicy ozimej i efektywność wykorzystania N zależą również od pozostałych praktyk agronomicznych, głównie termin [Sun i in., 2007; Dai i in., 2017] oraz gęstość siewu [Dai i in., 2013]. Zmiany klimatyczne obserwowane w skali globalnej skutkują wydłużeniem okresu wegetacji przedzimowej pszenicy, co powoduje, że producenci są skłonni opóźniać termin siewu [Ainsworth i in.,

2010; Xiao i in., 2013, Xiao i in., 2015]. Jednakże opóźniony termin siewu może osłabiać proces pobierania N obniżając efektywność jego działania [Dai i in., 2017; Yin i in. 2018]. W aspekcie optymalizacji plonu ziarna pszenicy decydujący wpływ ma właściwie dobrana gęstość siewu, pozwalająca na osiągnięcie optymalnej liczby kłosów m^{-2} [Hochman i Horan, 2018; Jaenisch i in., 2019; Lollato i in., 2019]. Odpowiednią zwartość łanu na poziomie 550–650 kłosów m^{-2} przed zbiorem, która gwarantuje w warunkach agroekologicznych Polski wysokie plony ziarna pszenicy ozimej, można osiągnąć zarówno w siewie rzadkim (umożliwiającym większe krzewienie produktywne), jak i w siewie gęstym (z ograniczonym krzewieniem). W tym pierwszym przypadku sieje się małe ilości ziarniaków (200–300 szt. m^{-2}) tak, aby roślina zainicjowała 2–3 pędy kłosonośne. Jednak takie siewy rokują dobrze jedynie w dobrych warunkach środowiska (glebowych, klimatycznych, nawozowych). W przypadku ich pogorszenia (gleba lekka, susza, niskie nawożenie) ryzyko zmniejszenia plonu ziarna przy rzadkim siewie jest duże [Budzyński, 2012]. Elementy struktury plonu pszenicy wykazują zdolność adaptacyjną do zmieniających się warunków środowiskowych [Whaley i in., 2000; Lloveras i in., 2004]. Jednak mechanizm kompensacyjny może różnić się w zależności od genotypu pszenicy [Lloveras i in., 2004; Valério i in., 2013]. Odpowiednie dostosowanie ilości wysiewu pszenicy może poprawić efektywność wykorzystania N [Arduini i in., 2006; Dai i in., 2013; Dai i in., 2014]. W badaniach prowadzonym przez Gao i in. [2009] zwiększenie ilości wysiewu ziarna ze 180 do 220 $kg\ ha^{-1}$ spowodowało wzrost NUE średnio o 17%. Wyniki te wskazują, że w warunkach ograniczonego dostępu do N, wyższa gęstość siewu może przyczynić się do bardziej efektywnego jego pobierania. Dodatkowo, wyniki badań przeprowadzonych przez Dai i in. [2014] sugerują, że zmniejszanie dawki N oraz zwiększanie gęstości siewu może zwiększać pobranie tego makroskładnika z większych głębokości gleby.

2.2. Wartość technologiczna ziarna

Wartość użytkowa ziarna pszenicy to cecha bardzo złożona, która zależy od uwarunkowań genetycznych, agroekologicznych oraz sposobu zarządzania praktykami rolniczymi, w tym poziomem intensywności technologii uprawy [Švec i Hrušcová 2009; Muste i in., 2010; Jankowski i in., 2014; Jankowski i in., 2015]. Za najważniejsze, różnicujące jakość technologiczną ziarna pszenicy uznaje się nawożenie N [Szafrńska i in., 2008; Budzyński, 2012; Jankowski i in., 2014; Jankowski i in., 2015; Sułek i in., 2019]. Jakość technologiczną ziarna pszenicy kształtuje nie tylko dawka N, ale także sposób jej podziału i termin aplikacji [Geisslitz i in., 2019]. Intensywna synteza białek glutenowych rozpoczyna się ok. 12 dni po kwitnieniu, a kończy w 35 dniu po tej fazie pomimo dalszej obecności substratu (aminokwasów). Dlatego bardzo ważny jest umiejętny podział sumarycznej dawki N [Budzyński, 2012].

Poziom nawożenia N determinuje przede wszystkim cechy przemiałowe ziarna (masa 1000 ziaren, gęstość, wyrównanie i szklistość ziarna) [Jańczak-Pieniążek i in., 2020a; Reznick i in., 2021]. Zwiększenie wiosennego nawożenia N powoduje wzrost masy objętościowej [Jankowski i in., 2015] oraz szklistości ziarna pszenicy [Narkiewicz-Jodko i in., 2008; Ellmann, 2011; Jańczak-Pieniążek i in., 2020a; Sissons i in., 2023]. Kindred i in. [2005] oraz Dargie i in. [2020] raportują o korzystnym wpływie

nawożenie N również na wypełnienie ziarna (ograniczenie wolnych przestrzeni w ziarnie i zawartości w nich α -amylazy), opóźnienie dojrzewania i przedłużenie stanu spoczynku ziarna. W miarę zwiększania dawki N pogarsza się jednak wyrównanie ziarna i jego dorodność, co może negatywnie wpływać na końcowy uzysk (wyciąg) mąki [Budzyński i in., 2004; Stankowski i in., 2008]. Wzrost nawożenia N skutkuje również zwiększeniem zawartości białka [Shi i in., 2010; Dubis, 2012; Jankowski i in., 2015; Jańczak-Pieniążek i in., 2020a; Reznick i in., 2021; Sissons i in., 2023], a także glutenu w ziarnie [Sułek i Podolska, 2008; Ellmann, 2011; Dubis, 2012; Wieser i in., 2023]. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, iż wpływ nawożenia N na zawartość glutenu i jego jakość jest silnie skorelowany z czynnikiem genetycznym (odmianą) oraz układem warunków pogodowych podczas okresu nalewania i dojrzewania ziarna [Budzyński, 2012; Horvat i in., 2021; Keres i in., 2021]. Ziarno niektórych odmian pszenicy zwyczajnej może uzyskać dobrą jakość wypiekową tylko przy wysokim poziomie nawożenia N, w przeciwnym razie nie spełnia ono standardów zawartości białka i glutenu. Z kolei ziarno innych odmian może uzyskać wysoką zawartość tych składników już przy niskich dawkach N, a zwiększenie dawki może skutkować obniżeniem zawartości glutenu i pogorszeniem jego jakości. Sytuacja taka może mieć miejsce szczególnie wtedy, kiedy wysokiemu nawożeniu N towarzyszą duże sumy opadów atmosferycznych prowadzące do zwiększenia aktywności enzymatycznej w ziarniakach i rozpoczęcia procesów ich kiełkowania jeszcze w kłosie [Budzyński, 2012; Vetch i in., 2019; Singh i in., 2021a; Tai i in., 2021; Chang i in., 2023]. Co oczywiście uwidacznia się niską wartością liczby opadania, często dyskwalifikującą surowiec na rynku młynarskim [Rothkaehl, 2015; Penning, 2023]. Wzrost dawki N powoduje również zwiększenie zawartości białka w mące [Saint Pierre i in., 2008; Valdés-Valdés i in., 2020; Keres i in., 2021]. Z kolei późniejsza aplikacja N przyczynia się do poprawy wodochłonności mąki oraz właściwości reologicznych ciasta (rozwoju, stałość i rozmiękczenia ciasta) oraz jakości chleba (głównie objętości) [Majewska 1999; Saint Pierre i in., 2008; Rodrihero i in., 2015; Blandino i in., 2016; Souza i in., 2019; Warechowska i in., 2019; Xue i in., 2019; Guerrini i in., 2020; Jańczak-Pieniążek i in., 2020a; Keres i in., 2021; Cesevičienė i in., 2022].

Efekty różnych sposobów zarządzania siewem (termin i gęstość siewu) oceniane są głównie pod kątem ich efektywności plonotwórczej, a tylko sporadycznie są analizowane w kontekście jakości wyprodukowanego ziarna pszenicy. Zende i in. [2005] wskazuje, że tylko przy optymalnym terminie siewu można uzyskać ziarno o dobrej wartości przemiałowej. Opóźniony siew skutkuje najczęściej znacznym spadkiem masy objętościowej [Tyagi i in., 2003; Asseng i in., 2004; Kaur i in., 2010; Meena i in., 2016; Shalaby i in., 2023], twardości ziarna i wydajności mąki [Meena i in., 2016; Singh i in., 2021b]. Z kolei wyższą zawartość białka oraz glutenu w ziarnie, a co za tym idzie wyższą wartość liczbową wskaźnika sedymentacji uzyskuje się w warunkach opóźnionych siewów pszenicy [Gooding i in., 2003; Zende i in., 2005; Motzo i in., 2007; Farooq i in., 2011; Singh i in., 2012; Meena i in., 2016; Mahdavi i in., 2022; Zahra i in., 2023]. Opóźniony siew zwiększa również zawartość popiołu w ziarnie pszenicy [Alignan i in., 2009; Ahmed i Hassan, 2015]. Przy opóźnionych siewach dojrzewanie ziarna przebiega w wyższych temperaturach powietrza, co sprzyja akumulacji popiołu surowego [Alignan i in., 2009].

Zawartość popiołu jest negatywnie skorelowana z barwą mąki [Rodrighero i in., 2015], co sugeruje, że opóźniony siew może również wpływać na tę cechę [Guzmán i in., 2016a]. W warunkach opóźnienia terminu siewu obserwowany jest wzrost zawartości białka ogólnego w mące [Tahir i in., 2006; Li i in., 2013], co może wynikać z przesunięcia fazy dojrzewania ziarna na wyższe temperatury powietrza, sprzyjające jego akumulacji w ziarnie [Johansson i in., 2005; Labuschagne i in., 2009; Hrušková i Švec, 2009; Knapowski i in., 2018]. Zdaniem Knapowskiego i in. [2018] oraz Dong i in. [2021] opóźnienie terminu siewu powoduje zmniejszenie wodochłonności mąki i stałości ciasta oraz wzrost objętości chleba.

Gęstość siewu jest wypadkową terminu siewu oraz intensywności technologii uprawy [Budzyński, 2012]. Badania dotyczące wpływu gęstości siewu na jakość ziarna pszenicy są prowadzone sporadycznie i nie są jednoznaczne [Geleta i in., 2002; Caglar i in., 2011, Zecevic i in., 2014; Guerrini i in., 2020; Soofizada i in., 2022]. Pozytywny wpływ gęstych siewów (650 vs. 500 ziaren m^{-2}) na jakość przemiałową ziarna różnych odmian pszenicy ozimej wykazał Geleta i in. [2002] oraz Zecevic i in. [2014]. W badaniach autorów wzrost gęstości siewu spowodował wytworzenie ziaren bardziej dorodnych o większej masie i korzystniejszym stosunku zawartości białek do skrobi. W warunkach siewów rzadszych zaobserwowano opóźnione dojrzewanie oraz większą liczbę pędów drugiego rzędu, które wytwarzały ziarniaki o mniejszej masie, niskiej masie objętościowej i gorszej jakości [Geleta i in., 2002; Zecevic i in., 2014]. Z kolei w badaniach Guerrini i in. [2020] oraz Sun i in. [2023] wzrost gęstości siewu spowodował obniżenie masy 1000 ziaren bez wpływu na ich masę objętościową. Badania Soofizada i in. [2022], Caglar i in. [2011] oraz Zecevic i in. [2014] wskazują, że wzrost gęstości siewu powoduje zwiększenie zawartości białka, glutenu oraz korzystnie wpływa na wartość wskaźnika sedymentacji w ziarnach pszenicy.

3. Materiał i metody badań

3.1. Ścisłe doświadczenie polowe

Ścisłe doświadczenie polowe z pszenicą ozimą (*Triticum aestivum* L.) realizowano w latach 2018–2021 na polach doświadczalnych Zakładu Produkcyjno-Doświadczalnego „Bałcyny” sp. z o. o. z siedzibą w Bałcynach (53°35'46.4" N, 19°51'19.5" E), należące do Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. W doświadczeniu uwzględniono trzy czynniki: (i) termin siewu: wczesny (6 września 2018, 5 września 2019, 3 września 2020), opóźniony o 14 dni (17–20 września), opóźniony o 28 dni (1–4 października), (ii) gęstość siewu: 200, 300, 400 kiełkujących ziarniaków m⁻²; (iii) podział wiosennej dawki N w stadium BBCH 22–25 + BBCH 30–31: 40+100, 70+70, 100+40 kg ha⁻¹.

Doświadczenie założono w trzech powtórzeniach, w trójczynnikowym układzie split-split-plot, w którym pierwszy czynnik (termin siewu) tworzył bloki główne, drugi czynnik (gęstość siewu) podzielił bloki na podbloki, a te ostatnie zostały podzielone na tyle części ile było poziomów trzeciego czynnika. Powierzchnia poletka do zbioru wynosiła 15 m² (10 × 1.5 m). Przedplonem był rzepak ozimy (*Brassica napus* L.). Corocznie po zbiorze przedplonu (koniec lipca) wykonywano podorywkę na głębokość 6–8 cm i wysiewano nawozy w dawkach 20 kg N ha⁻¹ (mocznik, 46% N), 17.4 kg P ha⁻¹ (superfosfat wzbogacony, 17.4% P) oraz 41.5 kg K ha⁻¹ (sól potasowa, 49.8% K). Następnie pole 1-krotnie bronowano (brona lekka) w celu wymieszania nawozów oraz mechanicznego ograniczenia zachwaszczenia. Orkę siewną na głębokość 20–22 cm wykonywano pod koniec sierpnia. Powierzchnię pola wyrównywano agregatem uprawowym 4–5 dni przed siewem. Ziarno pszenicy ozimej odmiany ‘Julius’ wysiewano w terminach i gęstościach zgodnych ze schematem doświadczenia, w rozstawie 12,5 cm, na głębokość 3 cm. Siewy wykonywano rzędowym siewnikiem poletkowym (Promar SPZ-1.5, Poznań, Polska). W okresie wzrostu roślin prowadzono pełną ochronę ładu pszenicy ozimej przed agrofagami [tab. S2, **P3**]. W stadium BBCH 37 na całości doświadczenia zastosowano 3 dawkę N na poziomie 40 kg ha⁻¹. Azot w okresie wiosenno-letniej wegetacji stosowano w formie saletry amonowej (34% N). Pszenicę ozimą zbierano pod koniec lipca lub na początku sierpnia (BBCH 89) z wykorzystaniem kombajnu poletkowego Wintersteiger Classic (typ 1540–447, Ried im Innkreis, Austria) [tab. S2, **P3**].

Doświadczenie corocznie lokalizowano na glebie płowej typowej (*Haplic Luvisol* według klasyfikacji International Union of Soil Sciences [IUSS Working Group WRB, 2022]) wytworzonej z gliny średniej należącej do klasy bonitacyjnej IIIa. Odczyn gleby był lekko kwaśny (pH 6.2–6.4). Zawartość C_{org} w glebie wahała się od 1,22 do 1,39%, a zasobność w przyswajalne formy składników pokarmowych wyniosła: 75–129 mg kg⁻¹ P, 129–199 mg kg⁻¹ K, 33–49 mg kg⁻¹ Mg, 1–2 mg kg⁻¹ SO₄²⁻ [tab. S1, **P3**]. Analizy właściwości chemicznych gleby wykonano w laboratorium Okręgowej Stacji Chemiczno-Rolniczej w Olsztynie, według metod opisanych w pracach: **P1** oraz tab. S1, **P3**.

3.2. Badania polowe

Po wschodach roślin (BBCH 12–13) oraz wiosną (BBCH 22–25) określono liczbę roślin na 1 m². W stadium BBCH 29 określono stopień rozkrzewienia roślin (liczbę pędów). Bezpośrednio przed zbiorem określono liczbę kłosów m⁻² oraz liczbę ziarniaków w kłosie. Wielkość plonu ziarna i słomy oraz masę 1000 ziarniaków określono wagowo na każdym poletku bezpośrednio po omłocie pszenicy ozimej. Wielkość prób roślin oraz sposób ich pobierania opisano w pracy **P1**. Wilgotność ziarna i słomy określono bezpośrednio po zbiorze metodą suszarkową (FD 53 Binder GmbH, Tuttlingen, Germany), według wzoru 1 przedstawionego w pracy **P1**. Plon ziarna i słomy z każdego poletka skorygowano do 86% suchej masy (s.m.) i przeliczono na powierzchnię 1 ha. Indeks żniwny określono według wzoru 2 przedstawionego w pracy **P1**.

3.3. Warunki pogodowe

Układ warunków pogodowych opisano z wykorzystaniem średniodobowej temperatury powietrza oraz opadów atmosferycznych panujących podczas wegetacji pszenicy ozimej [**P1**]. Dane te pochodziły z automatycznej stacji meteorologicznej (PM Ecology sp. z o. o., Gdynia, Polska) zlokalizowanej na terenie stacji badawczej w Bałcynach. Szczegółowo scharakteryzowano przebieg pogody dla okresów: początek kwitnienia-dojrzałość mleczna (BBCH 61–73), dojrzałość mleczna-dojrzałość woskowa (BBCH 73–83), dojrzałość woskowa-dojrzałość pełna (BBCH 83–89), początek kwitnienia-dojrzałość pełna (BBCH 61–89) oraz dojrzałość mleczna-dojrzałość pełna (BBCH 83–89) z wykorzystaniem sumy temperatur efektywnych (GDD - *Growing Degree-Days*) [wzór 1, **P2**] oraz wskaźnika hydrotermicznego Sielianinov'a [wzór 2, **P2**]

3.4. Wartość przemiałowa ziarna

Ocenę wyrównanie ziarna pszenicy ozimej przeprowadzono z wykorzystaniem sortownika mechanicznego (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o., Bydgoszcz, Polska), zgodnie z PN R-74110:1998. Gęstość ziarna pszenicy ozimej określono metodą objętościowo-wagową, zgodnie z Polską Normą PN-EN ISO 7971-3:2019-03 z wykorzystaniem gęstościomierza o pojemności 1 dm³ (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o., Bydgoszcz, Polska). Twardość ziarna (w przeliczeniu na 86% s.m.) określono z wykorzystaniem NIR System Infratec™ 1241 Grain Analyzer (FOSS, Hillerød, Dania). Szklistość ziarna określono poprzez ocenę przekroju poprzecznego 50 ziaren z każdego poletka przeciętych za pomocą farinotomu (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o., Bydgoszcz, Polska), zgodnie z PN R-74008:1970.

Wyciąg mąki określono jako stosunek masy mąki otrzymanej w czasie przemiału do masy ziarna, z którego ją uzyskano. Wyciąg mąki oznaczono poprzez zmielenie ziarna w młynku laboratoryjnym (Brabender, Quadrumat Junior, Duisburg, Niemcy). Zawartość białka ogólnego określono z wykorzystaniem NIR System AgriCheck Analyzer (Bruins Instruments, Puchheim, Bayern, Niemcy). Zawartość glutenu mokrego w ziarnie pszenicy ozimej oznaczono metodą wagową poprzez

mechaniczne wymycie glutenu, zgodnie z PN-EN ISO 21415-2:2015-12E. Oznaczenie wskaźnika sedymentacji (test Zeleny'ego) przeprowadzono na aparacie składającym się z pulpitu pomiarowego oraz wytrząsarki typu SWD-89 (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o., Bydgoszcz, Polska), według PN-EN ISO 5529:2010. Liczbę opadania określono metodą Hagberga-Pertena [Hagberg, 1960; Hagberg 1961], według PN-EN ISO 3093:2010 na aparacie typu SWD-SŻ (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o., Bydgoszcz, Polska). Wielkość analizowanych prób oraz szczegółowe metody określenia wartości przemiałowej ziarna pszenicy ozimej opisano w pracy **P2**.

Gęstość, szklistość oraz wyrównywanie ziarna, zawartość białka ogólnego i glutenu mokrego w ziarnie, wskaźnik sedymentacji oraz liczbę opadania określono w laboratorium Zakładu Badawczego Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o. w Bydgoszczy. Twardość ziarna oraz wyciąg mąki określono w laboratoriach Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

3.5. Jakość mąki

Mąkę wykorzystaną do badań uzyskano poprzez zmielenie ziarna pszenicy w młynie laboratoryjnym (Brabender, Quadrumat Junior, Duisburg, Niemcy). Zawartość popiołu surowego w mące określono z wykorzystaniem NIR System Infratec™ 1241 Grain Analyzer (FOSS, Hillerød, Dania). Barwę mąki oceniono przy użyciu automatycznego miernika bieli MB-3M (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o. Bydgoszcz, Polska). Zawartość białka ogólnego w mące określono z wykorzystaniem NIR System AgriCheck Analyzer (Bruins Instruments, Puchheim, Bayern, Niemcy). Wielkość analizowanych prób oraz szczegółowe metody określenia parametrów oceny jakości mąki opisano w pracy **P2**.

Ocenę jakości mąki wykonano w Zakładzie Badawczym Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o. w Bydgoszczy.

3.6. Właściwości reologiczne ciasta i jakość pieczywa

Wodochłonność mąki oraz jej właściwości reologiczne (rozwój, stałość i rozmiękczenie ciasta) określono z wykorzystaniem farinografu Brabender z zastosowaniem głowicy typ 50, zgodnie z PN-EN ISO 5530-1:2015-01. W celu określenia jakości pieczywa przeprowadzono próbny wypiek, według procedury opisanej w pracy **P3**. Objętość chleba oraz gęstość miękiszu określono po 24 h od jego wypieku. Objętość pieczywa określono przy użyciu materiałów sypkich (ziarno prosa) za pomocą objętościomierza laboratoryjnego Sa-Wy o pojemności 1200 cm³ (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o. Bydgoszcz, Polska). Gęstość miękiszu chleba określono z wykorzystaniem wykrojnika miękiszu (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o. Bydgoszcz, Polska) obliczając jego wartość według wzoru 1 przedstawionego w pracy **P3**. Szczegółowe metody określenia właściwości reologicznych ciasta i jakości pieczywa opisano w pracy **P3**.

Ocenę właściwości reologicznych ciasta oraz jakości pieczywa wykonano w Zakładzie Badawczym Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o. w Bydgoszczy.

3.7. Analiza statystyczna

Wyniki pomiarów podano analizie wariancji ANOVA z wykorzystaniem Statistica software [TIBCO Software Inc, 2017]. Wielokrotne porównania post-hoc przeprowadzono za pomocą testu HSD Tukey'a ($\alpha=0.05$). Wyniki F -test dla czynników doświadczenia i ich interakcji przedstawiono w tabelach: 1 [P1], S1 [P2] oraz S5 [P3]. Zależność między zmiennymi meteorologicznymi a badanymi parametrami agronomicznymi oceniono metodą regresji liniowej. Wartości współczynnika korelacji Pearsona (R) uznawano za istotne przy $p \leq 0,05$.

4. Wyniki badań

4.1. Agrometeorologiczne uwarunkowania rozwoju roślin

W wszystkich latach badań jesienna wegetacja pszenicy ozimej przebiegała w warunkach niskich opadów atmosferycznych (61–82% średniej z lat 1981–2015) oraz wysokiej średniodobowej temperatury powietrza (o 2,0 °C wyższej niż średnia wieloletnia). Okres zimowego spoczynku roślin przebiegała w warunkach wyższej średniodobowej temperatury powietrza od średniej wieloletniej o 2,8 °C. Opady atmosferyczne w okresie zimowego spoczynku roślin były we wszystkich latach badań zbliżone do średniej wieloletniej. We wszystkich sezonach wegetacyjnych średniodobowe temperatury powietrza w kwietniu i maju były zbliżone do średnich wieloletnich. Natomiast czerwiec, lipiec i sierpień były ponadprzeciętnie ciepłe. Znacznie większym zróżnicowaniem w latach badań, charakteryzowały się opady atmosferyczne w okresie wiosenno-letniej wegetacji. W 1 cyklu badań, w kwietniu nie zanotowano opadów. Natomiast w maju, czerwcu i lipcu opady atmosferyczne były wyższe od średnich wieloletnich, odpowiednio o: 72, 35 i 5%. W 2 cyklu badań kwiecień był również prawie bezdeszczowy (1 mm opadu). W tym sezonie wegetacyjnym, ponadprzeciętne opady atmosferyczne wystąpiły w maju i czerwcu (113 i 145% sumy wieloletniej). W 3 cyklu badań zanotowano bardzo obfite opady atmosferyczne w maju, lipcu i sierpniu (192, 156 i 189% sumy wieloletniej). Suma opadów atmosferycznych, w całym okresie wegetacji pszenicy ozimej, wyniosła 605 (2018/2019), 570 (2019/2020) i 674 mm (2020/2021), przy średniej wieloletniej na poziomie 596 mm [rys. 1, **P1**].

W latach prowadzenia badań polowych rozwój roślin pszenicy ozimej, w okresie od kwitnienia roślin do zbioru ziarna (BBCH 61–89), przebiegał w odmiennych warunkach termiczno-wilgotnościowych [tab. 1, **P2**]. Suma temperatur efektywnych (GDD), w okresie od kwitnienia do dojrzałości pełnej ziarna, wynosiła 696–796 (2019), 630–649 (2020) i 695–706 °C (2021). W 1 cyklu badań, opóźnienie terminu siewu spowodowało wzrost GDD w stadium BBCH 71–89 o 22 (+14 dni) i 100 °C (+28 dni). Szczególnie silny wzrost GDD pod wpływem opóźnienia terminu siewu obserwowano w stadium BBCH 83–89 (93 vs. 118–187°C). W pozostałych latach badań, kwitnienie oraz dojrzewanie roślin pszenicy ozimej przebiegało w warunkach termicznych (GDD) słabo różnicowanych terminem siewu. Opady atmosferyczne w okresie od kwitnienia do zbioru pszenicy ozimej wynosiły 154–178 (2019), 127–128 (2020) i 134–153 mm (2021). W 1 cyklu badań, opóźnienie terminu siewu spowodowało, że rozwój pszenicy w okresie od początku kwitnienia do dojrzałości pełnej przebiegał w warunkach wyższych opadów atmosferycznych. W 2 cyklu badań, rozkład opadów atmosferycznych w fazach BBCH 61–89 był słabo zróżnicowany terminem siewu. W 3 sezonie wegetacyjnym, opóźnienie terminu siewu pszenicy ozimej spowodowało, że kwitnienie roślin (BBCH 61–73) oraz początkowe fazy dojrzewania ziarna (BBCH 73–83) przebiegały w warunkach obfitszych opadów atmosferycznych. Z kolei końcowy okres dojrzewania ziarna (BBCH 83–89) przebiegał w warunkach prawie bezdeszczowych (41 vs. 0–2 mm). Generalnie, układ warunków hydrotermicznych wyceniony wskaźnikiem Sielanianov'a, w okresie od kwitnienia do dojrzałości pełnej ziarna pszenicy, był korzystny (wilgotny) we wszystkich latach badań. Należy jednak podkreślić, iż w 2 cyklu badań rozwój roślin

pszenicy ozimej, w okresie od fazy dojrzałości młecznej aż do zbioru (BBCH 73–89), przebiegał w warunkach posuchy ($K = 0,35\text{--}0,98$) [tab. 1, **P2**].

4.2. Obsada oraz stopień rozkrzewienia roślin

Opóźnienie terminu siewu do początku października spowodowało obniżenie obsady roślin jesienią i wiosną o 13%, w stosunku do siewów wrześniowych [tab. 2, **P1**]. Wzrost gęstości siewu spowodował sukcesywne zwiększenie liczby roślin po wschodach oraz wiosną [tab. 2, **P1**], niezależnie od warunków agroekologicznych panujących w latach badań [tab. 1, **P1**].

Opóźnienie terminu siewu spowodowało zmniejszenie liczby pędów na roślinie w końcowej fazie krzewienia o 13 (+14 dni) i 24% (+28 dni). Wzrost gęstości siewu z 200 do 400 ziarniaków m^{-2} spowodował zmniejszenie o 10% liczby pędów na roślinie w stadium BBCH 29. Obniżenie pierwszej wiosennej (BBCH 22–25) dawki N ze 100 do 40 kg ha^{-1} spowodowało zmniejszenie liczby pędów na roślinie średnio o 10% [tab. 2, **P1**]. Liczba pędów na 1 m^2 w stadium BBCH 29 również zmniejszała się w miarę opóźniania terminu siewu [tab. 2, **P1**]. Pszenica ozima wysiana na początku października wytwarzała średnio o 33% mniej pędów na jednostce powierzchni niż wysiana w terminie najwcześniejszym (3–6 września). Zwiększenie gęstości siewu z 200 do 300–400 ziarniaków m^{-2} spowodowało wzrost liczby pędów na 1 m^2 o 38–78%. Z kolei zwiększenie pierwszej wiosennej dawki z 40 do 100 kg N ha^{-1} spowodowało wzrost liczby pędów na jednostce powierzchni o 12% [tab. 2, **P1**].

4.3. Elementy struktury plonu

Pszenica ozima wytwarzała, w latach badań, od 406 do 538 kłosów m^{-2} [tab. 3, **P1**]. Opóźnienie terminu siewu o 14 i 28 dni zwiększało liczbę kłosów m^{-2} średnio o 11%. Najniższą liczbę kłosów na jednostce powierzchni uzyskano przy wysiewie 200 ziarniaków m^{-2} . Wzrost gęstości siewu do 300 ziarniaków m^{-2} spowodował istotny przyrost liczby kłosów m^{-2} o 8%. Zastosowanie 100+40 kg N ha^{-1} korzystnie wpłynęło na liczbę kłosów m^{-2} [tab. 3, **P1**].

Pszenica ozima wytwarzała od 43,7 do 51,5 ziarniaków w kłosie [tab. 3, **P1**]. Średnio w latach badań termin siewu nie różnicował istotnie tego elementu struktury plonu pszenicy ozimej [tab. 1, **P1**]. Wzrost gęstości siewu z 200 do 300–400 ziarniaków m^{-2} obniżał liczbę ziarniaków w kłosie o 5–7% [tab. 3, **P1**], niezależnie od warunków agroekologicznych panujących w latach badań [tab. 1, **P1**]. Sposób podziału wiosennej dawki N nie różnicował istotnie wypełnienia kłosów ziarniakami [tab. 1, **P1**].

Najmniejszą MTZ (44,95 g) uzyskano wysiewając pszenicę ozimą na początku września. Opóźnienie terminu siewu o 14–28 dni spowodowało wzrost MTZ o 1–2% [tab. 3, **P1**].

4.4. Plon ziarna i słomy

Pszenica ozima plonowała na poziomie od 8,99 (3 cykl badań) do 10,57–10,90 Mg ha^{-1} (1 i 2 cykl badań). Wczesny siew (3–6 września) nie sprzyjał plonowaniu pszenicy ozimej (9,36 Mg ha^{-1}). Zdecydowanie wyżej (średnio o 12–13%) plonowała pszenica ozima wysiewana pomiędzy 17 września

a 4 października [tab. 4, **P1**]. W warunkach opóźnionych siewów pszenica ozima wytwarzała istotnie więcej kłosów m^{-2} (o 10–12%) oraz ziarno o większej masie (o 1–2%) [tab. 3, **P1**]. Wykazano, że w warunkach agroekologicznych NE Polski gęstszy wysiew (400 ziarniaków m^{-2}) był korzystniejszy dla plonowania pszenicy ozimej niż siew rzadki (200 ziarniaków m^{-2}) (10,25 vs. 10,02 Mg ha^{-1}) [tab. 4, **P1**]. Wzrost plonowania pszenicy ozimej wysianej w zagęszczeniu 400 ziarniaków m^{-2} był efektem korzystnego wpływu tej gęstości siewu na liczbę kłosów m^{-2} (wzrost o 8–10%) [tab. 3, **P1**]. Najkorzystniej dla plonowania pszenicy było zastosowanie 100+40 kg N ha^{-1} w stadium BBCH 22–25 i 30–31 [tab. 4, **P1**], niezależnie od terminu i gęstości siewu [tab. 1, **P1**].

Plon słomy istotnie obniżał się (o 6%) w warunkach późnych siewów, tj. na początku października [tab. 4, **P1**]. Wpływ gęstości siewu na plon słomy był uzależniony od terminu siewu [tab. 1, **P1**]. W warunkach wczesnego siewu (początek września) wzrost gęstości siewu z 200 do 300–400 ziarniaków m^{-2} spowodował obniżenie plonu słomy o 16–20%. W warunkach siewów opóźnionych o 14 i 28 dni gęstość siewu (200, 300, i 400 ziarniaków m^{-2}) nie różnicowała istotnie plonu słomy [rys. 9, **P1**]. Najwyższy plon słomy (6,23 Mg ha^{-1}) uzyskano w warunkach niskiej pierwszej wiosennej dawki N (40+100 kg ha^{-1}). Zwiększenie pierwszej wiosennej dawki N do poziomu 70 lub 100 kg ha^{-1} przy jednoczesnym zmniejszeniu drugiej dawki N (70+70 lub 100+40 kg ha^{-1}) spowodowało obniżenie plonu słomy średnio o 6% [tab. 4, **P1**].

Indeks żniwny pszenicy ozimej wahała się w zakresie od 0,61 do 0,64–0,65. Opóźnienie terminu siewu do połowy września lub początku października korzystnie wpłynęło na indeks żniwny pszenicy ozimej (wzrost o 5–7%) [tab. 4, **P1**]. Gęstość siewu oraz sposób podziału wiosennej dawki N nie wpływały istotnie na stosunek ziarna do biomasy pozbiiorowej pszenicy ozimej [tab. 1, **P1**].

4.5. Wartość przemiałowa ziarna

Wyrównanie ziarna było ujemnie skorelowane ze średniodobową temperaturą powietrza w okresie od początku kwitnienia do zbioru ziarna pszenicy ozimej (BBCH 61–89) [rys. 1, **P2**]. Stąd ziarno o najlepszym wyrównaniu (83,0%) zebrano w 2 sezonie wegetacyjnym [tab. 2, **P2**], charakteryzującym się niską średniodobową temperaturą powietrza w stadium BBCH 61–89 (18,2–18,5 °C) [tab. 1, **P2**]. Najmniejszym wyrównaniem (69,7%) charakteryzowało się ziarno zebrane w 3 cyklu badań [tab. 2, **P2**], w którym zanotowano najwyższą średniodobową temperaturę powietrza w okresie od początku kwitnienia do zbioru ziarna (20,7–21,4°C) [tab. 1, **P2**]. Opóźnienie terminu siewu spowodowało przesunięcie fazy kwitnienia i dojrzewania ziarna (BBCH 61–89) na okres wyższych średniodobowych temperatur powietrza [tab. 1, **P2**], co skutkowało obniżeniem wyrównania ziarna o 1,9 punktu procentowego (%p) [tab. 2, **P2**]. Związek pomiędzy terminem siewu a wyrównaniem ziarna pszenicy ozimej był szczególnie widoczny w warunkach agroekologicznych 1 sezonu wegetacyjnego. W tym cyklu badań opóźnienie terminu siewu o 14 dni spowodowało spadek wyrównania ziarna aż o 6,1%p [rys. 2a, **P2**], co wynikało z przesunięcia kwitnienia i dojrzewania ziarna na okres wyższych średniodobowych temperatur powietrza (20,7 vs. 21,2–21,4°C) [tab. 1, **P2**]. Wzrost gęstości siewu z 200 do 300 ziarniaków

m⁻² spowodował obniżenie wyrównania ziarna pszenicy o 2,6%p [tab. 2, **P2**]. Sposób podziału wiosennej dawki N nie różnicował istotnie tej cechy ziarna [tab. S1, **P2**].

Gęstość ziarna pszenicy ozimej wahała się od 80,7 do 81,1–81,3 kg hl⁻¹. Opóźnienie terminu siewu o 14–28 dni spowodowało wzrost gęstości ziarna o 1–1,5% [tab. 2, **P2**]. Gęstość siewu oraz sposób podziału wiosennej dawki N nie różnicowały istotnie gęstości ziarna [tab. 2, **P2**], niezależnie od układu warunków pogodowych panujących w latach badań [tab. S1, **P2**].

Twardość ziarna była ujemnie skorelowana z wyrównaniem ziarna [tab. S2, **P2**] oraz dodatnio skorelowana ze średniodobową temperaturą powietrza w okresie od początku kwitnienia do zbioru ziarna [rys. 3, **P2**]. Ziarno o największej twardości (68,0) wytworzyła pszenica ozima w 3 roku badań [tab. 2, **P2**], charakteryzującym się najwyższą średniodobową temperaturą powietrza w okresie od początku kwitnienia do zbioru ziarna (20,7–21,4°C) [tab. 1, **P2**]. Opóźnienie terminu siewu o 14 dni zwiększało twardość ziarna pszenicy ozimej o 5%, w stosunku do terminu najwcześniejszego [tab. 2, **P2**]. Rośliny wysiewane późno były narażone na wyższe temperatury podczas kwitnienia i dojrzewania [tab. 1, **P2**], co wyjaśnia obserwowany wzrost twardości ziarna [rys. 3, **P2**]. Gęstość siewu (200, 300 i 400 ziarniaków m⁻²) nie różnicowała twardości ziarna pszenicy ozimej [tab. S1, **P2**]. Korzystnie na twardość ziarna wpływało wiosenne nawożenie N w dawce 40+100 kg ha⁻¹. Zwiększenie wczesnowiosennej dawki N, przy jednoczesnym obniżeniu dawki na początku strzelania w źdźbło, obniżyło twardość ziarna o 3–4% [tab. 2, **P2**].

Szklistość ziarna pszenicy ozimej wahała się od 88,9 do 97,1% [tab. 2, **P2**]. Analiza regresji wykazała dodatnią korelację pomiędzy szklistością ziarna pszenicy a średniodobową temperaturą powietrza w fazie dojrzałości woskowej (BBCH 83–89) [rys. 4, **P2**]. Opóźnienie terminu siewu pszenicy ozimej spowodowało przesunięcie fazy dojrzałości woskowej na okres wyższych średniodobowych temperatur powietrza [tab. 1, **P2**], co skutkowało wzrostem szklistości ziarna o 3 (+14 dni) i 6%p (+28 dni) [tab. 2, **P2**]. Wzrost gęstości siewu z 200 do 400 ziarniaków m⁻² niekorzystnie wpływał na szklistość ziarna (spadek udziału ziarna o bielmie szklistym o 1,4%p). Zwiększenie pierwszej wiosennej dawki N z 40 do 70 lub 100 kg ha⁻¹, przy jednoczesnym obniżeniu dawki N w stadium BBCH 30–31, zmniejszyło szklistość ziarna o 1,3–1,4%p [tab. 2, **P2**].

Wyciąg mąki wahał się od 71,2 do 74,7% [tab. 2, **P2**] i był istotnie różnicowany terminem siewu oraz sposobem podziału wiosennej dawki N [tab. S1, **P2**]. Najmniejszą wydajność mąki (71,8%) uzyskano z ziarna pszenicy ozimej wysiewanej w terminie wczesnym (początek września). Opóźnienie terminu siewu o 14–28 dni spowodowało wzrost uzysku mąki o 1,4–2,2%p. Nawożenie N w stadium BBCH 22–25 i 30–31 na poziomie 40+100 kg ha⁻¹ pozwalało na uzyskanie najwyższego wyciągu mąki (73,9%). Zwiększenie wczesnowiosennej dawki N, przy jednoczesnym zmniejszeniu jej w stadium BBCH 30–31, obniżyło uzysku mąki o 1,8%p [tab. 2, **P2**].

4.6. Jakość kompleksu białkowego oraz aktywność enzymatyczna ziarna

Zawartość białka ogólnego w ziarnie pszenicy ozimej była dodatnio skorelowana z GDD, opadami atmosferycznymi oraz warunkami hydrotermicznymi (wskaźnik Sielianinov'a) panującymi w okresie od kwitnienia do zbioru ziarna (BBCH 61–89) [rys. 6, **P2**]. Opóźnienie terminu siewu spowodowało wzrost zawartości białka ogólnego w ziarnie pszenicy ozimej o 1 (+14 dni) i 2% (+28 dni) [tab. 3, **P2**]. Szczególnie silny wzrost zawartości białka ogólnego pod wpływem opóźnienia terminu siewu o 14 i 28 dni zaobserwowano w 1 cyklu badań (4 i 8%) [rys. 7a, **P2**]. W tym sezonie wegetacyjnym opóźnienie terminu siewu spowodowało przesunięcie kwitnienia oraz dojrzewania ziarna na okres wyższych GDD (696 vs. 718–796°C), obfitszych opadów atmosferycznych (154 vs. 172–178 mm) oraz korzystniejszych warunków hydrotermicznych ($K = 1.64$ vs. 1.66–1.77) [tab. 1, **P2**], a więc parametrów dodatnio skorelowanych z zawartością białka ogólnego w ziarnie [rys. 6, **P2**]. Wzrost gęstości siewu z 200 do 300 ziarniaków m^{-2} spowodował obniżenie zawartości białka ogólnego w ziarnie pszenicy ozimej o 1,5% [tab. 3, **P2**]. Warto podkreślić, iż negatywne skutki wzrostu gęstości siewu dla zawartości białka ogólnego w ziarnie były szczególnie widoczne w warunkach opóźnienia terminu siewu o 14 i 28 dni (spadek zawartości białka ogólnego o 2 i 3%) [rys. 7c, **P2**]. Największą zawartością białka ogólnego charakteryzowało się ziarno pszenicy ozimej nawożonej na poziomie 40+100 kg N ha^{-1} . Zwiększanie pierwszej wczesnowiosennej dawki N, przy jednoczesnym obniżeniu dawki w stadium BBCH 30–31, spowodowało spadek zawartości białka ogólnego w ziarnie o 1–2% [tab. 3, **P2**].

Zawartość glutenu mokrego w ziarnie pszenicy ozimej była ujemnie skorelowana z wyrównaniem ziarna oraz dodatnio skorelowana ze szklistością ziarna [tab. S2, **P2**]. Zawartość glutenu mokrego była również determinowana przez średniodobowe temperatury powietrza w stadium BBCH 61–89 oraz opady atmosferyczne i warunki hydrotermiczne panujące w fazie BBCH 73–83. Wzrost wartości liczbowych tych parametrów pogody sprzyjał akumulacji glutenu mokrego w ziarnie pszenicy ozimej [rys. 8, **P2**]. Opóźnienie terminu siewu o 28 dni spowodowało wzrost zawartości glutenu mokrego w ziarnie o 0,5–0,6%p. Silniejszy wzrost (o 2,2%p) zawartości glutenu mokrego w ziarnie pszenicy ozimej pod wpływem opóźnienia terminu siewu o 28 dni zaobserwowano w warunkach agroekologicznych 1 cyklu badań [rys. 9a, **P2**]. W tym sezonie wegetacyjnym opóźnienie terminu siewu spowodowało przesunięcie kwitnienia oraz dojrzewania pszenicy na korzystniejsze warunki termiczne. Z kolei faza dojrzłości mleczej (BBCH 73–83) została przesunięta na okres wyższych opadów atmosferycznych (o 6%) oraz korzystniejszych warunków hydrotermicznych (wzrost K o 52–65%) [tab. 1, **P2**]. Wzrost gęstości siewu z 200 do 300 ziarniaków m^{-2} spowodował spadek zawartości glutenu mokrego w ziarnie o 0,7%p [tab. 3, **P2**]. Spadek ten był silniejszy (o 0,8 i 1,5%p) w warunkach opóźnionych siewów (o 14 i 28 dni) [rys. 9b, **P2**]. Sposób podziału wiosennej dawki N nie różnicowała zawartości glutenu mokrego w ziarnie pszenicy ozimej [tab. S1, **P2**].

Wskaźnik sedymentacji Zeleny'ego osiągał wyższe wartości (zjawisko korzystne) w warunkach opóźnionych siewów o 28 dni [tab. 3, **P2**], niezależnie od lat badań, gęstości siewu oraz sposobu podziału wiosennej dawki N [tab. S1, **P2**]. Gęstość siewu (200, 300, 400 ziarniaków m^{-2}) nie różnicowała

wartości wskaźnika sedymentacji [tab. S1, **P2**]. Korzystniej na jakość kompleksu białkowego wpłynęło zastosowanie wiosną N w dawkach 40+100 kg ha⁻¹. Zwiększenie pierwszej wiosennej dawki N, przy jednoczesnym obniżeniu jej w stadium BBCH 30–31 (40+100 vs. 70+70 lub 100+40 kg N ha⁻¹), spowodowało spadek wartości wskaźnika sedymentacji, odpowiednio o: 0,7 lub 1,3% [tab. 3, **P2**].

Liczba opadania była dodatnio skorelowana z zawartością glutenu mokrego w ziarnie pszenicy ozimej [tab. S2, **P2**]. Była ona również dodatnio skorelowana ze średniodobową temperaturą powietrza w okresie od początku kwitnienia do zbioru oraz z opadami atmosferycznymi i warunkami hydrotermicznymi panującymi w fazie dojrzałości młecznej [rys. 10, **P2**]. Największą aktywnością enzymatyczną (mierzoną liczbą opadania) charakteryzowało się ziarno pszenicy ozimej w 1 i 3 sezonie wegetacyjnym (odpowiednio: 364 i 381 s). W 2 cyklu badań liczba opadania była niższa o 10 i 14% [tab. 3, **P2**]. W tym cyklu badań okres od początku kwitnienia do zbioru wyróżniał się najniższą średniodobową temperaturą powietrza (18,2–18,5°C), a w fazie dojrzałości młecznej wystąpiła posucha (9,9–25,1 mm deszczu, K = 0,44–0,98) [tab. 1, **P2**]. Opóźnienie terminu siewu o 14 dni spowodowało wzrost liczby opadania (o 3%) [tab. 3, **P2**]. Wzrost ten mógł być spowodowany przesunięciem kwitnienia i dojrzewania roślin na okres wyższych średniodobowych temperatur powietrza, a fazy dojrzałości młecznej na okres obfitszych opadów atmosferycznych i korzystniejszych warunków hydrotermicznych [tab. 1, **P2**]. Parametry te były dodatnio skorelowane z liczbą opadania [rys. 10, **P2**]. Gęstość siewu oraz sposób podziału wiosennej dawki N nie różnicowały istotnie liczby opadania [tab. S1, **P2**].

4.7. Jakość mąki

Barwa mąki była ujemnie skorelowana z zawartością popiołu surowego [tab. S6, **P3**]. Zawartość popiołu surowego w mące była dodatnio skorelowana z warunkami hydrotermicznymi panującymi w okresie dojrzewania ziarna (BBCH 73–89) [rys. 1a, **P3**]. Z kolei barwa mąki była ujemnie skorelowana z wskaźnikiem Sielianinov'a dla okresu dojrzewania ziarna [rys. 1b, **P3**]. Posucha panująca w okresie dojrzewania ziarna nie sprzyjała akumulacji popiołu surowego w mące, co korzystnie wpłynęło na barwę mąki. Stąd znacząco jaśniejszą mąkę (79,9% standardu bieli), o niższej zawartości popiołu surowego (6,3 g kg⁻¹ s.m.) uzyskano z ziarna wyprodukowanego w sezonie wegetacyjnym o najmniej sprzyjających warunkach pogodowych podczas jego dojrzewania (2019/2020) [tab. 1 i S4, **P3**]. Zawartość białka ogólnego oraz wodochłonność mąki były dodatnio skorelowane z zawartością popiołu surowego [tab. S6, **P3**]. Tak więc w latach sprzyjających akumulacji popiołu surowego (duża wilgotność w okresie dojrzewania ziarna) obserwowano wyższą zawartość białka ogólnego w mące i lepszą jej wodochłonność. Najwyższą zawartością białka ogólnego (135 g kg⁻¹ s.m.) i popiołu surowego (7,4 g kg⁻¹ s.m.) oraz największą zdolnością do absorpcji wody (62,2%) charakteryzowała się mąka pozyskana z ziarna pszenicy ozimej uprawianej w 1 sezonie wegetacyjnym [tab. 1, **P3**]. Barwa mąki była istotnie różnicowana gęstością siewu oraz sposobem podziału wiosennej dawki N [tab. S5, **P3**]. Jaśniejszą mąkę (78,2% wzorca bieli) uzyskano z ziarna pszenicy wysiewanej w wysokim zagęszczeniu (400 ziarniaków

m⁻²) [tab. 1, **P3**]. Jaśniejszy kolor mąki uzyskano również po zastosowaniu dawek 70+70 lub 100+40 kg N ha⁻¹ [tab. 1, **P3**].

Wpływ terminu siewu na zawartość białka ogólnego w mące różnił się w zależności od warunków pogodowych w latach badań. Szczególnie korzystny wpływ opóźnienia terminu siewu na zawartość białka ogólnego w mące zaobserwowano w 1 sezonie wegetacyjnym [rys. 3, **P3**], który charakteryzował się najkorzystniejszymi warunkami hydrotermicznymi w okresie dojrzewania ziarna (najwyższe wartości wskaźnika Sielianinov'a, tab. S4, **P3**). W tym cyklu badań opóźnienie terminu siewu przesunęło dojrzewanie ziarna na okres korzystniejszych warunków hydrotermicznych [tab. S4, **P3**], co zwiększyło zawartość białka ogólnego w mące o 3,8–8,5% [rys. 3, **P3**]. Zwiększenie nawożenia N na początku wiosennej wegetacji, przy jednoczesnym ograniczeniu dawki w początkowej fazie strzelania w źdźbło (100+40 kg ha⁻¹), spowodowało obniżenie zawartości białka ogólnego w mące o 2,3% [tab. 1, **P3**].

4.8. Właściwości reologiczne ciasta i jakość pieczywa

Stałość ciasta była ujemnie skorelowana z zawartością popiołu surowego w mące [tab. S6, **P3**] oraz warunkami hydrotermicznymi panującymi w okresie dojrzewania ziarna [rys. 4a, **P3**]. Z kolei rozmiękczenie ciasta było dodatnio skorelowane z zawartością popiołu surowego oraz warunkami hydrotermicznymi w okresie nalewania ziarna [rys. 4b, **P3**]. Mąka pozyskana z ziarna pszenicy ozimej uprawianej w warunkach agroekologicznych 2 cyklu badań charakteryzowała się korzystniejszymi cechami farinograficznymi, tj. najdłuższym rozwojem ciasta (3,7 min), najwyższą stałością ciasta (9,0 min) oraz najniższym współczynnikiem tolerancji na miesienie (38,4 jB). Dobre właściwości reologiczne mąki, w tym cyklu badań, wynikały z posuchy panującej w okresie dojrzewania ziarna ($K = 0,40\text{--}0,79$) [tab. S4, **P3**]. Najmniej korzystne wartości czasu rozwoju ciasta (3,5 min), stałości ciasta (6,3–7,4 min) oraz jego rozmiękczenia (48,2–53,5 jB) uzyskano wysiewając pszenicę w sierpniu (wczesny i opóźniony o 14 dni termin siewu). Opóźnienie terminu siewu do początku października (+28 dni) korzystnie wpływało na rozwój i stałość ciasta (wydłużenie czasu, odpowiednio o: 6 i 14–33%) oraz jego rozmiękczenie (zmniejszenie współczynnika tolerancji na miesienie o 12–21%), niezależnie od układu warunków pogodowych panujących w latach badań [tab. 2, **P3**]. Poprawa właściwości reologicznych mąki pszenicy ozimej, na skutek opóźnionych siewów, była efektem przesunięcia okresu dojrzewania ziarna na mniej korzystne warunki hydrotermiczne [tab. S4, **P3**], które sprzyjały uzyskaniu wyższej stałości ciasta (korelacja ujemna) oraz mniejszej tolerancji na miesienie (korelacja dodatnia) [rys. 4, **P3**]. Gęstość siewu oraz sposób podziału wiosennej dawki N istotnie różnicowały jedynie stałość ciasta [tab. S5, **P3**]. Najwyższą stałością charakteryzowało się ciasto wytworzone z mąki pszenicy ozimej wysiewanej w gęstości 400 ziarniaków m⁻² (7,8 min) oraz nawożonej na poziomie 100+40 kg N ha⁻¹ (7,7 min). Obniżenie gęstości wysiewu do 200–300 ziarniaków m⁻² oraz zastosowanie 40+100 kg N ha⁻¹ zmniejszało stałość ciasta, odpowiednio o: 8–10 i 8% [tab. 2, **P3**]. Szczególnie korzystny wpływ zwiększenia gęstości siewu pszenicy ozimej do 400 ziarniaków m⁻² na stałość ciasta obserwowano w warunkach opóźnionych siewów do początku października (+28 dni) [rys. 5, **P3**]. Wpływ gęstości siewu

i sposobu wiosennego nawożenia N na stałość ciasta był niezależny od warunków agroekologicznych panujących w latach badań [tab. S5, **P3**].

Objętość chleba oraz gęstość miękiszu były determinowane zawartością popiołu w mące. Wzrost zawartości popiołu spowodował obniżenie objętości chleba i wzrost gęstości miękiszu [tab. S6, **P3**]. Objętość chleba była ujemnie skorelowana z opadami atmosferycznymi w fazie dojrzałości woskowej ziarna pszenicy (BBCH 83–89). Z kolei gęstość miękiszu była ujemnie skorelowana ze średniodobową temperaturą powietrza w okresie dojrzewania ziarna (BBCH 73–89) [rys. 6, **P3**]. Opóźnienie terminu siewu o 14–28 dni spowodowało zmniejszenie gęstości miękiszu chleba o 4% (do 0,24 g cm⁻³), nie różnicując jego objętości [tab. 2, **P3**]. Obniżenie gęstości miękiszu na skutek opóźnienia terminu siewu było spowodowane przesunięciem okresu dojrzewania ziarna na wyższe średniodobowe temperatury powietrza [tab. S4, **P3**]. Wysiew pszenicy ozimej w dużym zagęszczeniu (400 ziarniaków m⁻²) korzystnie wpłynął na objętość chleba (wzrost o 1,5%) [tab. 2, **P3**]. Sposób podziału wiosennej dawki N nie różnicował objętości chleba oraz gęstości jego miękiszu [tab. S5, **P3**].

5. Dyskusja

5.1. Elementy struktury plonu

Globalne zmiany klimatu powodują, że praktyczne aspekty opóźniania terminu siewu pszenicy ozimej nie są jednoznaczne. Opóźnienie terminu siewu pszenicy może powodować wzrost plonu ziarna [Lloveras i in., 2004; Sun i in., 2007; Chen i in., 2008; Ma i in., 2018; Yin i in., 2018; Lollato i in., 2019; badania własne: tab. 4, **P1**]. Zdaniem Lloveras i in. [2004], Chen i in. [2008] oraz Dai i in. [2017], potwierdzonymi badaniami własnymi [tab. 3, **P1**], utrzymanie wysokiego poziomu plonowania pszenicy w warunkach opóźnionych siewów jest efektem wzrostu liczby ziarniaków w kłosie. W badaniach Ma i in. [2018] również liczba kłosów m^{-2} wzrastała w miarę opóźnienia siewu (o 7%), z kolei wypełnienie kłosów ziarniakami oraz MTZ ulegały nieznacznemu zmniejszeniu (odpowiednio o: 3 i 4%). W badaniach Yin i in. [2018] opóźnienie terminu siewu zmniejszało liczbę kłosów m^{-2} (o 6%) oraz zwiększało liczbę ziarniaków w kłosie (o 5%). Z kolei badania Budzyńskiego i in. [2018] wykazały, że termin siewu nie wpływał na wartości liczbowe komponentów plonu ziarna, tym samym nie różnicując jego masy.

Uprawę pszenicy w siewie o małej gęstości charakteryzuje mniejsza liczba kłosów niż w siewach o dużym zagęszczeniu [Valério i in., 2009], co jest zgodne z wynikami badań własnych [tab. 3, **P1**]. Z kolei wzrost gęstości siewu powoduje najczęściej zwiększenie liczby kłosów m^{-2} , przy jednoczesnym zmniejszeniu produktywności kłosa [Bavec i in., 2002; Bokan i Malešević, 2004; Baloch i in., 2010; Kondić, 2017]. Na wzrost liczby kłosów, przy jednoczesnym ograniczeniu liczby ziarniaków w kłosie, w warunkach zagęszczenia siewu w uprawie różnych genotypów pszenic, wskazują badania Podolskiej i Wyzińskiej [2011], Buczka i Bobreckiej-Jamro [2015], Sander i in. [2017] oraz własne [tab. 3, **P1**].

Spśród czynników agrotechnicznych, najsilniej na potencjał plonowania pszenicy ozimej oddziałuje nawożenie N, ze względu na bezpośrednie oddziaływanie na wszystkie elementy struktury plonu [Budzyński, 2012]. W badaniach własnych sposób podziału wiosennej dawki N (40+100, 70+70, 100+40 kg ha^{-1}) istotnie różnicował tylko liczbę kłosów m^{-2} . Najwyższą wartość tego elementu struktury plonu (495 kłosów m^{-2}) uzyskano stosując 100+40 kg N ha^{-1} w stadium BBCH 22–25 i 30–31. Obniżenie dawki N w stadium BBCH 22–25, przy jednoczesnym zwiększeniu jej poziomu w stadium BBCH 30–31 (70+70 lub 40+100 kg ha^{-1}), spowodowało spadek liczby kłosów m^{-2} o 4%. Również w badaniach López-Bellido i in. [2005], Budzyńskiego i Bielskiego [2008] oraz Podolskiej [2008] obniżenie wczesnowiosennej dawki N spowodowało obniżenie liczby kłosów m^{-2} o 5–11%. Z kolei w badaniach Brzozowskiej i in. [2008] sposób podziału wiosennej dawki N różnicował istotnie tylko MTZ. Negatywnie na dorodność ziarna (spadek MTZ o 1%) wpłynęło obniżenie drugiej dawki N aplikowanej w fazie BBCH 35–36. Również na związek sposobu podziału dawki N z MTZ wskazują badania López-Bellido i in. [2005] oraz Ferrari i in. [2016]. W badaniach Zhang i in. [2021] największą liczbę ziarniaków w kłosie (39,4–40,9) i MTZ (43,2–44,3 g) uzyskano po zastosowaniu 120 kg N ha^{-1} przed siewem oraz 120 kg N ha^{-1} na początku strzelania w źdźbło. Zwiększenie przedsiewnej dawki N, przy jednoczesnym

zmniejszeniu dawki na początku strzelania w źdźbło (zmiana proporcji dawek N na 100:0 oraz 70:30), spowodowało spadek liczby ziarniaków w kłosie o 6–7% oraz MTZ o 9–10% [Zhang i in., 2021].

5.2. Plon ziarna i słomy

Odmiany ozimej pszenicy zwyczajnej wymagają siewu w takim terminie, który zapewni uzyskanie przed zahamowaniem jesiennej wegetacji co najmniej stadium BBCH 23. Osiągnięcie tej fazy w okresie przedzimowym sprzyja pełniejszemu wykorzystaniu zasobów wodnych i cieplnych przed okresem zimowym [Ma i in., 2018], lepszemu hartowaniu się roślin, a co za tym idzie lepszemu ich zimowaniu [Budzyński i in., 2018]. Zdaniem Budzyńskiego [2012], w warunkach agroekologicznych NE Polski prawidłowe rozkrzewienie ozimych odmian rodzaju *Triticum* przed zimowym zahamowaniem wegetacji zapewniają tylko siewy wrześnieowe. Siewy październikowe uważane są za spóźnione dla wszystkich ozimych odmian *T. aestivum*, *T. durum* oraz *T. spelta*, gdyż następuje opóźnienie wschodów i wydłużenie trwania początkowych stadiów rozwoju roślin, co w konsekwencji prowadzi od niepełnego krzewienia roślin w okresie przedzimowym [Budzyński, 2012]. Jednak w praktyce rolniczej dość często zdarzają się opóźnienia terminu siewu w stosunku do przyrodniczo-optimalnego, co często stanowi poważną przeszkodę w wykorzystaniu pełnego genetycznego potencjału plonotwórczego odmian pszenicy [Shah i in., 2020]. Późny siew zwykle prowadzi do rozwoju roślin w gorszych warunkach klimatycznych, nawet w latach o sprzyjającej pogodzie [Tester i Langridge, 2010]. Niekorzystnymi czynnikami podczas wegetatywnego wzrostu roślin (od siewu do spoczynku zimowego), w warunkach opóźnionych siewów, jest zmniejszone dzienne promieniowanie słoneczne, mniejsza liczba godzin nasłonecznienia w ciągu dnia [Shah i in., 2020], a także obniżająca się średniodobowa temperatura powietrza, które prowadzą do gorszej zdolności krzewienia i zmniejszonej liczby pędów [Jan i in., 2000; Hussain i in., 2017; Kaur, 2017; Shah i in., 2020]. Również badania własne wykazały, że opóźnienie terminu siewu skutkowało spadkiem liczby roślin po wschodach i wczesną wiosną (o 13%) oraz zmniejszeniem liczby pędów na roślinie (o 13–24%) i na jednostce powierzchni (24–33%) w końcowej fazie krzewienia (BBCH 29). Opóźniony siew może również wpływać na proces kwitnienia pszenicy oraz naraża rośliny na działanie podwyższonej temperatury powietrza podczas okresu napełniania ziarna [Garg i in., 2013], co może przyspieszyć i skrócić rozwój reprodukcyjny kłosa i zmniejszyć jego wypełnienie ziarniakami [Jan i in., 2000; Hussain i in., 2017; Kaur, 2017; Bailey-Serres i in., 2019; Dubey i in., 2019]. Przeprowadzone badania na terenie północno-zachodnich Chin wykazały zmniejszenie plonu ziarna o 1% z każdym dniem opóźnienia terminu siewu na skutek ograniczenia wzrostu, składowych plonu oraz wskaźnika LAI [Shah i in., 2020]. Duże obniżki wydajności (o 21%) pszenicy na skutek opóźnienia terminu siewu o 30 dni uzyskano także w warunkach wschodniego wybrzeża Chin [Baloch i in., 2010]. W warunkach klimatyczno-siedliskowych Pakistanu pszenica ozima zareagowała zmniejszeniem plonu ziarna o 7–12% na 10–20 dniowe opóźnienie terminu siewu [Sun i in., 2007; Ali i in., 2010]. Opóźnienie terminu siewu pszenicy ozimej o 26 dni, w warunkach agroekologicznych południowo-wschodnich Niemiec, spowodowało spadek plonu ziarna średnio o 7% [Prey i in., 2019]. Badania Dai i in. [2017] dowodzą, że opóźnienie terminu siewu niekoniecznie różnicuje proces

kwitnienia, akumulację suchej masy w roślinach, proces wypełnienia ziarna, czy też plonowanie pszenicy. Na słabą reakcję pszenicy zwyczajnej, orkisz i twardej na 10- oraz 20-dniowe opóźnienie terminu siewu w warunkach agroekologicznych NE Polski wskazują badania Budzyńskiego i in. [2018]. Żadna z ozimych odmian badanych gatunków pszenic (*T. aestivum*, *T. durum* oraz *T. spelta*) nie zareagowała poziomem plonowania na opóźnienie terminu siewu, w tym na wysiew październikowy [Budzyński i in., 2018]. Badania Oleksiak [2014], przeprowadzone w warunkach produkcyjnych Polski, również wykazały niewielki (o 1–5%) spadek plonu ziarna pszenicy ozimej na skutek opóźnienia terminu siewu. Również w badaniach własnych, opóźnienie terminu siewu o 2 lub 4 tygodnie, w stosunku do przyrodniczo-optimalnego, nie spowodowało spadku plonu ziarna. Wprost przeciwnie, skutkiem opóźnienia terminu siewu o 14 dni (połowa września) był wzrost plonu ziarna nawet o 13%, tj. o 1,22 Mg ha⁻¹. Paymard i in. [2018] tak odmienną reakcję pszenicy ozimej na opóźnienie terminu siewu uzasadnia zmianami klimatu. Również Ding i in. [2016] zalecają w warunkach zmieniającego się klimatu opóźnienie terminu siewu od 10 do 25 dni, w zależności od układu warunków wilgotnościowych. Różna reakcja pszenicy ozimej na opóźnienie terminu siewu w warunkach zmieniającego się klimatu widoczna jest również w relacji plonu ziarna do plonu biomasy pozbiorowej [Donaldson i in., 2001; Moustafa i in., 2014; Shirinzadeh i in., 2017; Acharya i in., 2017; Madhu i in., 2018; Tahir i in., 2019; Singh, 2021c]. W badaniach Moustafa i in. [2014], Singh [2021c], Tahir i in. [2019] oraz Shirinzadeh i in. [2017] opóźnienie terminu siewu spowodowało spadek indeksu żniwnego o 4–36%. Z kolei w badaniach Donaldson i in. [2001], Acharya i in. [2017], Madhu i in. [2018] oraz własnych [tab. 4, **P1**] zaobserwowano wzrost indeksu żniwnego od 6% do nawet 14–20% w miarę opóźnienia terminu siewu.

Gęstość siewu jest czynnikiem bezpośrednio kształtującym liczbę kłosów m⁻² u wszystkich gatunków zbóż [Budzyński, 2012]. Wpływ warunków klimatyczno-siedliskowych na efektywność plonotwórczą sugeruje konieczność dostosowania gęstości siewu do określonych regionów uprawy [Kondić i in., 2017; Lindsey i in., 2020]. Badania Lloveras i in. [2004] wykazały, że zalecane gęstości siewu w Belgii i północnej Francji wynoszą 200 ziarniaków m⁻², w Stanach Zjednoczonych wahają się od 67 ziarniaków m⁻² (suche równiny lądowe) do nawet 400 ziarniaków m⁻² (wschodnie obszary). W USA najczęściej zalecany jest jednak siew pszenicy w zagęszczeniu 200 ziarniaków m⁻², który może zostać zwiększony o 50% podczas jej nawadniania [Lindsey i in., 2020]. W warunkach agroekologicznych Słowenii rekomendowany jest wysiew pszenicy w zagęszczeniu od 600 do 800 ziarniaków m⁻² [Bavec i in., 2002]. W warunkach klimatycznych Serbii najwyższe plony ziarna pszenicy uzyskuje się przy wysiewie 500–600 ziarniaków m⁻² [Bokan i Malešević, 2004; Aćin, 2016]. W badaniach przeprowadzonych w południowo-wschodniej Polsce wykazano korzystny wpływ na plonowanie pszenicy ozimej wysiewu 300 [Podolska i Wyzińska, 2011] lub 400 ziarniaków m⁻² [Buczek i Bobrecka-Jamro, 2015]. Również w badaniach własnych, rzadki siew (200 ziarniaków m⁻²) był najmniej produktywny, a istotny przyrost plonu ziarna pszenicy ozimej uzyskano przy wysiewie 400 ziarniaków m⁻² (10,02 vs. 10,25 Mg ha⁻¹). W badaniach Budzyńskiego i in. [2018], przeprowadzonych w

NE Polsce, wysiew w zakresie od 350 do 550 ziarniaków m^{-2} nie różnicował istotnie wielkości plonu ziarna pszenicy zwyczajnej, orkisz i twardej. Również badania Ahmadi i in. [2011], Gross i in. [2012], Teixeira Filho i in. [2008], Sander i in. [2017] oraz El-Metwally i in. [2018] przeprowadzone w Brazylii, Egipcie i Iranie nie wykazały związku pomiędzy gęstością siewu a plonowaniem pszenicy. Aćin [2016] wskazuje na konieczność zwiększenia gęstości siewu w warunkach opóźnionych siewów. Badania autora wykazały, że w warunkach agroekologicznych Serbii przy opóźnionych siewach pszenicy należy zwiększyć gęstość siewu z 500–600 do nawet 700 ziarniaków m^{-2} [Aćin, 2016]. Na potrzebę zwiększenia gęstości siewu w warunkach opóźnionych siewów, które powodują ograniczony wzrost i produkcję pędów podczas krzewienia, wskazują także badania Staggenborg i in. [2003] oraz Lloveras i in. [2004]. Badania własne nie potwierdziły związku pomiędzy terminem a gęstością siewu (brak istotnej interakcji). Bardzo różna reakcja pszenicy ozimej na gęstość siewu wynika, z faktu bardzo dużych możliwości kompensacji elementów struktury plonu ziarna w zależności od genotypu, warunków siedliska i przebiegu pogody [Budzyński, 2012]. Wpływ gęstości siewu na indeks żniwny pszenicy ozimej nie jest jednokierunkowy. Zapewne jest on silnie determinowany krzewistością odmiany oraz reakcją roślin na zagęszczenie w łanie. W badaniach Whaley i in. [2000], Ahmadi i in. [2011], Laghari i in. [2011] oraz Hu i in. [2018] zwiększenie gęstości siewu spowodowało spadek indeksu żniwnego o 9–28%. Farooq i in. [2016] oraz Abd El-Lattief [2014] udowodnili wzrost indeksu żniwnego o 6–17% w miarę zwiększania gęstości siewu pszenicy. Z kolei w badaniach Porker i in. [2020], Hussain i in. [2001], Dalia i in. [2016], Ahmadi i in. [2011] oraz własnych [tab. 4, P1] wartość indeksu żniwnego nie była determinowana gęstością siewu.

Najważniejszym, plonotwórczym czynnikiem technologii produkcji ziarna pszenicy jest nawożenie N [Budzyński, 2012, Basso i in., 2013; Budzyński i in., 2018; Vogeler i in., 2021]. Przyrost plonu ziarna pszenicy zwyczajnej, w zależności od gleby i odmiany, może wystąpić do 120–150 kg N ha^{-1} [Saint Pierre i in., 2008, Harasim i in., 2016; Budzyński i in., 2018], a tylko w technologiach intensywnych do 200–240 kg N ha^{-1} [Sieling i in., 2005; Shekoofa i Emam, 2010]. Podział dawki N wpływa na poprawę efektywności jego wykorzystania, zmniejszając tym samym negatywne konsekwencje dla środowiska [Hu i in., 2021a]. W badaniach własnych najwyższe plony ziarna pszenicy ozimej uzyskano po zastosowaniu 100 kg N ha^{-1} w stadium BBCH 22–25 oraz 40 kg N ha^{-1} w fazie BBCH 30–31. Również badania przeprowadzone przez Podolską [2008], Pisarka i in. [2013a], Sedlář i in. [2015] oraz Belete i in. [2018] udowodniły zasadność stosowania wyższej dawki N w fazie krzewienia niż w fazie strzelania w źdźbło (wzrost plonu ziarna o 4–16%). Z kolei badania Budzyńskiego i Bielskiego [2008] nie wykazały istotnych różnic w plonie pomiędzy niższą (120 kg ha^{-1}), a wyższą (150 kg ha^{-1}) dawką N aplikowaną po wiosennym wznowieniu wegetacji. Również badania Brzozowskiej i in. [2008] oraz Školníková i in. [2022] nie wykazały istotnego wpływu zróżnicowanego podziału dawek N (w przedziale 135–160 kg ha^{-1}) na plonowanie pszenicy ozimej. Jednak w wielu badaniach najbardziej plonotwórczy okazał się równomierny podział wiosennej dawki (50:50) [López-Bellido i in., 2005; Zhang i in., 2020; Zain i in., 2021; Zhang i in., 2021; Abubakar i in., 2022; Hamani i in., 2023]. Wpływ

podziału wiosennej dawki N na indeks żniwny pszenicy ozimej nie jest jednokierunkowy [Pisarek i in., 2013b; López-Bellido i in., 2005; Akhter i in., 2017]. W badaniach Pisarka i in. [2013b] oraz własnych [tab. 4, **P1**], indeks żniwny nie był uzależniony od sposobu podziału wiosennej dawki N. W badaniach López-Bellido i in. [2005] najwyższy indeks żniwny uzyskano w wyniku 2-krotnej (50:50) aplikacji N. Z kolei w badaniach Akhter i in. [2017] najwyższą wartość indeksu żniwnego uzyskano stosując N przedsiewnie, w fazie krzewienia i kłoszenia, w proporcjach: 25:50:25.

5.3. Wartość przemiałowa ziarna

Wyrównanie ziarna jest jednym z kluczowych wskaźników jakości ziarna, decydującym o przebiegu procesu jego przemiału [Buczek i Bobrecka-Jamro 2015; Hughes i in., 2017]. Cecha ta jest silnie determinowana sposobem siewu [Panazzo i Eagles, 2000; McKenzie, 2005; Waraich i in., 2010; Coventry i in. 2011b; Meena i in., 2016; Forster i in., 2017]. W badaniach Meena i in. [2016] ziarno o największej średnicy (2,87 i 2,90 mm) uzyskano w warunkach wczesnego siewu. Opóźnienie terminu siewu o 6 tygodni spowodowało zmniejszenie średnicy ziarna pszenicy o 3–4%. Zdaniem Meena i in. [2016] uzyskanie ziarna o mniejszej średnicy, na skutek opóźnienia terminu siewu, może być efektem przesunięcia fazy formowania ziarna na okres wyższych temperatur i niższych opadów atmosferycznych. Na związek pomiędzy terminem siewu a wyrównaniem/wielkością ziarna wskazują również badania Panazzo i Eagles [2000], Waraich i in. [2010]; Coventry i in. [2011b] oraz własne [tab. 2, rys. 1, **P2**]. W badaniach własnych wykazano ujemną korelację pomiędzy wyrównaniem ziarna a średniodobową temperaturą powietrza w okresie od początku kwitnienia do zbioru ziarna pszenicy ozimej (BBCH 61–89). Ziarno o najlepszym wyrównaniu (83,0%) zebrano w sezonie wegetacyjnym charakteryzującym się niską średniodobową temperaturą powietrza w stadium BBCH 61–89. Z kolei najmniejszym wyrównaniem (69,7%) charakteryzowało się ziarno zebrane w roku, w którym zanotowano najwyższą średniodobową temperaturę powietrza w stadium BBCH 61–89. Opóźnienie terminu siewu spowodowało przesunięcie fazy kwitnienia i dojrzewania ziarna na okres wyższych średniodobowych temperatur powietrza, co również skutkowało obniżeniem wyrównania ziarna (o 1,9%p) [tab. 2, rys. 1, **P2**]. W badaniach McKenzie [2005] wzrost gęstości siewu jęczmienia (*Hordeum vulgare* L.) ze 150 do 350 ziarniaków m⁻², zmniejszał wielkość ziaren o 5%. W badaniach Forster i in. [2017] wraz ze wzrostem gęstości siewu pszenicy twardej (z 222 do 371 ziarniaków m⁻²) zmniejszała się wielkość ziaren o 4%. Również w badaniach własnych wzrost gęstości siewu z 200 do 300 ziarniaków m⁻² spowodował obniżenie wyrównania ziarna pszenicy o 2,6%p. W badaniach Sadowska i in. [2001] zwiększenie nawożenia N w zakresie od 50 do 150 kg ha⁻¹ nie różnicowało wielkości ziaren pszenicy zwyczajnej. Na brak związku pomiędzy intensywnością technologii uprawy pszenicy a wielkością (wymiarami) ziarna wskazują badania Varga i in. [2003]. Również badania własne wykazały słabe oddziaływanie sposobu podziału wiosennej dawki N na wyrównanie ziarna pszenicy ozimej.

Gęstość ziarna jest ważnym wskaźnikiem informującym o stopniu rozwinięcia ziaren, ich strukturze i grubości okrywy owocowo-nasiennej. Większa masa objętościowa ziarna może wskazywać na jego lepszą wartość technologiczną [Kozlovsky i in., 2009; Jankowski i in., 2015]. Badania

przeprowadzone przez Meena i in. [2016], na glebie piaszczysto-gliniastej regionu półsuchego Indii, wykazały wyższą gęstość ziarna ($80,2 \text{ kg hl}^{-1}$) w warunkach siewu wczesnego (początek listopada), a istotnie niższą ($78,3 \text{ kg hl}^{-1}$) przy siewie opóźnionym (+6 tygodni). Zdaniem Meena i in. [2016] opóźnienie terminu siewu spowodowało wczesne dojrzewanie i zasychanie niedojrzałego ziarna w momencie jego wypełniania na skutek wysokich temperatur powietrza. Również w badaniach Kaur i in. [2010], realizowanych w warunkach siedliskowo-klimatycznych Indii, masa objętościowa ziarna pszenicy obniżyła się o 3% na skutek opóźnienia terminu siewu. Znaczny spadek gęstości ziarna na skutek opóźnionego siewu był obserwowano również w warunkach agroekologicznych Australii, Brazylii, Indii oraz Iraku [Tyagi i in., 2003; Asseng i in., 2004]. Odwrotne rezultaty uzyskano w badaniach własnych, w których największą gęstość ziarna ($81,6 \text{ kg hl}^{-1}$) uzyskano w siewie opóźnionym (+28 dni). Mogło to wynikać, z faktu, że nie udowodniliśmy związku pomiędzy gęstością ziarna a układem warunków pogodowych (GDD, średniodobowa temperatura powietrza, opady atmosferyczne oraz wskaźnik Sielianinov'a) w okresie od początku kwitnienia do zbioru ziarna. Większe zagęszczenie siewu prowadzi zwykle do zmniejszenia wielkości kłosów i liczby kłosów, co może sprzyjać rozwojowi ziaren o większej masie [Carr i in., 2003]. Badania własne nie potwierdziły związku pomiędzy gęstością siewu a masą objętościową ziarna pszenicy ozimej, prawdopodobnie dlatego, że dostępność wody oraz składników nawozowych była wystarczająca (na poziomie przeciwdziałającym redukcji liczby kłosów). Na brak związku pomiędzy gęstością siewu a gęstością ziarna pszenicy wskazują również wyniki badań Otteson i in. [2008] oraz Guerrini i in. [2020]. Masę objętościową ziarna pszenicy ozimej można modyfikować również sposobem nawożenia N [Otteson i in., 2008; Harasim i Wesołowski, 2013; Jańczak-Pieniążek i in., 2020b]. W badaniach Jankowskiego i in. [2015] intensyfikacja technologii produkcji ziarna pszenicy ozimej korzystnie wpływała na dorodność ziarna (wzrost gęstości ziarna o 1%). W badaniach Harasima i Wesołowskiego [2013] zwiększenie dawki N ze 100 do 150 kg ha^{-1} spowodowało wzrost gęstości ziarna pszenicy o 1%. Z kolei badania Jańczak-Pieniążek i in. [2020b] wskazują na związek tej cechy z typem odmiany pszenicy ozimej. Odmiany liniowe zareagowały istotnym wzrostem gęstości ziarna (o 5%) po zwiększeniu nawożenia ze $110 \text{ do } 150 \text{ kg N ha}^{-1}$. Z kolei u odmian hybrydowych nie wykazano związku pomiędzy nawożeniem N a gęstością ziarna. Na brak związku pomiędzy nawożeniem N a masą objętościową ziarna pszenicy wskazują także badania prowadzone przez Otteson i in. [2008], Guerrini i in. [2020] oraz własne [tab. S1 i 2, **P2**].

Twardość ziarna definiuje jego wartość przemiałową, gdyż wpływa na wydajność przemiału oraz jakość wypieku [Pasha i in., 2010]. W badaniach własnych twardość ziarna była ujemnie skorelowana z wyrównaniem ziarna. W badaniach Meena i in. [2016] największą twardością charakteryzowało się ziarno pszenicy wysianej wcześniej. Opóźnienie terminu siewu spowodowało obniżenie twardości ziarna o 7–11%. Podobne wyniki uzyskali Coventry i in. [2011a; 2011b]. W badaniach własnych twardość ziarna była dodatnio skorelowana ze średniodobową temperaturą powietrza w okresie od początku kwitnienia do zbioru ziarna pszenicy ozimej. Opóźnienie terminu siewu przesunęło fazy kwitnienia i dojrzewania ziarna na okres wyższych temperatur powietrza, co spowodowało wzrost

twardość ziarna o 5%. W badaniach własnych gęstość siewu (200, 300, 400 ziarniaków m^{-2}) nie różnicowała twardości ziarna pszenicy ozimej. Również w badaniach McKenzie i in. [2008] oraz Twizerimana i in. [2020] gęstość siewu nie wpływała istotnie na tą cechę ziarna. Zdaniem Souza i in. [2004] twardość ziarna jest determinowana właściwościami odmiany, warunkami klimatyczno-siedliskowymi oraz dostępnością N. W badaniach własnych największą twardością ziarna odznaczała się pszenica ozima nawożona w dawkach 40+100 kg N ha^{-1} . Zwiększenie wczesnowiosennej dawki N, przy jednoczesnej redukcji dawki na początku strzelania w źdźbło, obniżyło twardości ziarna o 3–4%. W badaniach Zhong i in. [2019] ziarno o największej twardości uzyskano aplikując 60 kg N ha^{-1} w stadium BBCH 17 lub 31, a przesunięcie nawożenia N do stadium 37 BBCH zmniejszyło twardość ziarna o 8%. W badaniach Hao i in. [2023] podział dawki 210 kg N ha^{-1} na 2 części (początek strzelania w źdźbło i kwitnienie) obniżył twardość ziarna o 10%, w stosunku do podziału na 4 części (początek strzelania w źdźbło, kłoszenie, kwitnienie, wypełnianie ziarna). Z kolei w badaniach Blandino i in. [2015] jednokrotna aplikacja dawki 130 kg N ha^{-1} (BBCH 23) lub jej podział na 2 części (BBCH 23 i 32) nie miały wpływu na twardość ziarna pszenicy. Na brak wpływu podziału dawki N na twardość ziarna wskazują również badania Mor i in. [2019], Valdés-Valdés i in. [2020] oraz Zhang i in. [2022].

Szklistość ziarna jest jedną z cech charakteryzujących bielmo [Jankowski i in., 2015]. Ziarna szkliste charakteryzują się większą zawartością bielma oraz większą twardością ziarna i zawartością białka w porównaniu z ziarnem nieszklistym [Dziki i in., 2014]. W badaniach własnych ziarno o większej twardości charakteryzowało się również większą szklistością oraz lepszym wyciągiem mąki. Wykazano związek (dodatnia korelacja) pomiędzy szklistością ziarna a średniodobową temperaturą powietrza w fazie dojrzałości woskowej. Opóźnienie terminu siewu pszenicy ozimej spowodowało przesunięcie tej fazy na okres wyższych średniodobowych temperatur powietrza, co skutkowało wzrostem szklistości ziarna o 3 (+14 dni) i 6%p (+28 dni). Z kolei Forster i in. [2017] wykazał, że termin siewu oraz gęstość siewu nie wpływają na szklistość ziarna pszenicy twardej. Również w badaniach Bożek i in. [2022] oraz Karabínová i in. [2001] gęstość siewu nie różnicowała istotnie szklistości ziarna pszenicy twardej i zwyczajnej. W badaniach własnych wzrost gęstości siewu z 200 do 400 ziarniaków m^{-2} obniżył szklistość ziarna o 1,4%p. Poglądy na temat wpływu intensyfikacji technologii produkcji na szklistość ziarna są rozbieżne [Jankowski i in., 2015]. W badaniach Jańczak-Pieniążek i in. [2020b] zwiększenie dawki N ze 110 do 150 kg ha^{-1} nie różnicowało szklistości ziarna odmian populacyjnych pszenicy ozimej. Wzrost szklistości ziarna aż o 23–25%p pod wpływem obfitszego nawożenia N obserwowany był jedynie u 2, spośród 7 badanych odmian mieszańcowych [Jańczak-Pieniążek i in., 2020b]. W badaniach Jankowskiego i in. [2015] intensyfikacja technologii produkcji ziarna pszenicy ozimej spowodowała wzrost szklistości ziarna o 11%p. Na wzrost udziału ziarniaków o bielmie szklistym, pod wpływem zwiększonego nawożenia N, wskazują również badania Budzyńskiego i in. [2004] oraz Narkiewicz-Jodko i in. [2008]. W badaniach własnych największą szklistością (93,2%) odznaczało się ziarno pszenicy ozimej nawożonej na poziomie 40+100 kg N ha^{-1} . Zwiększenie dawki N w stadium BBCH 22–

25, przy jednoczesnym obniżeniu jej poziomu w stadium BBCH 30–31 (70+70 lub 100+40 kg ha⁻¹), spowodowało spadek szklistości ziarna o 1,3–1,4%p.

Podstawowym wyróżnikiem stosowanym w ocenie wartości przemiałowej ziarna jest wyciąg mąki, który w znacznej mierze decyduje o wynikach ekonomicznych procesu jej produkcji [Jankowski i in., 2015]. W badaniach Meena i in. [2016] największy wyciąg mąki (63–68%) uzyskano w warunkach siewu wczesnego. Opóźnienie terminu siewu obniżyło uzysk mąki o 3%p. Na podobny związek terminu siewu z uzyskiem mąki wskazują badania Gaire i in. [2019] oraz Zheng i in. [2021]. Warto wspomnieć, że wskaźnik ten jest ściśle skorelowany z dorodnością ziarna. Wysoki wyciąg mąki uzyskuje się tylko z ziarna dorodnego, dobrze wypełnionego [Seleiman i in., 2011; Jankowski i in., 2015]. W badaniach własnych opóźnienie terminu siewu spowodowało wytworzenie dorodniejszego ziarna o większej gęstości, twardości oraz szklistości, czego efektem był większy wyciąg mąki (o 1,4–2,2%p). W badaniach Otteson i in. [2008] oraz własnych [tab. 3, P2] nie wykazano związku pomiędzy gęstością siewu a wydajnością mąki. Z kolei w badaniach Caglar i in. [2011] wydajność mąki zmniejszyła się o 3% pod wpływem wzrostu gęstości siewu z 325 do 625 ziarniaków m⁻². Wydajność mąki jest wypadkową cech fizycznych ziarna (dorodności, twardości, szklistości i gęstości usypowej) silnie różnicowanych sposobem nawożenia N. W badaniach własnych najwyższą wydajność mąki (73,9%) uzyskano po zastosowaniu 40+100 kg N ha⁻¹ w stadium BBCH 22–25 i 30–31. Zwiększenie wczesnowiosennej dawki N, przy jednoczesnym zmniejszeniu jej na początku strzelania w źdźbło (100+40 kg ha⁻¹), obniżyło uzysk mąki o 1,8%p. Z kolei w badaniach Zheng i in. [2021] podział dawki 180 kg N ha⁻¹ w proporcji 60:40 (BBCH 00 i 31) spowodował wzrost wydajności mąki o 1%p, w porównaniu do podziału dawki w proporcji 70:30. W badaniach Wu i in. [2022] podział dawki 180 kg N ha⁻¹ na 3 części (przedsiewnie, krzewienie, strzelanie w źdźbło, w proporcjach: 50:10:40, 70:10:20 lub 50:40:10) nie miał wpływu na wydajność mąki. Również w badaniach Budzyńskiego i in. [2004], Otteson i in. [2008] oraz Jankowskiego i in. [2015] intensywność technologii produkcji ziarna pszenicy nie różnicowała istotnie wydajności mąki.

5.4. Jakość kompleksu białkowego oraz aktywność enzymatyczna ziarna

Głównym miernikiem jakości ziarna pszenicy w handlu i przetwórstwie jest zawartość białka [Wieser i in., 2023]. Zawartość białka w ziarnie pszenicy mieści się w przedziale od 100 do 150 g kg⁻¹ s.m. [Shewry, 2009, Guerrini i in., 2020; Wieser i in., 2023]. Istotny wpływ terminu siewu na zawartość białka ogólnego w ziarnie zbóż realizuje się głównie na skutek modyfikacji warunków termicznych panujących w okresie wypełniania ziarna. Pszenica późno zasiana kwitnie później, co powoduje, że okres wypełniania ziarna zbiega się z wysokimi temperaturami powietrza [El-Hawary i in., 2022]. Stres cieplny skutkuje zmniejszeniem wielkości ziarna, słabszym rozwojem bielma i zwiększoną koncentracją białka [Li i in., 2013; Ahmed i Hassan, 2015; Thapa i in., 2020]. Badania przeprowadzone przez Meena i in. [2016] dowiodły, że opóźniony siew znacząco (o 6–8%) zwiększał zawartość białka w ziarnie. Wzrost zawartości białka w ziarnie związany z opóźnionym siewem i podwyższoną temperaturą powietrza w okresie wegetacji został potwierdzony również w badaniach Gooding i in. [2003], Zende i in. [2005],

Motzo i in. [2007], Sattar i in. [2010], Farooq i in. [2011], Singh i in. [2012], Shah i in. [2020] oraz własnych [tab. 3, rys. 6 i 7c, P2]. W badaniach własnych zawartość białka ogólnego w ziarnie pszenicy ozimej była dodatnio skorelowana z GDD, opadami atmosferycznymi oraz warunkami hydrotermicznymi panującymi w okresie od kwitnienia do zbioru ziarna (BBCH 61–89). Opóźnienie terminu siewu spowodowało przesunięcie kwitnienia oraz dojrzewania pszenicy ozimej na okres wyższych GDD oraz wyższych opadów atmosferycznych, co skutkowało wzrostem zawartości białka ogólnego o 1–2%. Związek gęstości siewu z zawartością białka w ziarnie pszenicy nie jest jednokierunkowy [Gooding i in., 2002; Otteson i in., 2008; Han i Yang, 2009; Nakano i Morita, 2009; Dragoś i Pîrşan, 2010; Jemal i in., 2015; Zhang i in., 2018; Guerrini i in., 2020; Hao i in., 2022]. Badania przeprowadzone przez Otteson i in. [2008], Nakano i Morita [2009], Dragoś i Pîrşan [2010], Jemal i in. [2015] oraz Guerrini i in. [2020] nie wykazały związku pomiędzy gęstością siewu a zawartością białka w ziarnie. W badaniach własnych wzrost gęstości siewu z 200 do 300 ziarniaków m^{-2} spowodował obniżenie zawartości białka ogólnego w ziarnie średnio o 1,5%. Warto jednak podkreślić, iż negatywne skutki wzrostu gęstości siewu dla zawartości białka ogólnego w ziarnie (spadek o 2–3%) były szczególnie widoczne w warunkach opóźnienia terminu siewu o 14 i 28 dni. Również w badaniach Gooding i in. [2002] oraz Han i Yang [2009] zaobserwowano spadek koncentracji białka w ziarnie o ok. 3% w wyniku zwiększenia gęstości siewu ze 180–200 do 270–400 ziarniaków m^{-2} . Odwrotną zależność odnotowali w swoich badaniach Hao i in. [2022]. W badaniach autorów zwiększenie gęstości siewu z 200 do 250 ziarniaków m^{-2} spowodowało wzrost zawartości białka w ziarnie o 6%. Z kolei Zhang i in. [2018] zaobserwował najwyższą koncentrację białka w ziarnie wysiewając pszenicę w gęstości 260 ziarniaków m^{-2} . Zwiększenie lub obniżenie gęstości siewu zmniejszyło zawartość białka o 3% [Zhang i in., 2018]. Jednym z najważniejszych czynników warunkujących zawartość i skład białka w ziarnie pszenicy jest nawożenie N [Hellemans i in., 2018]. Zwiększona podaż N sprzyja wyższej akumulacji białka w ziarnie [Jankowski i in., 2015; Guerrini i in., 2020; Landolfi i in., 2021a; Wieser i in., 2023]. Jednak względy środowiskowe wymuszają ograniczenia w stosowaniu nawozów, w związku z czym potrzebne są strategie maksymalizujące zawartość/plon białka, przy jednoczesnej minimalizacji dawki N. Z tego powodu należy dążyć do zoptymalizowania nawożenia N poprzez właściwy dobór dawki, jej podział, termin aplikacji czy rodzaj nawozów [Bogard i in., 2010; Zörb i in., 2018]. Zastosowanie N w późnych stadiach wzrostu roślin pszenicy sprzyja tworzeniu się białka w jej ziarnie [Bogard i in., 2010]. W badaniach Landolfi i in. [2021a] zastosowanie N w dawce 80 lub 160 kg ha^{-1} , w 2 równych częściach (50:50) podczas krzewienia i strzelania w źdźbło, spowodowało wzrost zawartości białka w ziarnie o 15–18%. W badaniach Wieser i in. [2023] zastosowanie N tylko przed siewem spowodowało wzrost zawartości białka o 4–9%, w porównaniu do N aplikowanego przed siewem i w stadium wydłużania łodygi. W badaniach Landolfi i in. [2021b], przeprowadzonych w warunkach agroekologicznych północnych Włoch, podział dawki 160 kg N ha^{-1} na 3 części (krzewienie, strzelanie w źdźbło, kłoszenie) spowodował wzrost zawartości białka ogólnego o ok. 1%, w stosunku do 2-krotnej aplikacji. W badaniach Xue i in. [2016] podział dawki N na 3 części (BBCH 00, 30, 47) zwiększał zawartość białka w

ziarnie o 6%, w porównaniu do 2-krotnej aplikacji (BBCH 00 i 30). Metaanaliza przeprowadzona przez Hu i in. [2021b] wykazała, że podział dawki N na 3–4 części zwiększa zawartość białka w ziarnie pszenicy średnio o 2–5%. W badaniach Mor i in. [2019] równomierny podział dawki 120 lub 160 kg N ha⁻¹ na 2 części (BBCH 00 i 21) spowodował wzrost zawartości białka w ziarnie o 12%, a jej podział na 5 równych części (BBCH 00, 21, 31, 39, 65) zwiększył zawartość białka w ziarnie o 4%. W badaniach własnych największą ilość białka ogólnego w ziarnie zakumulowała pszenica ozima nawożona w dawkach 40+100 kg N ha⁻¹ aplikowanych w stadium BBCH 22–25 i 30–31. Zwiększanie pierwszej dawki N, przy jednoczesnym obniżeniu drugiej dawki (70+70 i 100+40 kg N ha⁻¹), spowodowało spadek zawartości białka ogólnego w ziarnie o 1–2%. Z kolei badania Schulz i in. [2015], przeprowadzone w warunkach siedliskowo-klimatycznych Niemiec, nie wykazały związku pomiędzy sposobem podziału dawki N a zawartością białka w ziarnie. Różna siła oddziaływania nawożenia N na zawartość białka w ziarnie pszenicy może wynikać ze zmiennej zawartości N_{min} w glebie w poszczególnych sezonach wegetacyjnych [Souza i in., 2004].

Z punktu widzenia przemysłu piekarskiego bardzo ważna jest ilość białek glutenowych w ziarnie pszenicy [Jankowski i in. 2015; Ma i in., 2019; Wieser i in., 2023]. W badaniach własnych wykazano, że zawartość glutenu mokrego była dodatnio skorelowana ze szklistością ziarna. Ziarna pszenicy ozimej uprawianej w warunkach agroekologicznych NE Polski zawierały od 34,0 do 38,3% glutenu mokrego. Wskazany zakres zawartości glutenu mokrego w ziarnie jest zbliżony do wartości podawanych przez Šip i in. [2013] dla warunków agroekologicznych Czech i znacznie wyższy od wartości podawanych przez Jaskulską i in. [2018] oraz Jańczak-Pieniążek i in. [2020b] dla warunków agroekologicznych Polski. Meena i in. [2016] wykazali, że opóźnienie terminu siewu spowodowało wzrost zawartości glutenu mokrego o 9%p. Również w badaniach własnych, najwyższą zawartość glutenu mokrego (35,9%) oznaczono w ziarnie pszenicy ozimej wysianej na początku października. Cecha ta była determinowana przez średniodobowe temperatury powietrza panujące w okresie od początku kwitnienia oraz zbioru ziarna oraz opady atmosferyczne i warunki hydrotermiczne (wskaźnik Sielianinov'a) panujące w fazie dojrzałości mleczonej ziarna. Skutkiem opóźniania terminu siewu, w badaniach własnych, było przesunięcie kwitnienia oraz dojrzewania pszenicy na korzystniejsze warunki termiczne. Również w efekcie opóźnienia terminu siewu faza dojrzałości mleczonej została przesunięta na okres wyższych opadów atmosferycznych oraz korzystniejszych warunków hydrotermicznych. W badaniach własnych wzrost gęstości siewu do 300 ziarniaków m⁻² spowodował spadek zawartości glutenu mokrego w ziarnie o 0,7%p. Negatywne oddziaływanie gęstości siewu na zawartość glutenu mokrego w ziarnie pszenicy było silniejsze w warunkach opóźnionych siewów (spadek o 0,8–1,5%p). W przypadku wysiewu pszenicy ozimej w terminie wczesnym wzrost gęstości siewu nie różnicował istotnie zawartości glutenu mokrego w ziarnie. Również w badaniach Zecevic i in. [2014] zanotowano spadek zawartości glutenu mokrego (o 6%p) w wyniku zwiększenia gęstości siewu z 500 do 650 ziarniaków m⁻². Na spadek zawartości glutenu mokrego o 3–5%p w ziarnie pszenicy pod wpływem wzrostu gęstości siewu wskazują również badania Han i Yang [2009] (180 vs. 270 ziarniaków

m⁻²), Dragoş i Pîrşan [2010] (400 vs. 500 ziarniaków m⁻²) oraz Twizerimana i in. [2020] (112 vs. 225 kg ha⁻¹). Odwrotną zależność zaobserwowali Caglar i in. [2011] oraz Guerrini i in. [2020]. W badaniach Caglar i in. [2011] wyższą zawartość glutenu zanotowano w przypadku gęstych siewów (525 i 625 ziarniaków m⁻²), a obniżenie gęstości siewu (325 i 425 ziarniaków m⁻²) zmniejszyło zawartość glutenu mokrego o 11%. Pszenica ozima, niezależnie od typu odmiany (liniowa, mieszańcowa), silnie reaguje na nawożenie N, co objawia się zróżnicowaniem plonu i jakości ziarna, w tym zwiększoną akumulacją białek glutenowych [Jaskulska i in., 2018]. W badaniach Jańczak-Pieniążek i in. [2020b] zwiększenie dawki ze 110 do 150 kg N ha⁻¹ spowodowało wzrost zawartości glutenu mokrego w ziarnie pszenicy ozimej o 7–11 (odmiany liniowe) oraz 10–16%p (odmiany mieszańcowe). Na korzystną rolę nawożenia N w kształtowaniu ilości glutenu w ziarnie obu form pszenicy (ozima i jara) wskazują również badania Podolskiej i in. [2007], Sułek i Podolskiej [2008] oraz Dubisa [2012]. Z kolei Jankowski i in. [2015] oraz Wojtkowiak i in. [2018] nie wykazali wpływu nawożenia N na zawartość glutenu mokrego, niezależnie od typu odmiany. Również w badaniach własnych sposób podziału wiosennej dawki N nie różnicowała zawartości glutenu mokrego w ziarnie. Z kolei w badaniach Mor i in. [2019] najniższą zawartość glutenu mokrego zaobserwowano w przypadku równomiernego podziału dawki 120 lub 160 kg N ha⁻¹ na 2 części (BBCH 00 i 21), a podział tych dawek na 5 równych części (BBCH 00, 21, 31, 39, 65) zwiększał zawartość glutenu o 4%.

Przy ocenie wartości wypiekowej ziarna zwraca się uwagę nie tylko na ilość, ale również na jakość białek glutenowych. Podstawowym miernikiem ich jakości jest wskaźnik sedymentacji, którego wartość świadczy o wielkości agregatów wielocząstkowych białka [Kozlovsky i in., 2009; Jankowski i in. 2015; Al-Khayri i in., 2023]. Meena i in. [2016] wykazali, że opóźnienie terminu siewu spowodowało wzrost wskaźnika sedymentacji o 4–5%. Również w badaniach Knapowskiego i Ralcewicz [2004] wyższe wartości wskaźnika sedymentacji (o 12%) osiągnęto w warunkach opóźnienia siewu pszenicy ozimej. W badaniach własnych wskaźnik sedymentacji osiągał również wyższe wartości (o 1%) w warunkach opóźnionych siewów o 28 dni, niezależnie od przebiegu warunków pogodowych w latach badań. Z kolei w warunkach agroklimatycznych Indii opóźnienie siewu o 40 dni zmniejszyło wskaźnik sedymentacji o 7% [Sharma i in., 2020]. W badaniach własnych gęstość siewu nie wpływała na wskaźnik sedymentacji, co jest zgodne z wynikami uzyskanymi przez Piekarczyka [2010] oraz Mikos-Szymańską i Podolską [2016]. W badaniach Twizerimana i in. [2020] gęstość siewu wpływała na wartość wskaźnika sedymentacji tylko w jednym roku badań, w którym wzrost masy wysiewu ziarna ze 112 do 225 kg ha⁻¹ obniżył jego wartość o 10%. Z kolei w badaniach Han i Yang [2009] oraz Hao i in. [2022] wzrost ilości wysiewanych ziaren o 50–90 szt. m⁻² obniżył wskaźnik sedymentacji o 2–7%. Jakość kompleksu białkowego w ziarnie pszenicy uzależniony jest również od intensywności technologii produkcji, w tym nawożenia N [Jankowski i in., 2015]. Badania Litke i in. [2018] wskazują na istotny wzrost wskaźnika sedymentacji na skutek zwiększenia nawożenia N aż do poziomu 210 kg ha⁻¹. Korzystny wpływ nawożenia N na jakość białka w ziarnie pszenicy ozimej i jarej zaobserwowali także Budzyński i in. [2004], Podolska i in. [2007], Piekarczyk [2010], Ellmann [2011], Dubis [2012], Rossini i in. [2018],

Kizilgeci i in. [2021] oraz Zhang i in. [2022]. W badaniach własnych korzystniej na jakość kompleksu białkowego wpłynęło zastosowanie N w dawkach 40+100 kg ha⁻¹ w stadiach BBCH 22–25 i 30–31. Zwiększenie pierwszej wiosennej dawki N (BBCH 22–25), przy jednoczesnym obniżeniu jej w stadium BBCH 30–31 (70+70 lub 100+40 kg ha⁻¹), spowodowało spadek wartości wskaźnika sedymentacji średnio o 1%. W badaniach Mor i in. [2019] równomierny podział dawki N na 5 części przyczynił się do zwiększenia wskaźnika sedymentacji o 3%, w porównaniu do aplikacji 2-krotnej. Również w badaniach Hao i in. [2023] podział 210 kg N ha⁻¹ na 4 części zwiększył wartość wskaźnika sedymentacji o 5%, w porównaniu do aplikacji 2-krotnej.

Liczba opadania świadczy o stopniu aktywności α -amylazy w ziarnie [Ma i in., 2009, Kindred i in., 2005; Jankowski i in., 2015]. W badaniach własnych udowodniono, że liczba opadania była dodatnio skorelowana z zawartością glutenu mokrego w ziarnie. Zdaniem Grausgruber i in. [2000] na aktywność α -amylazy w ziarnie największy wpływ mają czynniki genetyczne i środowiskowe, zwłaszcza warunki pogodowe w fazie dojrzewania. Również w badaniach własnych wykazano silny związek liczby opadania z układem warunków klimatycznych. Opóźnienie terminu siewu o 14 dni spowodowało wzrost liczby opadania o 3%. Przyczyną wzrostu liczby opadania mogło być przesunięcie, pod wpływem opóźnienia terminu siewu, fazy kwitnienia i dojrzewania roślin na okres wyższych średniodobowych temperatur powietrza, a fazy dojrzałości młecznej na okres obfitszych opadów atmosferycznych i korzystniejszych warunków hydrotermicznych (te wskaźniki pogody były dodatnio skorelowane z liczbą opadania). Z kolei w badaniach Knapowskiego i Ralcewicz [2004] oraz Forster i in. [2017] termin siewu nie wpływał na liczbę opadania. Związek gęstości siewu z liczbą opadania jest słaby i nie jednokierunkowy [Korres i Froud-Williams, 2001; Linina i Ruza, 2015; Forster i in., 2017]. W badaniach Forster i in. [2017], prowadzonych z pszenicą twardą, nie udowodniono wpływu gęstości siewu na liczbę opadania. Na brak związku pomiędzy gęstością siewu a aktywnością α -amylazy w ziarnie pszenicy zwyczajnej (liczba opadania) wskazują również badania Korres i Froud-Williams [2001], Piekarczyka [2010], Forster i in. [2017] oraz własne [tab. 3, **P2**]. Odmienne wyniki uzyskali Hao i in. [2022]. W badaniach autorów wraz ze wzrostem gęstości siewu z 200 do 250 ziarniaków m⁻² zaobserwowano wzrost liczby opadania o 5%. Aktywność α -amylazy w ziarnie pszenicy zależy również od poziomu intensywności technologii produkcji, w tym nawożenia N [Linina i Ruza, 2015] oraz genotypu odmiany [Kindred i in., 2005; Jańczak-Pieniążek i in., 2020b]. W badaniach Jańczak-Pieniążek i in. [2020b] aplikacja 150 kg N ha⁻¹ zwiększyła wartość liczby opadania od 0,3–1,6 (odmiana populacyjna) do 3,5% (odmiana mieszańcowa). W badaniach Linina i Ruza [2015] zaobserwowano istotny wzrost liczby opadania do dawki 180 kg N ha⁻¹. Badania Szentpétery i in. [2005] wskazują na korzystne oddziaływania podziału dawki N na liczbę opadania. W badaniach autorów zastosowanie 40 lub 80 kg N ha⁻¹ w stadium krzewienia oraz 40 kg N ha⁻¹ w stadium kwitnienia, zwiększyło liczbę opadania o 6–11%, w stosunku to 1-krotnej aplikacji 80 lub 120 kg N ha⁻¹ w stadium krzewienia. W badaniach własnych sposób podziału dawki N nie różnicował istotnie liczby opadania. Zdaniem Budzyńskiego i in. [2004] w literaturze często pojawiają się dane świadczące o odmiennym niż prezentowany powyżej wpływie

intensywności poziomu agrotechniki na liczbę opadania ze względu na znaczący udział warunków pogodowych w kształtowaniu tej cechy ziarna.

5.5. Jakość mąki

Zawartość popiołu w mące jest miarą zawartości w niej substancji mineralnych [Wei, 2002; Kulkarni i in., 2006; Piironen i in., 2009; Czaja i in., 2020]. Cecha to jest nie tylko ważna z punktu widzenia żywieniowego, ale również decyduje o typie mąki i jej przydatności technologicznej [Rothkaehl, 2012]. Zawartość popiołu w ziarnach pszenicy jest kształtowana przede wszystkim przez czynniki atmosferyczne, takie jak temperatura i wilgotność względna powietrza [Ozturk i Aydin 2004; Egesel i in., 2009; Caglar i in., 2011; Adeel i in., 2022]. Potwierdzają to również badania własne, w których najwyższą zawartość popiołu surowego oznaczono w mące pozyskanej z ziarna pszenicy ozimej uprawianej w 1 i 2 cyklu badań, tj. w sezonach wegetacyjnych z ponadprzeciętnymi temperaturami powietrza w okresie wypełniania ziarna. W badaniach własnych nie wykazano związku pomiędzy terminem i gęstością siewu oraz sposobem podziału wiosennej dawki N na zawartość popiołu w mące pszennej, co jest zgodne z wynikami uzyskanymi przez innych autorów [Garrido-Lestache i in., 2004; Jankowski i in., 2014; Munsif i in., 2015; Rodrighero i in., 2015; Rozbicki i in., 2015; Biel i in., 2016; Jaskulska i in., 2018; Warechowska i in., 2019]. Z kolei badania Adeel i in. [2022] oraz Caglar i in. [2011] wskazują na spadek zawartość popiołu w mące w miarę opóźniania terminu siewu (o 20%) oraz wzrostu gęstości siewu pszenicy (o 15%). W badaniach własnych istotnie jaśniejszą mąkę uzyskano z ziarna pszenicy ozimej wysiewanej w wysokim zagęszczeniu 400 ziarniaków m⁻² oraz nawożonej N w dawkach 100+40 kg ha⁻¹. W badaniach Jankowski i in. [2014] intensyfikacja technologii uprawy pszenicy ozimej spowodowała obniżenie barwy mąki o 0,5%p. Z kolei w badaniach Jaskulskiej i in. [2018] oraz Rodrighero i in. [2015] dawka N nie wpływała na barwę mąki.

Zawartość białka w mące odgrywa ważną rolę w kształtowaniu jakości wypieku, nadając odpowiednią lepkość, rozciągliwość, wytrzymałość i elastyczność ciasta [Wieser 2007; Xue i in., 2019]. W badaniach własnych najwyższą zawartością białka ogólnego (132 g kg⁻¹ s.m.) charakteryzowała się mąka pozyskana z ziarna pszenicy ozimej późno wysianej (początek października). Na podobny związek terminu siewu z zawartością białka w mące wskazują również badania Bagulho i in. [2015], Knapowskiego i in. [2018] oraz Adeel i in. [2022]. Wzrost zawartości białka w mące może być efektem dojrzewania późno sianej pszenicy w wyższych temperaturach powietrza – sprzyjających akumulacji tego składnika [Balla i Veisz, 2007; Hrušková i Švec, 2009; Labuschagne i in., 2009]. Wyniki badań Geleta i in. [2002], Mikos-Szymańskiej i Podolskiej [2016], Hao i in. [2022] oraz własnych [tab. 1, P3] wskazują na spadek zawartość białka wraz ze zwiększaniem gęstości siewu, odpowiednio o: 12, 2, 6 i 2%. Z kolei w badaniach Madan i Munjal [2009] gęstość siewu nie miała wpływu na zawartość białka w mące. W badaniach Xue i in. [2019] wykazano, że zwiększanie dawki N w początkowej fazie strzelania w źdźbło zmniejszało koncentrację białka w mące o 6%. Odwrotną zależność zaobserwowano w badaniach własnych, w których wykazano 2% wzrost koncentracji białka w mące wraz ze zwiększaniem dawki N w początkowej fazie strzelania w źdźbło. Różnice mogą być spowodowane efektem rozcieńczenia

składników pokarmowych w marę wzrostu plonu ziarna [Budzyński, 2012]. W badaniach Xue i in. [2019] zwiększenie dawki N na początku strzelania w źdźbło spowodowało wzrost plonu ziarna pszenicy o 2% oraz spadek zawartości białka ogólnego w mące. Z kolei w badaniach własnych [P1] zwiększenie dawki N w fazie BBCH 30–31 spowodowało obniżenie plonu ziarna oraz wzrost koncentracji białka ogólnego w mące. Również badania Johansson i in. [2004] oraz Rossmann i in. [2019] wskazują na korzystne oddziaływanie późnych dawek N na zawartość białka w ziarnie pszenicy (wzrost o 10–11%). Z kolei w badaniach Luo i in. [2000], Madan i Munjal [2009] oraz Haile i in. [2012] zawartość białka w ziarnie lub mące nie była determinowana sposobem podziału dawki N.

Wodochłonność mąki jest istotnym czynnikiem w procesie wypieku chleba, gdyż wpływ na ostateczną jakość produktów piekarniczych [Linlaud i in., 2009; Sapirstein i in., 2018]. W badaniach własnych opóźnianie terminu siewu zwiększało (o 1,1%p) wodochłonność mąki, co jest zgodne z badaniami Zhang i in. [2023] (wzrost o 3,4%p). Zwiększenie wodochłonności mąki w miarę opóźnienia terminu siewu pszenicy może wynikać z przesunięcia terminu dojrzewania ziarna na okres wysokich temperatur powietrza, które sprzyjają akumulacji białka, kosztem ograniczonej syntezy i magazynowania węglowodanów [Ozturk i Aydin 2004; Maningat i in., 2009]. Według Huang i in. [2024] opóźniony siew modyfikuje jakość skrobi poprzez wpływ na jej krystaliczność, poprawiając jej kleikowanie. Jednak zdaniem Zang i in. [2022] nadmierne opóźnienie siewu może odwrócić ten efekt. Stąd w badaniach Knapowskiego i in. [2018] oraz Caglar i in. [2023] przesunięcie terminu siewu zmniejszyło wodochłonności mąki, odpowiednio o: 1,1 oraz 3,9%p. Gęstość siewu słabo różnicuje wodochłonności mąki [Han i Yang, 2009; de Pelegrin i in., 2016; Gawęda i in., 2019; Chen i Yang, 2023; badania własne: tab. 1, P3]. Może to być wynikiem słabego wpływu tej praktyki agronomicznej na zawartości białka oraz skrobi w ziarnie [Nakano i Morita, 2009; Gaile i in., 2017; Mosanaei i in., 2017]. Podział dawki i późniejsza aplikacja części N może zwiększać wodochłonność mąki [Blandino i in., 2016; Xue i in., 2019; Chen i Yang, 2023]. W badaniach Xue i in. [2019] podział dawki N na 3 części (BBCH 00, 30, 45) zwiększał wodochłonności mąki o 3%p, w porównaniu do podziału na 2 części (BBCH 00, 30). Z kolei w badaniach Blandino i in. [2016] aplikacja dolistna N w fazie kwitnienia (5 kg ha^{-1}) lub aplikacja dogłębowa na początku kłoszenia (40 kg N ha^{-1}) spowodowały wzrost absorpcji wody przez mąkę odpowiednio o: 2 i 4%. Badania własne nie potwierdziły związku pomiędzy sposobem podziału dawki N a wodochłonnością mąki. Na brak tego związku wskazują również badania Warechowskiej i in. [2019]. Brak związku pomiędzy sposobem podziału dawki N a wodochłonnością mąki w badaniach Warechowskiej i in. [2019] oraz własnych może wynikać z relatywnie niskiej zawartości białka ogólnego w ziarnie pszenicy ozimej (odpowiednio: 128–139 i 129–132 g kg^{-1} s.m.) oraz słabego jego zróżnicowania pod wpływem nawożenia N (odpowiednio: ± 3 –5 i 2%). W badaniach Blandino i in. [2016] ziarno pszenicy zawierało o 4–9% więcej białka ogólnego, a nawożenie N różnicowało jego koncentrację w znacznie szerszym zakresie ($\pm 8\%$) niż w badaniach Warechowskiej i in. [2019] oraz własnych.

5.6. Właściwości reologiczne ciasta oraz jakość pieczywa

W badaniach własnych przesunięcie siewu pszenicy na początek października spowodowało wydłużenie rozwoju ciasta o 6%. Na podobny związek pomiędzy terminem siewu a czasem rozwoju ciasta wskazują badania Zhang i in. [2023] przeprowadzone w warunkach agroekologicznych Chin. Wpływ gęstości siewu na czas rozwoju ciasta nie jest jednoznaczny. W badaniach Gawędy i in. [2019] nie zaobserwowano zmiany czasu rozwoju ciasta pod wpływem zwiększenia gęstości siewu. Podobnie, w badaniach własnych gęstość siewu pszenicy ozimej nie różnicowała istotnie czasu rozwoju ciasta. Z kolei badania Han i Yang [2009] oraz Hao i in. [2022] wskazują na skrócenie czasu rozwoju ciasta wraz ze zwiększaniem gęstości siewu. Zhang i in. [2016] wskazują na związek pomiędzy gęstością siewu a dawką N we wpływie na czas rozwoju ciasta. W badaniach autorów czas rozwoju ciasta skracał się wraz ze zwiększaniem gęstości siewu przy braku nawożenia N, natomiast zastosowanie 240 kg N ha⁻¹ wydłużało czas rozwoju ciasta. Również w badaniach Jankowskiego i in. [2014] zwiększenie wiosennego nawożenia N spowodowało wzrost rozwoju ciasta o 38%. Badania Blandino i in. [2016] wykazały korzystny wpływ późnej aplikacji N na czas rozwoju ciasta. W badaniach autorów dodatkowa aplikacja 40 kg N ha⁻¹ na początku kłoszenia roślin pszenicy wydłużyła czas rozwoju ciasta o 49%, a zastosowanie N dolistnie w fazie pełni kwitnienia wydłużyło czas rozwoju ciasta o 32%. W badaniach własnych sposób podziału dawki N nie różnicował istotnie czasu rozwoju ciasta. Wpływ aplikacji N na czas rozwoju ciasta (jego wydłużenie) raportowany przez Jankowskiego i in. [2014] oraz Blandino i in. [2016] był efektem przede wszystkim zwiększenia sumarycznej dawki N. W badaniach własnych wiosenna dawka N była stała (140 kg ha⁻¹), zmieniał się tylko sposób jej podziału, co mogło być powodem braku istotnego wpływu N na czas rozwoju ciasta.

W badaniach własnych wykazano silny wpływ terminu i gęstości siewu oraz sposobu podziału dawki N na stałość ciasta. Najwyższą stałością (7.7–8.4 min) charakteryzowało się ciasto wytworzone z mąki pszenicy ozimej wysianej późno (początek października), w największej gęstości (400 ziarniaków m⁻²) oraz nawożonej w dawkach 100+40 kg N ha⁻¹. Również w badaniach Zhang i in. [2023] obserwowano wzrost stałości ciasta (o 17%) w miarę opóźnienia terminu siewu o 50 dni. Z kolei w badaniach Dong i in. [2021] na stałość ciasta pozytywnie wpłynął wczesny termin siewu, wysoka gęstość siewu oraz wysoka dawka N w fazie strzelania w źdźbło (BBCH 30–31). Badania Zhang i in. [2016] wykazały, że wpływ gęstości siewu na stałość ciasta był determinowany poziomem nawożenia N. W badaniach autorów stałość ciasta zwiększała się wraz ze zwiększaniem gęstości tylko w warunkach obfitego nawożenia N (240 kg ha⁻¹). Również w badaniach Han i Yang [2009] stałość ciasta była zależna od gęstości siewu. Wraz ze wzrostem gęstości siewu z 90 do 270 ziarniaków m⁻² czas stałości ciasta skrócił się o 16%. W badaniach Zhang i in. [2016] aplikacja 240 kg N ha⁻¹ wydłużyła czas stałości ciasta o 42%, w porównaniu do obiektu bez nawożenia N. Również badania Jankowskiego i in. [2014] wykazały prawie 3-krotny wzrost stałości ciasta pod wpływem intensyfikacji technologii uprawy pszenicy ozimej. Z kolei badania Rodighero [2015], Blandino i in. [2016], Souza i in. [2019], Xue i in. [2019], Keres i in.

[2021] oraz Cesevičienė i in. [2022] wskazują na brak związku pomiędzy stałością ciasta a nawożeniem N.

W badaniach Zhang i in. [2023] rozmiękczenie ciasta zmniejszało się w miarę przesuwania terminu siewu, co jest zgodne z wynikami badań własnych [tab. 2, P3]. W badaniach własnych nie udowodniono związku pomiędzy gęstością siewu a rozmiękczeniem ciasta. Również Biel i in. [2016] nie wykazał, aby rozmiękczenie ciasta zależało od gęstości siewu. Gawęda i in. [2019] wskazuje na silny związek gęstości siewu z warunkami klimatyczno-siedliskowymi we wpływie na rozmiękczenie ciasta. W badaniach autorów nastąpił wzrost rozmiękczenia ciasta pod wpływem zwiększonej gęstości siewu pszenicy tylko w sezonie charakteryzującym się niską sumą opadów w czerwcu. Wpływ nawożenia N na rozmiękczenie ciasta nie jest jednokierunkowy [Fleitas i in., 2018; Kunkulberga i in., 2019; Keres i in., 2021; badania własne: tab. 2, P3]. W badaniach Keres i in. [2021] oraz własnych nawożenie N nie wpływało na rozmiękczenie ciasta. Z kolei Kunkulberga i in. [2019] zwiększając nawożenie N zaobserwował wzrost rozmiękczenia ciasta. Natomiast w badaniach Fleitas i in. [2018] wzrost dawki N zmniejszał wartości liczbowe tej cechy. Również w badaniach Jankowskiego i in. [2014] intensyfikacja technologii produkcji ziarna pszenicy ozimej spowodowała zmniejszenie (o 27%) rozmiękczenia ciasta.

Gęstość i objętość chleba decydują głównie o jego walorach smakowych [Dziki i in., 2010; Różyło i Laskowski, 2011]. Konsumenci preferują dużą objętość chleba oraz niską gęstość miękiszu [Sahi i in., 2014]. Gęstość miękiszu jest parametrem opisującym porowatość chleba i związana jest z właściwościami glutenu [Lagrain i in., 2012]. W badaniach własnych tylko sposób zarządzania siewem pszenicy ozimej różnicował istotnie jakość pieczywa mierzoną gęstością miękiszu i objętością chleba. Chleb o mniejszej gęstości miękiszu ($0,24 \text{ g cm}^{-3}$) uzyskano z mąki pszenicy ozimej wysianej w połowie września (+14 dni). Opóźniony siew zmniejszał gęstość miąższu, ponieważ rośliny pszenicy były narażone na wyższe średniodobowe temperatury powietrza podczas dojrzewania ziarna. Z kolei największą objętością (347 cm^3) charakteryzował się chleb uzyskany z mąki pszenicy wysianej w zagęszczeniu $400 \text{ ziarniaków m}^{-2}$. Odmienne wyniki uzyskali Dong i in. [2021]. W badaniach autorów największą objętością (808 cm^3) charakteryzował się chleb uzyskany z mąki pszenicy wysianej wcześniej. Opóźnienie terminu siewu o 21 dni spowodowało spadek objętości chleba o 11%. W badaniach Zhang i in. [2016] wraz ze wzrostem gęstości siewu ze 120 do $240 \text{ ziarniaków m}^{-2}$ objętość chleba zwiększyła się o 7%. Również na korzystny wpływ gęstości siewu pszenicy na objętość chleba wskazują badania Dong i in. [2021]. Nawożenie N pszenicy korzystnie wpływa na objętość chleba [Knapowski i Ralcewicz, 2004; Dong i in., 2021], pogarszając jednak gęstość jego miękiszu (zmniejszenie porowatości) [Guerrini i in., 2020]. W badaniach własnych nie udowodniono związku pomiędzy jakością pieczywa a sposobem podziału wiosennej dawki N. Wykazano związek pomiędzy jakością pieczywa a zawartością popiołu w mące. Wzrost zawartości popiołu spowodował obniżenie objętości chleba i wzrost gęstości miękiszu. Zastosowany przez nas podział wiosennej dawki N nie różnicował zawartości popiołu w mące, co mogło być przyczyną braku jego oddziaływania na jakość pieczywa.

6. Wnioski

1. W północno-wschodniej Polsce termin siewu pszenicy ozimej można przesunąć na koniec sierpnia lub początek października bez szkody dla wydajności ziarna. Opóźnione terminy siewu nie obniżały, a powodowały nawet wyższą plonowość ziarna ($1.16\text{--}1.22\text{ Mg ha}^{-1}$, tj. o 12–13%), dzięki większej liczbie kłosów na 1 m^2 (o 10–12%) i większej MTZ (o 1–2%), w stosunku do siewu wczesnego (początek sierpnia).
2. Najkorzystniej na wydajność ziarna pszenicy ozimej wpływał wysiew 400 ziarniaków m^{-2} . Wzrost plonowania pszenicy ozimej wysianej w zagęszczeniu 400 ziarniaków m^{-2} był efektem korzystnego wpływu tej gęstości siewu na liczbę kłosów m^{-2} .
3. Największą produktywnością wykazywał się N zastosowany wiosną w dawkach $40+100\text{ kg ha}^{-1}$, ze względu na korzystne oddziaływanie na liczbę kłosów m^{-2} .
4. Termin siewu modyfikował pojawienie się i czas trwania poszczególnych faz rozwojowych roślin, co różnicowało warunki wilgotnościowo-termiczne podczas ich występowania. Wyrównanie oraz twardość ziarna były dodatnio skorelowane ze średniodobowymi temperaturami powietrza od początku kwitnienia do zbioru roślin. Szklistość ziarna była dodatnio skorelowana z temperaturami powietrza panującymi w fazie dojrzałości woskowej. Zawartość białka ogólnego w ziarnie była dodatnio skorelowana z warunkami hydrotermicznymi (GDD, opady atmosferyczne, wskaźnik Sielianinov'a) panującymi w okresie od początku kwitnienia do dojrzałości pełnej ziarna. Zawartość glutenu mokrego oraz liczba opadania były dodatnio skorelowane ze średniodobową temperaturą powietrza w okresie od początku kwitnienia do zbioru oraz z opadami atmosferycznymi i warunkami hydrotermicznymi w stadium dojrzałości młeczej.
5. Opóźnienie terminu siewu spowodowało przesunięcie kwitnienia oraz dojrzewanie roślin pszenicy ozimej na korzystniejsze warunki wilgotnościowo-termiczne, co spowodowało wzrost gęstości, szklistości i twardości ziarna, wyciągu mąki, zawartości białka ogólnego, zawartości glutenu mokrego, wskaźnika sedymentacji oraz liczby opadania.
6. Wysiew 200 ziaren m^{-2} zapewniał korzystniejsze wyrównanie ziarna, a także większą jego szklistość oraz zawartość białka ogólnego i glutenu mokrego.
7. Większa podaż N w stadium intensywnego wzrostu pszenicy ozimej (BBCH 30–31) korzystnie wpływała na szklistość i twardość ziarna, wyciąg mąki, a także zawartość białka ogólnego i glutenu mokrego w ziarnie oraz wartość wskaźnika sedymentacji.
8. W warunkach agroekologicznych NE Polski optymalne właściwości przemiałowe ziarna pszenicy ozimej można uzyskać wysiewając ją pod koniec września lub na początku października w ilości 200 ziaren m^{-2} i nawożąc w dawkach $40+100\text{ kg N ha}^{-1}$ w stadiach BBCH 22–25 i 30–31.
9. Mąkę lepszej wartości wypiekowej uzyskano z przemiału ziarna pszenicy ozimej wysianej w terminie od połowy września do początku października. Opóźnienie terminu siewu spowodowało wzrost zawartości białka ogólnego w mące pszennej, korzystnie wpłynęło na zdolność mąki do

absorbpcji wody oraz na rozwój, stałość i rozmiękczenie ciasta. Opóźnienie terminu siewu spowodowało zmniejszenie gęstości miękiszu chleba (cecha pożądana przez konsumentów), nie pogarszając jego objętości.

10. Wysiew pszenicy ozimej w zagęszczeniu 400 ziarniaków m^{-2} poprawił barwę mąki (bez obniżenia zawartości popiołu surowego w mące) oraz korzystnie wpłynął na stałość ciasta i objętość chleba.
11. Największą zawartość białka ogólnego w mące uzyskano po przesunięciu części dawki N ze stadium BBCH 22–25 do BBCH 30–31 ($40+100\text{ kg N ha}^{-1}$). Z kolei korzystniejszą barwę mąki oraz stałość ciasta uzyskano po zwiększeniu dawki N w stadium BBCH 22–25 ($100+40\text{ kg N ha}^{-1}$).
12. Jakość mąki, właściwości reologiczne ciasta oraz jakość chleba były głównie determinowane zawartością popiołu surowego w mące. W warunkach niskiej zawartości popiołu surowego obniżała się zawartość białka ogólnego w mące oraz jej wodochłonność. Jednak niska zawartość popiołu surowego miała pozytywny wpływ na kolor mąki, stabilność oraz stopień rozmiękczenia ciasta, objętość chleba i gęstość jego miękiszu. Zabiegi agrotechniczne obniżające zawartość popiołu w mące mogą sprzyjać uzyskaniu dobrej jakości pieczywa poprzez korzystny wpływ na właściwości reologiczne ciasta. Uzyskaniu niskiej zawartości popiołu surowego w mące sprzyjał wysiew pod koniec września lub na początku października 400 ziarniaków pszenicy m^{-2} oraz wiosenna aplikacja $100+40\text{ kg N ha}^{-1}$.

7. Spis literatury

- Abd El-Lattief, E.A. Determining the optimization seeding rate for improved productivity of wheat under Southern Egypt conditions. *Int. J. Agron. Agric. Res.* **2014**, *4*, 47–57.
- Abubakar, S.A.; Hamani, A.K.M.; Chen, J.; Traore, A.; Abubakar, N.A.; Usman Ibrahim, A.; Duan, A. Optimized drip fertigation scheduling improves nitrogen productivity of winter wheat in the North China Plain. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* **2022**, *22*, 2955–2968.
- Acharya, R.; Marahatta, S.; Amgain, L.P. Response of wheat cultivars in different agricultural practices differed by sowing date. *Int. J. Appl. Sci. Biotechnol.* **2017**, *5*, 250–255.
- Ácin, V. Sowing Dates and Densities in a Function of Winter Wheat Yield in the Long-Term Field Trial. Ph.D. Thesis, University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Nowy Sad, Serbia, 2016. (In Serbian)
- Adeel, M.; Nazir, A.; Aziz, H. Impact of sowing dates and terminal heat stress on wheat grain flour physical and chemical properties. *Jammu Kashmir J. Agric.* **2022**, *2*, 25–34.
- Ahmadi, G.H.; Kahrizi, D.; Mohammadi, G.; Shirkhani, A. Effects of sowing density on yield and yield components of irrigated bread wheat cultivars. *Agric. Food Sci.* **2011**, *5*, 91–95.
- Ahmed, M.; Hassan, F. Response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) quality traits and yield to sowing date. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0126097.
- Ainsworth, E.A.; Ort, D.R. How do we improve crop production in a warming world? *Plant Physiol.* **2010**, *154*, 526–530.
- Akhter, S.; Kotru, R.; Lone, B.A.; Jan, R. Effect of split application of potassium and nitrogen on wheat (*Triticum aestivum*) growth and yield under temperate Kashmir. *Indian J. Agron.* **2017**, *62*, 49–53.
- Al-Khayri, J.; Alshegaihi, R.; Mahgoub, E.I.; Mansour, E.; Atallah, O.; Sattar, M.; Al-Mssallem, M.; Alessa, F.; Aldaej, M.; Hassanin, A. Association of high and low molecular weight glutenin subunits with gluten strength in tetraploid durum wheat (*Triticum turgidum* spp. *durum* L.). *Plants* **2023**, *12*, 1416.
- Al-Saleh, A.; Brennan, C.S. Bread wheat quality: Some physical, chemical and rheological characteristics of Syrian and English bread wheat samples. *Foods* **2012**, *1*, 3–17.
- Alabi, M.O.; Ngwenyama, O. Food security and disruptions of the global food supply chains during COVID-19: Building smarter food supply chains for post COVID-19 era. *Br. Food J.* **2023**, *125*, 167–185.
- Alexandratos, N.; Bruinsma, J. *World Agriculture: Towards 2030/2050*; ESA Working Paper No. 12–03; FAO: Rzym, Włochy, 2012.
- Ali, M.; Ali, L.; Sattar, M.; Ali, M.A. Improvement in wheat (*Triticum aestivum* L.) yield by manipulating seed rate and row spacing in Vehari zone. *J. Anim. Plant Sci.* **2010**, *20*, 225–230.
- Alignan, M.; Roche, J.; Bouniols, A.; Cerny, M.; Mouloungui, Z.; Merah, O. Effects of genotype and sowing date on phytosterol content and agronomic traits in wheat under organic agriculture. *Food Chem.* **2009**, *117*, 219–225.
- Amjid, M.R.; Shehzad, A.; Hussain, S.; Shabbir, M.A.; Khan, M.R.; Shoaib, M. A comprehensive review on wheat flour dough rheology. *Pak. J. Food Sci.* **2013**, *23*, 105–123.
- Arduini, I.; Masoni, A.; Ercoli, L.; Mariotti, M. Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate. *Eur. J. Agron.* **2006**, *25*, 309–318.
- Asseng, S.; Jameison, P.D.; Kimball, B.; Pinter, P.; Sayre, K.; Bowden, J.W.; Howden, S.M. Simulated wheat growth affected by rising temperature increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Res.* **2004**, *85*, 85–102.
- Aydoğan, S.; Şahin, M.; Akçacık, A. Relationships between farinograph parameters and bread volume, physicochemical traits in bread wheat flours. *Crop Sci.* **2015**, *3*, 14–18.
- Bagulho, A.S.; Costa, R.; Almeida, A.S.; Pinheiro, N.; Moreira, J.; Gomes, C.; Coco, J.; Costa, A.; Coutinho, J.; Maças, B. Influence of year and sowing date on bread wheat quality under Mediterranean conditions. *Emir. J. Food Agric.* **2015**, *27*, 186–199.
- Bailey-Serres, J.; Parker, J.E.; Ainsworth, E.A.; Oldroyd, G.E.D.; Schroeder, J.I. Genetic strategies for improving crop yields. *Nature* **2019**, *575*, 109–118.
- Baldock, D.; Buckwell, A. *Just transition in the EU agriculture and land use sector*; Institute for European Environmental Policy: Londyn, UK, 2021.
- Balla, K.; Veisz, O. Changes in the quality of cereals in response to heat and drought stress. *Acta Agron. Óvar.* **2007**, *49*, 451–455.
- Baloch, M.S.; Shah, I.T.H.; Nadim, M.A.; Khan, M.I.; Khakwani, A.A. Effect of seeding density and planting time on growth and yield attributes of wheat. *J. Anim. Plant Sci.* **2010**, *20*, 239–240.
- Barak, S.; Mudgil, D.; Khatkar, B.S. Biochemical and functional properties of wheat gliadins: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2015**, *55*, 357–368.
- Basso, B.; Cammarano, D.; Fiorentino, C.; Ritchie, J.T. Wheat yield response to spatially variable nitrogen fertilizer in Mediterranean environment. *Eur. J. Agron.* **2013**, *51*, 65–70.
- Bavec, M.; Bavec, F.; Varga, B.; Kovacevic, V. Relationship among yield, it's quality and yield components in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars affected by seeding rates. *Die Bodenkultur* **2002**, *53*, 143–151.
- Behnassi, M.; El Haiba, M. Implications of the Russia-Ukraine war for global food security. *Nat. Hum. Behav.* **2022**, *6*, 754–755.
- Belete, F.; Dechassa, N.; Molla, A.; Tana, T. Effect of split application of different N rates on productivity and nitrogen use efficiency of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agric. Food Secur.* **2018**, *7*, 92.
- Bhattacharya, A. Global climate change and its impact on agriculture. In *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2019; ss. 1–50.
- Bhattacharai, D.; Abagandura, G.O.; Nleya, T.; Kumar, S. Responses of soil surface greenhouse gas emissions to nitrogen and sulfur fertilizer rates to *Brassica carinata* grown as a bio-jet fuel. *GCB Bioenergy* **2021**, *13*, 627–639.
- Biel, W.; Stankowski, S.; Sobolewska, M.; Sadkiewicz, J.; Jaroszewska, A.; Puzyński, S. Effect of selected agronomic factors on the baking quality of winter spelt strains and cultivars (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L.) in comparison with common wheat (*Triticum aestivum* ssp. *vulgare*). *Rom. Agric. Res.* **2016**, *33*, 251–258.

- Bielski, S.; Marks-Bielska, R.; Zielińska-Chmielewska, A.; Romanekas, K.; Šarauskis, E. Importance of agriculture in creating energy security—A case study of Poland. *Energies* **2021**, *14*, 2465.
- Blandino, M.; Marinaccio, F.; Reyneri, A. Effect of late-season nitrogen fertilization on grain yield and on flour rheological quality and stability in common wheat, under different production situations. *Ital. J. Agron.* **2016**, *11*, 107–113.
- Blandino, M.; Marinaccio, F.; Vaccino, P.; Reyneri, A. Nitrogen fertilization strategies suitable to achieve the quality requirements of wheat for biscuit production. *Agron. J.* **2015**, *107*, 1584–1594.
- Bogard, M.; Allard, V.; Brancourt-Hulmel, M.; Heumez, E.; Machet, J.M.; Jeuffroy, M.H.; Gate, P.; Martre, P.; Le Gouis, J. Deviation from the grain protein concentration-grain yield negative relationship is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat. *J. Exp. Bot.* **2010**, *61*, 4303–4312.
- Bokan, N.; Malešević, M. The planting density effect on wheat yield structure. *Acta Agric. Serb.* **2004**, *9*, 65–79.
- Božek, K.S.; Żuk-Gołaszewska, K.; Bojarczuk, J.; Gołaszewski, J. The Effect of different nitrogen fertilizer rates, sowing density, and plant growth regulator application on the quality and milling value of *Triticum durum* Desf. grain. *Agronomy* **2022**, *12*, 1622.
- Braun, H.J.; Atlin, G.; Payne, T.; Reynolds, M.P. Multi-location testing as a tool to identify plant response to global climate change. W: *Climate Change and Crop Production*; Reynolds, M.P., Red.; CABI: Wallingford, UK, 2010; ss. 115–138.
- Breiman, A.; Graur, D. Wheat evolution. *Isr. J. Plant Sci.* **1995**, *43*, 85–98.
- Brzozowska, I.; Brzozowski, J.; Hruszka, M. Plonowanie i struktura plonu pszenicy ozimej w zależności od sposobu pielęgnacji i nawożenia azotem. *Acta Agropys.* **2008**, *11*, 597–611.
- Buczek, J.; Bobrecka-Jamro, D. Assessment of qualitative parameters of population and hybrid wheat grain depending on the production technology. *Acta Agrophys.* **2015**, *22*, 247–259.
- Buczek, J.; Bobrecka-Jamro, D. Reakcja pszenicy populacyjnej i mieszańcowej na zróżnicowaną ilość wysiewu. *Fragm. Agron.* **2015**, *32*, 7–16.
- Buczek, J.; Jarecki, W.; Bobrecka-Jamro, D. The response of population and hybrid wheat to selected agro-environmental factors. *Plant Soil Environ.* **2016**, *62*, 67–73.
- Buczek, J.; Jarecki, W.; Jańczak-Pieniążek, M.; Bobrecka-Jamro, D. Hybrid wheat yield and quality related to cultivation intensity and weather condition. *J. Elem.* **2020**, *25*, 71–83.
- Buczek, J.; Migut, D.; Jańczak-Pieniążek, M. Effect of soil tillage practice on photosynthesis, grain yield and quality of hybrid winter wheat. *Agriculture* **2021**, *11*, 479.
- Budzyński, W. Pszenica zwyczajna. W: *Pszenice – zwyczajna, orkisz, twarda. Uprawa i zastosowanie*; Budzyński, W., Red.; PWRiL: Poznań, Polska, 2012; ss. 23–150.
- Budzyński, W.; Bielski, S.; Borysewicz, J. Wpływ nawożenia azotem na jakość technologiczną ziarna pszenicy ozimej. *Fragm. Agron.* **2008**, *25*, 27–38.
- Budzyński, W.; Bielski, S. Wpływ nawożenia azotem na plonowanie pszenicy ozimej. *Fragm. Agron.* **2008**, *25*, 27–38.
- Budzyński, W.; Borysewicz, J.; Bielski, S. Wpływ poziomu nawożenia azotem na plonowanie i jakość technologiczną ziarna pszenicy ozimej. *Pam. Puł.* **2004**, *135*, 33–44.
- Budzyński, W.S.; Bepirszcz, K.; Jankowski, K.J.; Dubis, B.; Hłasko-Nasalska, A.; Sokółski, M.M.; Olszewski, J.; Załuski, D. The responses of winter cultivars of common wheat, durum wheat and spelt to agronomic factors. *J. Agric. Sci.* **2018**, *156*, 1163–1174.
- Caglar, O.; Bulut, S.; Karaoglu, M.M.; Kotancilar, H.G.; Ozturk, A. Quality response of facultative wheat to winter sowing, freezing sowing and spring sowing at different seeding rates. *J. Anim. Vet. Adv.* **2011**, *10*, 3368–3374.
- Caglar, O.; Yildiz, G.; Karaoglu, M.M.; Ozturk, A.; Bulut, S. The effects of sowing times and seeding rates on the farinograph parameters and color of facultative kirik wheat. *Fresenius Environ. Bull.* **2023**, *32*, 2918–2924.
- Carr, P.M.; Horsley, R.D.; Poland, W.W. Tillage and seeding rate effects on wheat cultivars: I. Grain production. *Crop Sci.* **2003**, *43*, 202–209.
- Carson, G.R.; Edwards, N.M. Criteria of wheat and flour quality. W: *Book Wheat: Chemistry and Technology*, 4th ed.; Khan, K., Shewry, P.R., Red.; AACCI International: St. Paul, MN, USA, 2009; ss. 97–118.
- Carvalho, J.M.G.; Bonfim-Silva, E.M.; Da Silva, T.J.A.; Sousa, H.H.D.F.; Guimarães, S.L.; Pacheco, A.B. Nitrogen and potassium in production, nutrition and water use efficiency in wheat plants. *Cienc. Investig. Agrar.* **2016**, *43*, 442–451.
- Cesevičienė, J.; Gorash, A.; Liatukas, Ž.; Armonienė, R.; Ruzgas, V.; Statkevičiūtė, G.; Jaškūnė, K.; Brazauskas, G. Grain yield performance and quality characteristics of waxy and non-waxy winter wheat cultivars under high and low-input farming systems. *Plants* **2022**, *11*, 882.
- Chang, C.; Zhang, H.; Lu, J.; Si, H.; Ma, C. Genetic improvement of wheat with pre-harvest sprouting resistance in China. *Genes* **2023**, *14*, 837.
- Chen, C.; Neill, K.; Wichman, D.; Westcott, M. Hard red spring wheat response to row spacing, seeding rate, and nitrogen. *Agron. J.* **2008**, *100*, 1296–1302.
- Chen, Y.; Yang, P.; Li, H. Simulation study on effects of planting density and sowing date on grain quality of winter wheat. *J. Agric. Sci. Technol.* **2023**, *24*, 143–153.
- Cichoń, Z.; Ptak, M. Analiza jakościowa wybranych rodzajów mąki pszennej. *Zesz. Nauk. Akad. Ekon. Krakowie* **2005**, *678*, 89–102.
- Coventry, D.R.; Gupta, R.K.; Yadav, A.; Poswal, R.S.; Chhokar, R.S.; Sharma, R.K.; Yadav, V.K.; Gill, S.C.; Kumar, A.; Mehta, A.; Kleemann, S.G.L.; Bonamano, A.; Cummins, J.A. Wheat quality and productivity as affected by varieties and sowing time in Haryana, India. *Field Crops Res.* **2011a**, *123*, 214–225.
- Coventry, D.R.; Yadav, A.; Poswal, R.S.; Sharma, R.K.; Gupta, R.K.; Chhokar, R.S.; Gill, S.C.; Kumar, V.; Kumar, A.; Mehta, A.; Kleemann, S.G.L.; Cummins, J.A. Irrigation and nitrogen scheduling as a requirement for optimising wheat yield and quality in Haryana, India. *Field Crops Res.* **2011b**, *123*, 80–88.
- Cui, Z.; Zhang, H.; Chen, X.; Zhang, C.; Ma, W.; Huang, C.; Zhang, W.; Mi, G.; Miao, Y.; Li, X.; Gao, Q.; Yang, J.; Wang, Z.; Ye, Y.; Guo, S.; Lu, J.; Huang, J.; Lv, S.; Sun, Y.; Liu, Y.; Peng, X.; Ren, J.; Li, S.; Deng, X.; Shi, X.; Zhang, Q.; Yang, Z.; Tang, L.; Wei, C.; Jia, L.; Zhang,

- J.; He, M.; Tong, Y.; Tang, Q.; Zhong, X.; Liu, Z.; Cao, N.; Kou, C.; Ying, H.; Yin, Y.; Jiao, X.; Zhang, Q.; Fan, M.; Jiang, R.; Zhang, F.; Dou, Z. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature* **2018**, *7696*, 363–366.
- Czaja, T.; Sobota, A.; Szostak, R. Quantification of ash and moisture in wheat flour by Raman spectroscopy. *Foods* **2020**, *9*, 280.
- Dai, X.; Wang, Y.; Dong, X.; Qian, T.; Yin, L.; Dong, S.; He, M. Delayed sowing can increase lodging resistance while maintaining grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat. *Crop J.* **2017**, *5*, 541–552.
- Dai, X.; Xiao, L.; Jia, D.; Kong, H.; Wang, Y.; Li, C.; Zhang, Y.; He, M. Increased plant density of winter wheat can enhance nitrogen-uptake from deep soil. *Plant Soil* **2014**, *384*, 141–152.
- Dai, X.; Zhou, X.; Jia, D.; Xiao, L.; Kong, H.; He, M. Managing the seeding rate to improve nitrogen-use efficiency of winter wheat. *Field Crops Res.* **2013**, *154*, 100–109.
- Dalia, A.A.; Hag, D.A.E. Effect of seeding rates on yield and yield components of two bread wheat cultivars. *J. Agric. Res.* **2016**, *42*, 71–81.
- Dargie, S.; Wogi, L.; Kidanu, S. Nitrogen use efficiency, yield, and yield traits of wheat response to slow-releasing N fertilizer under balanced fertilization in Vertisols and Cambisols of Tigray, Ethiopia. *Cogent Environ. Sci.* **2020**, *6*, 1778996.
- de Pelegrin, A.J.; Carvalho, I.R.; Ferrari, M.; Nardino, M.; Szareski, V.J.; Meira, D.; Wartha, C.A.; Follman, D.N.; de Pelegrin, C.M.G.; Gutkoski, L.C.; de Oliveira, A.C.; da Maia, L.C.; de Souza, V.Q. Evaluation of solvent retention capacity of wheat (*Triticum aestivum* L.) flour depending on genotype and different timing of nitrogenous fertilizer application. *Afr. J. Agric. Res.* **2016**, *11*, 4389–4394.
- Dilmurodovich, D.S.; Bekmurodovich, B.N.; Shakirjonovich, K.N. Creation of new drought-resistant, high-yielding and high-quality varieties of bread wheat for rainfed areas. *Br. J. Glob. Ecol. Sustain. Dev.* **2022**, *2*, 61–73.
- Ding, D.; Feng, H.; Zhao, Y.; He, J.; Zou, Y.; Jin, J. Modifying winter wheat sowing date as an adaptation to climate change on the Loess Plateau. *Agron. J.* **2016**, *108*, 53–63.
- Dizlek, H.; Girard, A.L.; Awika, J.M. High protein and gliadin content improves tortilla quality of a weak gluten wheat. *LWT* **2022**, *160*, 113320.
- Djouadi, K.; Mekliche, A.; Dahmani, S.; Ladjar, N.I.; Abid, Y.; Silarbi, Z.; Hamadache, A.; Pisante, M. Durum wheat yield and grain quality in early transition from conventional to conservation tillage in semi-arid mediterranean conditions. *Agriculture* **2021**, *11*, 711.
- Domagała, J. Economic and environmental aspects of agriculture in the EU countries. *Energies* **2021**, *14*, 7826.
- Donaldson, E.; Schillinger, W.F.; Dofing, S.M. Straw production and grain yield relationships in winter wheat. *Crop Sci.* **2001**, *41*, 100–106.
- Dong, S.; Zhang, X.; Chu, J.; Zheng, F.; Fei, L.; Dai, X.; He, M. Optimized seeding rate and nitrogen topdressing ratio for simultaneous improvement of grain yield and bread-making quality in bread wheat sown on different dates. *J. Sci. Food Agric.* **2021**, *102*, 360–369.
- Dragoș, M.; Pîrșan, P. Research concerning the influence of sowing period and sowing density on the protein, gluten and starch content of autumn wheat in western Romania. *Res. J. Agric. Sci.* **2010**, *42*, 57–62.
- Dubey, R.; Pathak, H.; Singh, S.; Chakravarti, B.; Thakur, A.K.; Fagodia, R.K. Impact of sowing dates on terminal heat tolerance of different wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Acad. Sci. Lett.* **2019**, *42*, 445–449.
- Dubis, B. Rolnicza i energetyczno-ekonomiczna ocena produkcji ziarna pszenicy jarej na cele konsumpcyjne. W: *Rozprawy i Monografie*; Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie: Olsztyn, Polska, 2012; 171, s. 130.
- Dunăreanu, I.C.; Bonea, D. Grain yield and hectolitre weight of some wheat cultivars in organic and conventional production systems. *Rom. Agric. Res.* **2022**, *39*, 229–237.
- Dupont, F.M.; Hurkman, W.J.; Vensel, W.H.; Tanaka, C.; Kothari, K.M.; Chung, O.K.; Altenbach, S. Protein accumulation and composition in wheat grains: Effects of mineral nutrients and high temperature. *Eur. J. Agron.* **2006**, *25*, 96–107.
- Dziki, D. The latest innovations in wheat flour milling: A review. *Agric. Eng.* **2023**, *27*, 147–162.
- Dziki, D.; Cacak-Pietrzak, G.; Miś, A.; Jończyk, K.; Gawlik-Dziki, U. Influence of wheat kernel physical properties on the pulverizing process. *J. Food Sci. Technol.* **2014**, *54*, 2648–2655.
- Dziki, D.; Siastafa, M.; Laskowski, J. Zmiany właściwości fizycznych pieczywa pszennego pod wpływem dodatku mąki sojowej. *Acta Agrophys.* **2010**, *15*, 91–100. (In Polish)
- Economic Research Service. Fertilizer Use and Price. U.S. Department of Agriculture. 2019. <https://data.nal.usda.gov/dataset/fertilizer-use-and-price> (dostęp: 20 grudnia 2023).
- Edwards, M.A. Morphological features of wheat grain and genotype affecting flour yield. Ph.D. Thesis, Southern Cross University, East Lismore, NSW, Australia, 2010, ss. 1–203.
- Efretuei, A.; Gooding, M.; White, E.; Spink, J.; Hackett, R. Effect of nitrogen fertilizer application timing on nitrogen use efficiency and grain yield of winter wheat in Ireland. *Irish J. Agric. Food Res.* **2016**, *55*, 63–73.
- Egesel, C.O.; Kahrman, F.S.T.L.; Baytekin, H. Interrelationships of flour quality traits with grain yield in bread wheat and choosing suitable cultivars. *Anadolu J. Agric. Sci.* **2009**, *24*, 76–83.
- El-Hawary, M.N.A.; Darwish, M.A.H.; Mohamed, M.M. Evaluation of some bread wheat genotypes under different abiotic stresses. *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.* **2022**, *23*, 20–32.
- El-Metwally, E.A.; Mekkei, M.E.R.; El-Salam, A.; Abo Shama, H.M. Effect of some mineral and bio fertilization treatments on yield and yield components of bread wheat under two seeding rates. *J. Plant Prod.* **2018**, *9*, 733–738.
- Ellmann, T. Wpływ poziomu ochrony roślin, nawożenia azotem i terminu zbioru na plonowanie pszenicy ozimej. *Fragm. Agron.* **2011**, *28*, 15–25.
- Ereku, O.; Köhn, W. Effect of weather and soil conditions on yield components and bread-making quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and winter triticale (*Triticosecale* Wittm.) varieties in North-East Germany. *J. Agron. Crop Sci.* **2006**, *192*, 452–464.
- Eurostat. Performance of the Agricultural Sector. 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Performance_of_the_agricultural_sector (dostęp: 20 grudnia 2023).
- Faostat. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. 2023. <http://www.apps.fao.org> (dostęp: 20 grudnia 2023).

- Farooq, A.; Farooq, N.; Akbar, H.; Hassan, Z.U.; Gheewala, S.H. A critical review of climate change impact at a global scale on cereal crop production. *Agronomy* **2023**, *13*, 162.
- Farooq, M.; Bramley, H.; Palta, J.A.; Siddique, K.H.M. Heat stress in wheat during reproductive and grain filling phases. *Crit. Rev. Plant Sci.* **2011**, *30*, 491–507.
- Farooq, U.; Khan, E.A.; Khakwani, A.A.; Ahmed, S.; Ahmed, N.; Zaman, G. Impact of sowing time and seeding density on grain yield of wheat variety Gomali-08. *Asian J. Agric. Biol.* **2016**, *2*, 38–44.
- Ferrari, M.; Szareski, V.J.; Nardino, M.; de Pelegrin, A.J.; Carvalho, I.R.; de Souza, V.Q. Effects of sources and split application of nitrogen fertilizer on wheat genotypes performance. *Aust. J. Crop Sci.* **2016**, *11*, 1669–1674.
- Fleitas, M.C.; Schierenbeck, M.; Gerard, G.S.; Dietz, J.I.; Golik, S.I.; Campos, P.E.; Simón, M.R. How leaf rust disease and its control with fungicides affect dough properties, gluten quality and loaf volume under different N rates in wheat. *J. Cereal Sci.* **2018**, *80*, 119–127.
- Foley, J.A.; Ramankutty, N.; Brauman, K.A.; Cassidy, E.S.; Gerber, J.S.; Johnston, M.; Mueller, N.D.; O'Connell, C.; Ray, D.K.; West, P.C.; Balzer, C.; Bennett, E.M.; Carpenter, S.R.; Hill, J.; Monfreda, C.; Polasky, S.; Rockström, J.; Sheehan, J.; Siebert, S.; Tilman, D.; Zaks, D.P.M. Solutions for a cultivated planet. *Nature* **2011**, *478*, 337–342.
- Forster, S.M.; Ransom, J.K.; Manthey, F.A.; Rickertsen, J.R.; Mehring, G.H. Planting date, seeding rate, and cultivar impact agronomic traits and semolina of durum wheat. *Am. J. Plant Sci.* **2017**, *8*, 2040.
- Fu, B.X.; Wang, K.; Dupuis, B. Predicting water absorption of wheat flour using high shear-based GlutoPeak test. *J. Cereal Sci.* **2017**, *76*, 116–121.
- Fu, S.; Liu, X.M.; Ma, Y.; Li, H.; Zhen, Y.M.; Zhang, Z.X.; Wang, Y.Q.; Men, M.X.; Peng, Z.P. Effects of nitrogen supply forms on the quality and yield of strong and medium gluten wheat cultivars. *J. Plant Nutri. Fertil.* **2022**, *28*, 83–93.
- Gaile, Z.; Ruza, A.; Kreita, D.; Paura, L. Yield components and quality parameters of winter wheat depending on tillering coefficient. *Agron. Res.* **2017**, *15*, 79–93.
- Gaire, R.; Huang, M.; Sneller, C.; Griffey, C.; Brown-Guedira, G.; Mohammadi, M. Association analysis of baking and milling quality traits in an elite soft red winter wheat population. *Crop Sci.* **2019**, *59*, 1085–1094.
- Gao, Y.; Li, Y.; Zhang, J.; Liu, W.; Dang, Z.; Cao, W.; Qiang, Q. Effects of mulch, N fertilizer, and plant density on wheat yield, wheat nitrogen uptake, and residual soil nitrate in a dryland area of China. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **2009**, *85*, 109–121.
- Garg, D.; Sareen, S.; Dalal, S.; Tiwari, R.; Singh, R. Grain filling duration and temperature pattern influence on the performance of wheat genotypes under late planting. *Cereal Res. Commun.* **2013**, *41*, 500–507.
- Garrido-Lestache, E.; López-Bellido, R.J.; López-Bellido, L. Effect of N rate, timing, and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crops Res.* **2004**, *85*, 213–236.
- Gawęda, D.; Gawęda, M.; Chojnacka, S.; Sobolewska, M.; Łukasz, J.; Hury, G.; Wesołowska-Trojanowska, M. Evaluation of the technological quality of grain and flour of two spelt wheat (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L.) cultivars grown under different conditions of crop protection and seeding rate. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **2019**, *17*, 4377–4395.
- Geisslitz, S.; Longin, C.F.H.; Scherf, K.A.; Koehler, P. Comparative study on gluten protein composition of ancient (einkorn, emmer and spelt) and modern wheat species (durum and common wheat). *Foods* **2019**, *8*, 409.
- Geleta, B.; Atak, M.; Baenziger, P.S.; Nelson, L.A.; Baltenesperger, D.D.; Eskridge, K.M.; Shipman, M.J.; Shelton, D.R. Seeding rate and genotype effect on agronomic performance and end-use quality of winter wheat. *Crop Sci.* **2002**, *42*, 827–832.
- Gooding, M.J.; Elli, R.H.; Shewr, P.R.; Schofield, J.D. Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *J. Cereal Sci.* **2003**, *37*, 295–309.
- Gooding, M.J.; Pinyosinwat, A.; Ellis, R.H. Responses of wheat grain yield and quality to seed rate. *J. Agric. Sci.* **2002**, *138*, 317–331.
- Grausgruber, H.; Oberforster, M.; Werteker, M.; Ruckebauer, P.; Vollmann, J. Stability of quality traits in Austrian-grown winter wheats. *Field Crop Res.* **2000**, *66*, 257–267.
- Gross, T.F.; Dias, A.R.; Kappes, C.; Schiebelbein, L.M.; Anselmo, J.L.; Holanda, H.V. Productive performance of wheat in different sowing methods and densities. *Sci. Agrar. Parana.* **2012**, *11*, 50–60. (portugalski)
- Grzebisz, W. Żboża. W: *Technologie nawożenia roślin uprawnych – fizjologia plonowania; Zboża i kukurydza*; Grzebisz, W., Red.; PWRiL: Poznań, Polska, 2012; ss. 8–193.
- Guerrini, L.; Napoli, M.; Mancini, M.; Masella, P.; Cappelli, A.; Parenti, A.; Orlandini, S. Wheat grain composition, dough rheology, and bread quality as affected by nitrogen and sulfur fertilization and seeding density. *Agronomy* **2020**, *10*, 233.
- Guttieri, M.J.; Bowen, D.; Gannon, D.; O'Brien, K.; Souza, E. Solvent retention capacities of irrigated soft white spring wheat flours. *Crop Sci.* **2001**, *41*, 1054–1061.
- Guttieri, M.J.; Frels, K.; Regassa, T.; Waters, B.M.; Baenziger, P.S. Variation for nitrogen use efficiency traits in current and historical Great Plains hard winter wheat. *Euphytica* **2017**, *213*, 87.
- Guzmán, C.; Autrique, J.E.; Mondal, S.; Singh, R.P.; Govindan, V.; Morales-Dorantes, A.; Posadas-Romano, G.; Crossa, J.; Ammar, K.; Peña, R.J. Response to drought and heat stress on wheat quality, with special emphasis on bread-making quality, in durum wheat. *Field Crops Res.* **2016a**, *186*, 157–165.
- Guzmán, C.; Ibba, M.I.; Álvarez, J.B.; Sissons, M.; Morris, C. Wheat quality. W: *Wheat Improvement: Food Security in a Changing Climate*; Reynolds, M.P., Braun, H., Red.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022; ss. 177–193.
- Guzmán, C.; Peña, R.J.; Singh, R.; Autrique, E.; Dreisigacker, S.; Crossa, J.; Rutkoski, J.; Poland, J.; Battenfield, S. Wheat quality improvement at CIMMYT and the use of genomic selection on it. *Appl. Transl. Genom.* **2016b**, *11*, 3–8.
- Hagberg, S. A rapid method for determining alpha-amylase activity. *Cereal Chem.* **1961**, *37*, 218–222.
- Hagberg, S. Note on a simplified rapid method for determining alpha-amylase activity. *Cereal Chem.* **1960**, *38*, 202–203.
- Haile, D.; Nigussie, D.; Ayana, A. Nitrogen use efficiency of bread wheat: Effects of nitrogen rate and time of application. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* **2012**, *12*, 389–410.
- Hamani, A.K.M.; Abubakar, S.A.; Si, Z.; Kama, R.; Gao, Y.; Duan, A. Responses of grain yield and water-nitrogen dynamic of drip-irrigated winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to different nitrogen fertigation and water regimes in the North China Plain. *Agric. Water Manag.* **2023**, *288*, 108494.

- Han, H.; Yang, W. Influence of uniconazole and plant density on nitrogen content and grain quality in winter wheat in South China. *Plant Soil Environ.* **2009**, *55*, 159–166.
- Hao, R.; Noor, H.; Wang, P.; Sun, M.; Noor, F.; Ullah, S.; Gao, Z. Combined effects of starch sucrose content and planting density on grain protein content of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Food Nutr. Res.* **2022**, *10*, 321–331.
- Hao, T.; Chen, R.; Jia, J.; Zhao, C.; Du, Y.; Li, W.; Zhao, L.; Duan, H. Enhancing wheat gluten content and processing quality: An analysis of drip irrigation nitrogen frequency. *Plants* **2023**, *12*, 3974.
- Harasim, E.; Wesołowski, M. Wpływ retardanta Moddus 250 EC i nawożenia azotem na plonowanie i jakość ziarna pszenicy ozimej. *Fragm. Agron.* **2013**, *30*, 70–77.
- Harasim, E.; Wesołowski, M.; Kwiatkowski, C.; Harasim, P.; Staniak, M.; Feledyn-Szewczyk, B. The contribution of yield components in determining the productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Agrobot.* **2016**, *69*, 1675.
- Helleman, T.; Landschoot, S.; Dewitte, K.; Van Bockstaele, F.; Vermeir, P.; Eeckhout, M.; Haesaert, G. Impact of crop husbandry practices and environmental conditions on wheat composition and quality: A review. *J. Agric. Food Chem.* **2018**, *66*, 2491–2509.
- Hochman, Z.; Horan, H. Causes of wheat yield gaps and opportunities to advance the water-limited yield frontier in Australia. *Field Crops Res.* **2018**, *228*, 20–30.
- Horvat, D.; Šimić, G.; Dvojko, K.; Ivić, M.; Plavšin, I.; Novoselović, D. Gluten protein compositional changes in response to nitrogen application rate. *Agronomy* **2021**, *11*, 325.
- Hrušková, M.; Švec, I. Wheat hardness in relation to other quality factors. *Czech J. Food Sci.* **2009**, *27*, 240–248.
- Hu, C.; Sadras, V.O.; Lu, G.; Zhang, P.; Han, Y.; Liu, L.; Xie, J.; Yang, X.; Zhang, S. A global meta-analysis of split nitrogen application for improved wheat yield and grain protein content. *Soil Tillage Res.* **2021a**, *213*, 105111.
- Hu, C.; Zheng, C.; Sadras, V.O.; Ding, M.; Yang, X.; Zhang, S. Effect of straw mulch and seeding rate on the harvest index, yield and water use efficiency of winter wheat. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 8167.
- Hu, C.L.; Sadras, V.O.; Lu, G.Y.; Zhang, P.X.; Han, Y.; Liu, L.; Xie, J.Y.; Yang, X.Y.; Zhang, S.L. A global meta-analysis of split nitrogen application for improved wheat yield and grain protein content. *Soil Tillage Res.* **2021b**, *213*, 105111.
- Hu, Y.; Sjöberg, S.M.; Chen, C.; Hauvermale, A.L.; Morris, C.F.; Delwiche, S.R.; Cannon, A.E.; Steber, C.; Zhang, Z. As the number falls, alternatives to the Hagberg–Perten falling number method: A review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2022**, *21*, 2105–2117.
- Huang, X.; Zhou, X.; Liu, X.; Zhong, W.; Wang, X.; Ju, Z.; Yin, Y.; Xin, Q.; Liu, N.; Liu, X.; Jin, Y.; Wang, G.; Wang, J.; Ma, P. Structural and physicochemical effects on the starch quality of the high-quality wheat genotype caused by delayed sowing. *Front. Nutr.* **2024**, *11*, 1389745.
- Hughes, N.; Askew, K.; Scotson, C.P.; Williams, K.; Sauze, C.; Corke, F.; Doonan, J.H.; Nibau, C. Non-destructive, high-content analysis of wheat grain traits using X-ray micro computed tomography. *Plant Methods* **2017**, *13*, 76.
- Hussain, S.; Khaliq, A.; Bajwa, A.A.; Matloob, A.; Areeb, A.; Ashraf, U.; Hafeez, A.; Imran, M. Crop growth and yield losses in wheat due to little seed canary grass infestation differ with weed densities and changes in environment. *Planta Daninha* **2017**, *35*, e017162328.
- Hussain, S.; Sajjad, A.; Hussain, M.I.; Saleem, M. Growth and yield response of three wheat varieties to different seeding densities. *Int. J. Agric. Biol.* **2001**, *3*, 228–229.
- Islam, S.M.F.; Karim, Z. World's demand for food and water: The consequences of climate change. W: *Desalination-Challenges and Opportunities*; Farahani, M.H.D.A., Vatanpour, V., Taheri, A., Red.; IntechOpen: Londyn, UK, 2019; ss. 225–240.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2022; FAO: Rome, Italy, 2022. https://eurasian-soil-portal.info/wp-content/uploads/2022/07/wrb_fourth_edition_2022-3.pdf (dostęp: 20 grudnia 2023).
- Jaenisch, B.R.; de Oliveira Silva, A.; DeWolf, E.; Ruiz-Diaz, D.A.; Lollato, R.P. Plant population and fungicide economically reduced winter wheat yield gap in Kansas. *Agron. J.* **2019**, *111*, 650–665.
- Jan, A.; Hamid, I.; Muhammad, T. Seed rates and sowing dates effect on the performance of wheat variety Bakhtawar-92. *Pak. J. Biol. Sci.* **2000**, *3*, 1409–1411.
- Jańczak-Pieniążek, M.; Buczek, J.; Jarecki, W.; Bobrecka-Jamro, D. Effect of high nitrogen doses on yield, quality and chemical composition grain of winter wheat cultivars. *J. Elem.* **2020a**, *25*, 1005–1017.
- Jańczak-Pieniążek, M.; Buczek, J.; Kaszuba, J.; Szpunar-Krok, E.; Bobrecka-Jamro, D.; Jaworska, G. A comparative assessment of the baking quality of hybrid and population wheat cultivars. *Appl. Sci.* **2020b**, *10*, 7104.
- Jańczak-Pieniążek, M.; Buczek, J.; Kwiatkowski, C.A.; Harasim, E. The course of physiological processes, yielding, and grain quality of hybrid and population wheat as affected by integrated and conventional cropping systems. *Agronomy* **2022**, *12*, 1345.
- Jankowski, K.J.; Budzyński, W.S.; Kijewski, Ł.; Dubis, D.; Lemański, M. Flour quality, the rheological properties of dough and the quality of bread made from the grain of winter wheat grown in a continuous cropping system. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2014**, *13*, 3–18.
- Jankowski, K.J.; Kijewski, L.; Dubis, B. Milling quality and flour strength of the grain of winter wheat grown in monoculture. *Rom. Agric. Res.* **2015**, *32*, 191–200.
- Jarecki, W. Effects of sowing date variation on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) quality and grain yield. *J. Elem.* **2023**, *28*, 1089–1100.
- Jarecki, W.; Czernicka, M. Yield and quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) depending on multi-component foliar fertilization. *J. Elem.* **2022**, *27*, 559–567.
- Jaskulska, I.; Jaskulski, D.; Gałęzowski, L.; Knapowski, T.; Kozera, W.; Wacławowicz, R. Mineral composition and baking value of the winter wheat grain under varied environmental and agronomic conditions. *J. Chem.* **2018**, 5013825.
- Jemal, A.; Tamado, T.; Firdissa, E. Response of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties to seeding rates at Kulumsa, south eastern Ethiopia. *Asian J. Plant Sci.* **2015**, *14*, 50–58.
- Johansson, E.; Kuktaite, R.; Andersson, A.; Prieto-Linde, M.L. Protein polymer build-up during wheat grain development: Influences of temperature and nitrogen timing. *J. Sci. Food Agric.* **2005**, *85*, 473–479.
- Johansson, E.; Prieto-Linde, M.L.; Svensson, G. Influence of nitrogen application rate and timing on grain protein composition and gluten strength in Swedish wheat cultivars. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **2004**, *167*, 345–350.

- Jurga, R. Ocena efektywności przemiału ziarna pszenicy na podstawie zależności zawartości popiołu i barwy mąki. *Przegląd Zbożowo-Młynarski* **2006**, *50*, 19–21.
- Karabínová, M.; Mečiar, L.; Procházková, M. The influence of fertilization and sowing rate winter wheat baking quality. *Acta Fytotech. Zootech.* **2001**, *4*, 77–80.
- Kaur, A.; Pannu, R.K.; Buttar, G.S. Quality of wheat (*T. aestivum*) as influenced by sowing dates and nitrogen scheduling. *Indian J. Agric. Sci.* **2010**, *80*, 781–785.
- Kaur, C. Performance of wheat varieties under late and very late sowing conditions. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* **2017**, *6*, 3488–3492.
- Keres, I.; Alaru, M.; Koppel, R.; Altosaar, I.; Tosens, T.; Loit, E. The combined effect of nitrogen treatment and weather conditions on wheat protein-starch interaction and dough quality. *Agriculture* **2021**, *11*, 1232.
- Khalid, A.; Hameed, A.; Tahir, M.F. Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Front. Nutr.* **2023**, *10*, 1053196.
- Kindred, D.R.; Gooding, M.J.; Ellis, R.H. Nitrogen fertilizer and seed rate effects on Hagberg falling number of hybrid wheats and their parents are associated with α -amylase activity, grain cavity size and dormancy. *J. Sci. Food Agric.* **2005**, *85*, 727–742.
- Kizilgeci, F.; Yildirim, M.; Islam, M.S.; Ratnasekera, D.; Iqbal, M.A.; Sabagh, A.E. Normalized difference vegetation index and chlorophyll content for precision nitrogen management in durum wheat cultivars under semi-arid conditions. *Sustainability* **2021**, *13*, 3725.
- Knapowski, T.; Ralcewicz, M. Ocena wskaźników jakościowych ziarna i mąki pszenicy ozimej w zależności od zróżnicowanego nawożenia azotem. *Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska. Sect. E Agric.* **2004**, *59*, 959–968.
- Knapowski, T.; Ropińska, P.; Kazek, M.; Wenda-Piesik, A. Flour and bread quality of spring wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) sown at facultative and spring sowing dates. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2018**, *17*, 133–142.
- Kondić, D.; Bajić, M.; Hajder, Đ.; Bosančić, B. The rate of productive tillers per plant of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under different sowing densities. *Agro-Know. J.* **2017**, *17*, 345–357.
- Korres, N.E.; Froud-Williams, R.J. The effects of varietal selection, seed rate and weed competition on quantitative and qualitative traits of grain yield in winter wheat. *Asp. Appl. Biol.* **2001**, *64*, 147–156.
- Kozlovsky, O.; Balij, J.; Cerny, J.; Kulhanek, M.; Prasilova, M.; Kos, M. Influence of nitrogen fertilizer injection (CULTAN) on yield, yield components formation and quality of winter wheat grain. *Plant Soil Environ.* **2009**, *55*, 536–543.
- Kulkarni, S.D.; Acharya, R.; Nair, A.G.C.; Rajurkar, N.S.; Reddy, A.V.R. Determination of elemental concentration profiles in tender wheatgrass (*Triticum aestivum* L.) using instrumental neutron activation analysis. *Food Chem.* **2006**, *95*, 699–707.
- Kumar, A.; Nayak, R.; Purohit, S.R.; Rao, P.S. Impact of UV-C irradiation on solubility of Osborne protein fractions in wheat flour. *Food Hydrocoll.* **2021**, *110*, 105845.
- Kunkulberga, D.; Linina, A.; Ruza, A. Effect of nitrogen fertilization on protein content and rheological properties of winter wheat whole meal. W: Proceedings of the 3th Baltic Conference on Food Science and Technology “FOOD, NUTRITION, WELL-BEING”, Jelgava, Łotwa, 2–3 maja 2019; ss. 88–92.
- Labuschagne, M.T.; Elago, O.; Koen, E. The influence of temperature extremes on some quality and starch characteristics in bread, biscuit and durum wheat. *J. Cereal Sci.* **2009**, *9*, 84–189.
- Ladha, J.; Tirol-Padre, A.; Reddy, C.K.; Cassman, K.G.; Verma, S.; Powlson, D.S.; Van Kessel, C.; Richter, D.D.B.; Chakraborty, D.; Pathak, H. Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice and wheat production systems. *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 19355.
- Lafiandra, D.; Sestili, F.; Sissons, M.; Kiszona, A.; Morris, C.F. Increasing the versatility of durum wheat through modifications of protein and starch composition and grain hardness. *Foods* **2022**, *11*, 1532.
- Laghari, G.M.; Oad, F.C.; Tunio, S.; Chachar, Q.; Ghandahi, A.; Siddiqui, M.H.; Hassan, S.W.; Ali, A. Growth and yield attributes of wheat at different seed rates. *Sarhad J. Agric.* **2011**, *27*, 177–183.
- Lagrain, B.; Wilderjans, E.; Glorieux, C.; Delcour, J.A. Importance of gluten and starch for structural and textural properties of crumb from fresh and stored bread. *Food Biophys.* **2012**, *7*, 173–181.
- Lakić-Karalić, N.; Vasilišin, L.; Vučić, G. Relationship between the test weight and some physical and chemical properties of the wheat kernel. *Agro-Know. J.* **2021**, *22*, 137–148.
- Landolfi, V.; D'Auria, G.; Nicolai, M.A.; Nitride, C.; Blandino, M.; Ferranti, P. The effect of nitrogen fertilization on the expression of protein in wheat and tritordeum varieties using a proteomic approach. *Food Res. Int.* **2021a**, *148*, 110617.
- Landolfi, V.; Visioli, G.; Blandino, M. Effect of nitrogen fertilization and fungicide application at heading on the gluten protein composition and rheological quality of wheat. *Agronomy* **2021b**, *11*, 1687.
- Li, J.; Liu, X.; Yang, X.; Li, Y.; Wang, C.; He, D. Proteomic analysis of the impacts of powdery mildew on wheat grain. *Food Chem.* **2018**, *261*, 30–35.
- Li, J.; Zhu, Y.; Yadav, M.P.; Li, J. Effect of various hydrocolloids on the physical and fermentation properties of dough. *Food Chem.* **2019**, *271*, 165–173.
- Li, M.; Yue, Q.; Liu, C.; Zheng, X.; Hong, J.; Wang, N.; Bian, K. Interaction between gliadin/glutenin and starch granules in dough during mixing. *LWT* **2021**, *148*, 111624.
- Li, Y.F.; Wu, Y.; Hernandez-Espinosa, N.; Peña, R.J. Heat and drought stress on durum wheat: Responses of genotypes, yield, and quality parameters. *J. Cereal Sci.* **2013**, *57*, 398–404.
- Li, Y.Q.; Zhu, R.J.; Tian, J.C. Influence of wheat protein contents and fractions on dough rheological properties as determined by using a reconstitution method. *Agric. Sci. China* **2008**, *7*, 395–404.
- Liang, S.; Li, Y.; Zhang, X.; Sun, Z.; Sun, N.; Duan, Y.; Xu, M.; Wu, L. Response of crop yield and nitrogen use efficiency for wheat-maize cropping system to future climate change in Northern China. *Agric. For. Meteorol.* **2018**, *262*, 310–321.
- Limaux, F.; Recous, S.; Meynard, J.M.; Guckert, A. Relationship between rate of crop growth at date of fertilizer N application and fate of fertilizer N applied to winter wheat. *Plant Soil* **1999**, *214*, 49–59.
- Lindsey, L.E.; Goodwin, A.W.; Harrison, S.K.; Paul, P.A. Optimum seeding rate and stand assessment of soft red winter wheat. *Agron. J.* **2020**, *112*, 4069–4075.

- Linina, A.; Ruza, A. Impact of agroecological conditions on the Hagberg falling number of winter wheat grain. *Res. Rural. Dev.* **2015**, *1*, 19–26.
- Linlaud, N.E.; Puppo, M.C.; Ferrero, C. Effect of hydrocolloids on water absorption of wheat flour and farinograph and textural characteristics of dough. *Cereal Chem.* **2009**, *86*, 376–382.
- Litke, L.; Gaile, Z.; Ruža, A. Effect of nitrogen fertilization on winter wheat yield and yield quality. *Agron. Res.* **2018**, *16*, 500–509.
- Lloveras, J.; Manent, J.; Viudas, J.; Lopez, A.; Santiveri, P. Seeding rate influence on yield and yield components of irrigated winter wheat in a Mediterranean climate. *Agron. J.* **2004**, *96*, 1258–1265.
- Lollato, R.P.; Ruiz Diaz, D.A.; DeWolf, E.; Knapp, M.; Peterson, D.E.; Fritz, A.K. Agronomic practices for reducing wheat yield gaps: A quantitative appraisal of progressive producers. *Crop Sci.* **2019**, *59*, 333.
- López-Bellido, L.; López-Bellido, R.J.; Redondo, R. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crop Res.* **2005**, *94*, 86–97.
- Lou, H.; Zhang, R.; Liu, Y.; Guo, D.; Zhai, S.; Chen, A.; Zhang, Y.; Xie, C.; You, M.; Peng, H.; Liang, R.; Ni, Z.; Sun, Q.; Li, B. Genome-wide association study of six quality-related traits in common wheat (*Triticum aestivum* L.) under two sowing conditions. *Theor. Appl. Genet.* **2021**, *134*, 399–418.
- Luo, C.; Branlard, G.; Griffin, W.B.; McNeil, D.L. The effect of nitrogen and sulphur fertilisation and their interaction with genotype on wheat glutenins and quality parameters. *J. Cereal Sci.* **2000**, *31*, 185–194.
- Ma, D.; Guo, T.; Wang, Z.; Wang, C.; Zhu, Y.; Wang, Y. Influence of nitrogen fertilizer application rate on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) flour quality and Chinese noodle quality. *J. Sci. Food Agric.* **2009**, *89*, 1213–1220.
- Ma, Q.; Wang, M.; Zheng, G.; Yao, Y.; Tao, R.; Zhu, M.; Ding, J.; Li, C.; Guo, W.; Zhu, X. Twice-split application of controlled-release nitrogen fertilizer met the nitrogen demand of winter wheat. *Field Crops Res.* **2021**, *267*, 108163.
- Ma, S.C.; Wang, T.C.; Guan, X.K.; Zhang, X. Effect of sowing time and seeding rate on yield components and water use efficiency of winter wheat by regulating the growth redundancy and physiological traits of root and shoot. *Field Crop. Res.* **2018**, *221*, 166–174.
- Ma, W.; Yu, Z.; She, M.; Zhao, Y.; Islam, S. Wheat gluten protein and its impacts on wheat processing quality. *Front. Agric. Sci. Eng.* **2019**, *6*, 279–287.
- Madan, H.S.; Munjal, R. Effect of split doses of nitrogen and seed rate on protein content, protein fractions and yield of wheat. *J. Agric. Biol. Sci.* **2009**, *4*, 26–31.
- Madhu, U.; Begum, M.; Salam, A.; Sarkar, S.K. Influence of sowing date on the growth and yield performance of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Arch. Agric. Environ. Sci.* **2018**, *3*, 89–94.
- Mahdavi, S.; Arzani, A.; Maibody, S.M.; Kadivar, M. Grain and flour quality of wheat genotypes grown under heat stress. *Saudi J. Biol. Sci.* **2022**, *29*, 103417.
- Majewska, K. Podstawy klasyfikacji i syntezy białek glutenowych ziarna pszenicy. *Żywn. Nauka Technol. Jakość* **1999**, *6*, 15–25.
- Mandea, V.; Marinciu, C.M.; Șerban, G.; Ciontu, C.; Săulescu, N.N. Genetic and environmental effects on grain size uniformity in winter wheat. *Rom. Agric. Res.* **2022**, *39*, 133–138.
- Maningat, C.C.; Seib, P.A.; Bassi, S.D.; Woo, K.S.; Lasater, G.D. Wheat starch: Production, properties, modification and uses. W: *Starch*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2009; ss. 441–510.
- Marchetti, L.; Cardós, M.; Campaña, L.; Ferrero, C. Effect of gluten of different quality on dough characteristics and breadmaking performance. *LWT-Food Sci. Technol.* **2012**, *46*, 224–231.
- Mastanjević, K.; Habschied, K.; Dvojković, K.; Karakašić, M.; Glavaš, H. Vitreosity as a major grain quality indicator—Upgrading the grain-cutter method with a new blade. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 2655.
- McKenzie, R.H.; Middleton, A.B.; Bremer, E. Fertilization, seeding date, and seeding rate for malting barley yield and quality in southern Alberta. *Can. J. Plant Sci.* **2005**, *85*, 603–614.
- McKenzie, R.H.; Middleton, A.B.; Dunn, R.; Sadasivaiah, R.S.; Beres, B.; Bremer, E. Response of irrigated soft white spring wheat to seeding date, seeding rate and fertilization. *Can. J. Plant Sci.* **2008**, *88*, 291–298.
- Meena, R.K.; Parihar, S.S.; Singh, M.; Khanna, M. Effects of sowing dates and irrigation regimes on grain quality of wheat grown under semi-arid condition of India. *J. Appl. Nat. Sci.* **2016**, *8*, 960–966.
- Meier, U. *Growth Stages of Mono- and Dicotyledonous Plants: BBCH Monograph*; Julius Kühn-Institut: Quedlinburg, Niemcy, 2018. <https://www.julius-kuehn.de/media/Veroeffentlichungen/bbch%20paper%20en/page.pdf> (dostęp: 10 grudnia 2023).
- Menkinoska, M.; Blazhevskaja, T.; Stamatovsk, V. Determination of rheological properties with farinograf and extensigraf of bio-fortified flour. *Proc. Univ. Ruse* **2018**, *57*, 22–25.
- Meyfroidt, P.; Carlson, K.M.; Fagan, M.E.; Gutiérrez-Vélez, V.H.; Macedo, M.N.; Curran, L.M.; DeFries, R.S.; Dyer, G.A.; Gibbs, H.K.; Lambin, E.F.; Morton, D.C.; Robiglio, V. Multiple pathways of commodity crop expansion in tropical forest landscapes. *Environ. Res. Lett.* **2014**, *9*, 074012.
- Mikos-Szymańska, M.; Podolska, G. The effects of sowing date and seeding rate on spelt and common wheat protein composition and characteristics. *Qual. Assur. Saf. Crops Foods* **2016**, *8*, 289–300.
- Mitura, K.; Cacak-Pietrzak, G.; Feledyn-Szewczyk, B.; Szablewski, T.; Studnicki, M. Yield and grain quality of common wheat (*Triticum aestivum* L.) depending on the different farming systems (organic vs. integrated vs. conventional). *Plants* **2023**, *12*, 1022.
- Moitzi, G.; Neugschwandtner, R.W.; Kaul, H.P.; Wagentristl, H. Efficiency of mineral nitrogen fertilization in winter wheat under Pannonian climate conditions. *Agriculture* **2020**, *10*, 541.
- Mor, V.B.; Patel, A.M.; Chaudhary, A.N. Performance of bread wheat (*Triticum aestivum*) under different nitrogen levels and its split application under north Gujarat condition. *Indian J. Agron.* **2019**, *64*, 482–488.
- Mosanaei, H.; Ajamnorzi, H.; Dadashi, M.R.; Faraji, A.; Pessarakli, M. Improvement effect of nitrogen fertilizer and plant density on wheat (*Triticum aestivum* L.) seed deterioration and yield. *Emir. J. Food Agric.* **2017**, *29*, 899–910.
- Mottaleb, K.A.; Gideon, K.; Sieglind, S. Potential impacts of Ukraine-Russia armed conflict on global wheat food security: A quantitative exploration. *Globa. Food Sec.* **2022**, *35*, 100659.
- Motzo, R.; Fois, S.; Giunta, F. Protein content and gluten quality of durum wheat as affected sowing date. *J. Sci. Food Agric.* **2007**, *87*, 1480–1488.

- Moustafa, A.T.H.; El-Sawi, S.A. Influence of sowing date on development, harvest index and yield components for bread wheat cultivars having different thermal responses in middle Egypt. *J. Plant Prod.* **2014**, *5*, 211–226.
- Munsif, F.; Arif, M.; Ali, K.; Jan, M.T.; Khan, M.J. Influence of planting dates on grain quality of different wheat cultivars in dual-purpose system. *Int. J. Agric. Biol.* **2015**, *17*, 945–952.
- Muste, S.; Modoran, C.; Man, S.; Mureşan, V.; Birou, A. The influence of wheat genotype on its quality. *J. Agroaliment. Process. Technol.* **2010**, *16*, 99–103.
- Nakano, H.; Morita, S. Effects of seeding rate and nitrogen application rate on grain yield and protein content of the bread wheat cultivar 'Minaminokaori' in Southwestern Japan. *Plant Prod. Sci.* **2009**, *12*, 109–115.
- Narkiewicz-Jodko, M.; Gil, Z.; Wojciechowski, W.; Żmijewski, M. Zdrowotność i jakość ziarna pszenicy jarej w zależności od międzyplonu i nawożenia azotem. *Fragm. Agron.* **2008**, *25*, 251–260.
- Neumann, K.; Verburg, P.H.; Stehfest, E.; Müller, C. The yield gap of global grain production: A spatial analysis. *Agric. Syst.* **2010**, *103*, 316–326.
- Nóia Júnior, R.d.S.; Deswarte, J.-C.; Cohan, J.-P.; Martre, P.; van Der Velde, M.; Lecerf, R.; Webber, H.; Ewert, F.; Ruane, A.C.; Slafer, G.A.; Asseng, S. The extreme 2016 wheat yield failure in France. *Glob. Chang. Biol.* **2023**, *29*, 3130–3146.
- Oleksiak, T. Effect of sowing date on winter wheat yields in Poland. *J. Cent. Eur. Agric.* **2014**, *15*, 83–99.
- Otteson, B.N.; Mergoum, M.; Ransom, J.K. Seeding rate and nitrogen management on milling and baking quality of hard red spring wheat genotypes. *Crop Sci.* **2008**, *48*, 749–755.
- Ozturk, A.; Aydin, F. Effect of water stress at various growth stages on some quality characteristics of winter wheat. *J. Agron. Crop Sci.* **2004**, *190*, 93–99.
- Pakrooh, P.; Kamal, M.A. Modeling the potential impacts of climate change on wheat yield in Iran: Evidence from national and provincial data analysis. *Ecol. Model.* **2023**, *486*, 110513.
- Panazzo, J.F.; Eagles, H.A. Cultivar and environmental effects on quality characters in wheat. II. Protein. *Aust. J. Agric. Res.* **2000**, *51*, 629–636.
- Pasha, I.; Anjum, F.M.; Morris, C.F. Grain hardness: A major determinant of wheat quality. *Food Sci. Technol. Int.* **2010**, *16*, 511–522.
- Paymard, P.; Bannayan, M.; Haghighi, R.S. Analysis of the climate change effect on wheat production systems and investigate the potential of management strategies. *Nat. Hazards* **2018**, *91*, 1237–1255.
- Penning, B.W. Gene expression differences related to pre-harvest sprouting uncovered in related wheat varieties by RNAseq analysis. *Plant Gene* **2023**, *33*, 100404.
- Petingco, M.C.; Casada, M.E.; Maghirang, R.G.; Thompson, S.A.; Turner, A.P.; McNeill, S.G.; Montross, M. Discrete element method simulation of wheat bulk density as affected by grain drop height and kernel size distribution. *J. ASABE* **2022**, *65*, 555–566.
- Piekarczyk, M. Effect of fertilisation dose, plant protection input, and seeding density on the yield and grain technological quality of winter wheat grown in short-time monoculture on light soil. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2010**, *9*, 15–23.
- Piironen, V.; Salmenkallio-Marttila, M. Micronutrients and phytochemicals in wheat grain. W: *Wheat: Chemistry and Technology*; American Association of Cereal Chemists: St Paul, MN, USA, 2009; ss. 179–222.
- Pisarek, M.; Rozbicki, J.; Samborski, S.; Wawryło, B.; Golba, J. Wpływ wybranych siedmiu czynników agrotechnicznych na produktywność pszenicy ozimej w warunkach dużego udziału zbóż w zmianowaniu. Część II. Plon ziarna i składowe plonu. *Fragm. Agron.* **2013a**, *30*, 113–120.
- Pisarek, M.; Rozbicki, J.; Samborski, S.; Wawryło, B.; Golba, J. Wpływ siedmiu wybranych czynników agrotechnicznych na produktywność pszenicy ozimej w warunkach dużego udziału zbóż w zmianowaniu. Część I. Plon biomasy nadziemnej, odżywienie roślin azotem oraz porażenie zgorzelą podstawy źdźbła. *Fragm. Agron.* **2013b**, *30*, 99–112.
- PN R-74008:1970; Ziarno zbóż - oznaczanie ziaren szklanych. Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, Polska, 1970.
- PN R-74110:1998; Jęczmień - metody badań. Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, Polska, 1998.
- PN-EN ISO 21415-2:2015-12E; Pszenica i mąka pszenna - ilość glutenu. Część 2: Oznaczanie glutenu mokrego i indeksu glutenu za pomocą urządzeń mechanicznych. Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, Polska, 2015.
- PN-EN ISO 3093:2010; Pszenica, żyto i maki z nich uzyskane, pszenica durum i semolina - oznaczanie liczby opadania metodą Hagberga-Pertena. Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, Polska, 2010.
- PN-EN ISO 5529:2010; Pszenica. Oznaczanie wskaźnika sedymentacyjnego - test Zeleny'ego. Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, Polska, 2010.
- PN-EN ISO 5530-1:2015-01; Mąka pszenna - fizyczne właściwości ciasta. Część 1: Oznaczanie wodochłonności i właściwości reologicznych za pomocą farinografu. Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, Polska, 2015.
- PN-EN ISO 7971-3:2019-03; Ziarno zbóż - oznaczanie gęstości w stanie zsypanym, zwanej masą hektolitra. Część 3: Metoda rutynowa. Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, Polska, 2019.
- Podolska, G. Wpływ dawki i sposobu nawożenia azotem na plon i wartość technologiczną ziarna odmian pszenicy ozimej. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2008**, *7*, 57–65.
- Podolska, G.; Aleksandrowicz, E.; Szafrńska, A. Bread making potential of *Triticum aestivum* and *Triticum spelta* species. *Open Life Sci.* **2020**, *15*, 30–40.
- Podolska, G.; Stankowski, S.; Dworakowski, T. Wpływ dawki nawożenia azotem na wielkość plonu i wartość technologiczną ziarna odmian pszenicy ozimej. *Fragm. Agron.* **2007**, *24*, 274–282.
- Podolska, G.; Wyżińska, M. Reakcja nowych odmian pszenicy ozimej na gęstość i termin siewu. *Pol. J. Agron.* **2011**, *6*, 44–51.
- Porker, K.; Straight, M.; Hunt, J.R. Evaluation of G×E×M interactions to increase harvest index and yield of early sown wheat. *Front. Plant Sci.* **2020**, *11*, 994.
- Prey, L.; Germer, M.; Schmidhalter, U. Temporal and organ-specific responses in NUE traits to N fertilization, fungicide intensity and early sowing in winter wheat cultivars. *Agronomy* **2019**, *9*, 313.
- Puhr, D.P.; D'apollonia, B.L. Effect of baking absorption on bread yield, crumb moisture, and crumb water activity. *Cereal Chem.* **1992**, *69*, 582.
- Rachoń, L.; Szumiło, G.; Czubańska, M. Ocena szklistości ziarna wybranych odmian i gatunków pszenicy. *Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska. Sect. E. Agric.* **2012**, *67*, 17–23.

- Ren, K.; Xu, M.; Li, R.; Zheng, L.; Wang, H.; Liu, S.; Zhang, W.; Duan, D.; Lu, C. Achieving high yield and nitrogen agronomic efficiency by coupling wheat varieties with soil fertility. *Sci. Total Environ.* **2023**, *881*, 163531.
- Reznick, J.P.K.; Barth, G.; Kaschuk, G.; Pauletti, V. Nitrogen and cultivars as field strategies to improve the nutritional status of wheat grain and flour. *J. Cereal Sci.* **2021**, *102*, 103290.
- Riaz, M.W.; Yang, L.; Yousaf, M.I.; Sami, A.; Mei, X.D.; Shah, L.; Rehman, S.; Xue, L.; Si, H.; Ma, C. Effects of heat stress on growth, physiology of plants, yield and grain quality of different spring wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Sustainability* **2021**, *13*, 2972.
- Rodrighero, M.B.; Caires, E.F.; Lopes, R.B.; Zielinski, A.A.; Granato, D.; Demiate, I.M. Wheat technological quality as affected by nitrogen fertilization under a no-till system. *Acta Sci. Technol.* **2015**, *37*, 175–181.
- Rossini, F.; Provenzano, M.E.; Sestili, F.; Ruggeri, R. Synergistic effect of sulfur and nitrogen in the organic and mineral fertilization of durum wheat: Grain yield and quality traits in the Mediterranean environment. *Agronomy* **2018**, *8*, 189.
- Rossmann, A.; Pitann, B.; Mühling, K.H. Splitting nitrogen applications improves wheat storage protein composition under low N supply. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **2019**, *182*, 347–355.
- Rothkaehl, J. Jakość ziarna pszenicy ze zbiorów 2014 roku w Polsce. *Przegląd Piekarski i Cukierniczy*. **2015**, *5*, 10–14.
- Rothkaehl, J. Konsumpcyjne ziarno pszenicy w obrocie i przetwórstwie. W: *Pszenice – zwyczajna, orkisz, twarda. Uprawa i zastosowanie*; Budzyński, W., Red.; PWRiL: Poznań, Polska, 2012; ss. 235–264.
- Rozbicki, J.; Ceglińska, A.; Gozdowski, D.; Jakubczak, M.; Cacak-Pietrzak, G.; Mądry, W.; Golba, J.; Piechociński, M.; Sobczyński, M.; Studnicki, M.; Drzazga, T. Influence of the cultivar, environment and management on the grain yield and bread-making quality in winter wheat. *J. Cereal Sci.* **2015**, *61*, 126–132.
- Różyło, R.; Laskowski, J.; Dziki, D. Physical properties of wheat bread baked from dough with different parameters. *Acta Agrophys.* **2011**, *18*, 421–430. (In Polish)
- Sadowska, J.; Blaszczyk, W.; Jelinski, T.; Fornal, J.; Borkowska, H.; Styk, B. Fertilization and technological quality of wheat grain. *Int. Agrophys.* **2001**, *15*, 279–285.
- Sahi, S.S.; Little, K.; Ananingsih, V.K. Quality control. W: *Bakery Products Science and Technology*; John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, UK, 2014; ss. 489–509.
- Saint Pierre, C.; Peterson, C.J.; Ross, A.S.; Ohm, J.B.; Verhoeven, M.C.; Larson, M.; Hoefer, B. White wheat grain quality changes with genotype, nitrogen fertilization, and water stress. *Agron. J.* **2008**, *100*, 414–420.
- Sander, G.; da Costa, A.C.T.; Júnior, J.B.D. Agronomic performance of wheat as a function of different spacing and sowing densities in two agricultural years. *African J. Agric. Res.* **2017**, *12*, 3099–3105.
- Sapirstein, H.; Wu, Y.; Koksel, F.; Graf, R. A study of factors influencing the water absorption capacity of Canadian hard red winter wheat flour. *J. Cereal Sci.* **2018**, *81*, 52–59.
- Sattar, A.; Cheema, M.A.; Farooq, M.; Wahid, W.; Babar, H.B. Evaluating the performance of wheat cultivars under late sown conditions. *Int. J. Agric. Biol.* **2010**, *12*, 561–565.
- Schulz, R.; Makary, T.; Hubert, S.; Hartung, K.; Gruber, S.; Donath, S.; Döhler, J.; Weiss, K.; Ehrhart, E.; Claupein, W.; Piepho, H.-P.; Pekrun, C.; Müller, T. Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? On-farm research on Luvisols in South-West Germany. *J. Agric. Sci.* **2015**, *153*, 575–587.
- Sedlář, O.; Balík, J.; Černý, J.; Peklová, L.; Kulháněk, M. Nitrogen uptake by winter wheat (*Triticum aestivum* L.) depending on fertilizer application. *Cereal Res. Commun.* **2015**, *43*, 515–524.
- Seleiman, M.; Ibrahim, M.; Abdel-Aal, S.; Zahran, G. Effect of sowing dates on productivity, technological and rheological characteristics of bread wheat. *J. Agro Crop Sci.* **2011**, *2*, 1–6.
- Shah, A.N.; Iqbal, J.; Tanveer, M.; Yang, G.; Hassan, W.; Fahad, S.; Yousaf, M.; Wu, Y. Nitrogen fertilization and conservation tillage: A review on growth, yield, and greenhouse gas emissions in cotton. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2017b**, *24*, 2261–2272.
- Shah, A.N.; Yang, G.; Tanveer, M.; Iqbal, J. Leaf gas exchange, source–sink relationship, and growth response of cotton to the interactive effects of nitrogen rate and planting density. *Acta Physiol. Plant.* **2017a**, *39*, 119.
- Shah, F.; Coulter, J.A.; Ye, C.; Wu, W. Yield penalty due to delayed sowing of winter wheat and the mitigatory role of increased seeding rate. *Eur. J. Agron.* **2020**, *119*, 126120.
- Shalaby, N.E.; Abdelkhalik, S.A.; Gad, K.I.; Elsamahy, B.E. Effect of sowing date on grain yield and quality of some Egyptian bread wheat genotypes. *Egypt. J. Agric. Res.* **2023**, *101*, 643–652.
- Sharma, N.; Kumar, A.; Sharma, B.; Chand, L.; Sharma, V.; Kumar, M. Effects of sowing dates and weed management on productivity of irrigated wheat (*Triticum aestivum*). *Indian J. Agric. Sci.* **2020**, *90*, 556–559.
- Shekoofa, A.; Emam, Y. Effects of nitrogen fertilization and plant growth regulators (PGRs) on yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. Shiraz. *J. Agric. Sci. Technol.* **2010**, *10*, 101–108.
- Shewry, P.R. Wheat. *J. Exp. Bot.* **2009**, *60*, 1537–1553.
- Shi, R.; Zhang, Y.; Chen, X.; Sun, Q.; Zhang, F.; Römhild, V.; Zou, C. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Cereal Sci.* **2010**, *51*, 165–170.
- Shirinzadeh, A.; Abad, H.H.S.; Nourmohammadi, G.; Harvan, E.M.; Madani, H. Effect of planting date on growth periods, yield, and yield components of some bread wheat cultivars in Parsabad Moghan. *Int. J. Farm. Alli. Sci.* **2017**, *6*, 109–119.
- Sieling, K.; Stahl, C.; Winkelmann, C.; Christen, O. Growth and yield of winter wheat in the first 3 years of a monoculture under varying N fertilization in NW Germany. *Eur. J. Agron.* **2005**, *22*, 71–84.
- Simón, M.R.; Fleitas, M.C.; Castro, A.C.; Schierenbeck, M. How foliar fungal diseases affect nitrogen dynamics, milling, and end-use quality of wheat. *Front. Plant Sci.* **2020**, *11*, 1568.
- Singh, C.; Kamble, U.; Gupta, V.; Singh, G.; Sheoran, S.; Gupta, A.; Tyagi, B.S.; Kumar, P.; Mishra, C.N.; Krishannapa, G.; Bishnoi, S.K.; Sharma, A.K.; Kumar, S.; Singh, G.P. Pre-harvest sprouting in wheat: Current status and future prospects. *J. Cereal Res.* **2021a**, *13*, 1–22.
- Singh, N.; Viridi, A.S.; Katyal, M.; Kaur, A.; Kaur, D.; Ahlawat, A.K.; Singh, A.M.; Sharma, R.K. Evaluation of heat stress through delayed sowing on physicochemical and functional characteristics of grains, whole meals and flours of India wheat. *Food Chem.* **2021b**, *344*, 128725.

- Singh, S.; Gupta, A.K.; Kaur, N. Influence of drought and sowing time on protein composition, antinutrients, and mineral contents of wheat. *Sci. World J.* **2012**, *2012*, 485751.
- Singh, Y.P.; Singh, S.; Dhangra, V.K.; Mishra, T. Effects of sowing dates on yield and yield components of different varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) in western Uttar Pradesh. *Int. J. Econ. Plants* **2021c**, *8*, 188–192.
- Šip, V.; Vavera, R.; Chrpova, J.; Kusa, P. Winter wheat yield and quality related to tillage practice, input level, and environmental condition. *Soil Tillage Res.* **2013**, *132*, 77–85.
- Sissons, M.; Egan, N.; Simpfendorfer, S. Effect of nitrogen fertilization and inoculation of durum wheat with fusarium pseudograminearum on yield, technological quality and gluten protein composition. *Agronomy* **2023**, *13*, 1658.
- Sjöberg, S.M.; Carter, A.H.; Steber, C.M.; Garland, K.A. Application of the factor analytic model to assess wheat falling number performance and stability in multi-environment trials. *Crops Sci.* **2021**, *61*, 372–382.
- Školníková, M.; Škarpa, P.; Ryant, P.; Kozáková, Z.; Antošovský, J. Response of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to fertilizers with nitrogen-transformation inhibitors and timing of their application under field conditions. *Agronomy* **2022**, *12*, 223.
- Soofizada, Q.; Pescatore, A.; Guerrini, L.; Fabbri, C.; Mancini, M.; Orlandini, S.; Napoli, M. Effects of nitrogen plus sulfur fertilization and seeding density on yield, rheological parameters, and asparagine content in old varieties of common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy* **2022**, *12*, 351.
- Souza, E.J.; Martin, J.M.; Guttieri, M.J.; O'Brien, K.M.; Habernicht, D.K.; Lanning, S.P.; McLean, R.; Carlson, G.R.; Talbert, L.E. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality. *Crop Sci.* **2004**, *44*, 425–432.
- Souza, T.M.; Prando, A.M.; de Miranda, M.Z.; Hirooka, E.Y.; Zucareli, C. Kernel chemical composition and flour quality of wheat in response to nitrogen sources and doses. *Rev. Agrar.* **2019**, *12*, 528–541.
- Šramková, Z.; Gregova, E.; Šturdík, E. Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. *Acta Chim. Slovaca* **2009**, *2*, 115–138.
- Staggenborg, S.; Whitney, D.; Fjell, D.; Shroyer, J. Seeding and nitrogen rates required to optimize winter wheat yields following grain sorghum and soybean. *Agron. J.* **2003**, *95*, 253–259.
- Stankowski, S.; Smagacz, J.; Hury, G.; Ułasik, S. Wpływ intensywności nawożenia azotem na jakość ziarna i mąki odmian pszenicy ozimej. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2008**, *7*, 105–114.
- Stępniewska, S. Wartość przemysłowa ziarna wybranych odmian pszenicy ze zbiorów z lat 2012–2014. *Acta Agrophysica* **2016**, *23*, 105–117.
- Sułek, A.; Cacak-Pietrzak, G.; Wyzinska, M.; Nieróbca, A. Influence of nitrogen fertilization on the yields and grain quality of winter wheat under different environmental conditions. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* **2019**, *13*, 127–133.
- Sułek, A.; Podolska, G. Plonowanie i wartość technologiczna ziarna pszenicy jarej odmiany Nawra w zależności od dawki i terminu stosowania azotu. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2008**, *7*, 103–110.
- Sun, H.; Zhang, X.; Chen, S.; Pei, D.; Liu, C. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat–summer maize in the North China Plain. *Ind. Crops Prod.* **2007**, *25*, 239–247.
- Sun, Y.; Yang, W.; Wu, Y.; Cui, Y.; Dong, Y.; Dong, Z.; Hai, J. The effects of different sowing density and nitrogen topdressing on wheat were investigated under the cultivation mode of hole sowing. *Agronomy* **2023**, *13*, 1733.
- Sunderji, S.; Bass, R.; Hand, D.; Nova, N. *Understanding Impact Performance: Agriculture Investments*; Global Impact Investing Network: New York, NY, USA, 2020. https://theiiin.org/assets/Understanding%20Impact%20Performance_Agriculture%20Investments_webfile.pdf (dostęp: 20 grudnia 2023).
- Švec, I.; Hrušková, M. Modelling of wheat, flour, and bread quality parameters. *Sci. Agric. Bohem.* **2009**, *40*, 58–66.
- Szafrańska, A.; Cacak-Pietrzak, G.; Sułek, A. Influence of nitrogen fertilization and retardants on the baking value of winter wheat. *Electron. J. Pol. Agric. Univ. EJPau Agron.* **2008**, *11*, 28.
- Szafrańska, A.; Rothkaehl, J. Liczba opadania a maksymalna lepkość kleiku skrobiowego mąki pszennej. *Przegląd Zbożowo-Młynarski* **2011**, *10*, 6–7.
- Szentpétery, Z.; Jolánkai, M.; Kleinheincs, C.; Szöllösi, G. Effect of nitrogen top-dressing on winter wheat. *Cereal Res. Commun.* **2005**, *33*, 619–626.
- Tabak, M.; Lepiarczyk, A.; Filippek-Mazur, B.; Lisowska, A. Efficiency of nitrogen fertilization of winter wheat depending on sulfur fertilization. *Agronomy* **2020**, *10*, 1304.
- Tahir, I.S.; Nakata, N.; Ali, A.M.; Mustafa, H.M.; Saad, A.S.I.; Takata, K.; Ishikawa, N.; Abdalla, O.S. Genotypic and temperature effects on wheat grain yield and quality in a hot irrigated environment. *Plant Breed.* **2006**, *125*, 323–330.
- Tahir, S.; Ahmad, A.; Khaliq, T.; Cheema, M.J.M. Evaluating the impact of seed rate and sowing dates on wheat productivity in semi-arid environment. *Int. J. Agric. Biol.* **2019**, *22*, 57–64.
- Tai, L.; Wang, H.J.; Xu, X.J.; Sun, W.H.; Ju, L.; Liu, W.T.; Li, W.Q.; Sun, J.; Chen, K.M. Pre-harvest sprouting in cereals: Genetic and biochemical mechanisms. *J. Exp. Bot.* **2021**, *72*, 2857–2876.
- Teixeira Filho, M.C.M.; Buzetti, S.; Alvarez, R.; de Freitas, J.G.; Arf, O.; de Sá, M.E. Response of wheat cultivars to plant population and nitrogen fertilization in a cerrado region. *Científica* **2008**, *36*, 97–106. (portugalski)
- Tester, M.; Langridge, P. Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science* **2010**, *327*, 818–822.
- Thapa, S.; Ghimire, A.; Adhikari, J.; Thapa, A.; Thapa, B. Impacts of sowing and climatic conditions on wheat yield in Nepal. *Malays. J. Halal Res.* **2020**, *3*, 38–40.
- Tian, S.; Zhang, M.; Li, J.; Wen, S.; Bi, C.; Zhao, H.; Wei, C.; Chen, Z.; Yu, J.; Shi, X.; Liang, R.; Xie, C.; Li, B.; Sun, Q.; Zhang, Y.; You, M. Identification and validation of stable quantitative trait loci for sds-sedimentation volume in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Front. Plant Sci.* **2021**, *12*, 747775.
- TIBCO Software Inc. *Statistica (Data Analysis Software System), Version 13*; TIBCO Software Inc.: Palo Alto, CA, USA, 2017.
- Tomaz, A.; Palma, J.F.; Ramos, T.; Costa, M.N.; Rosa, E.; Santos, M.; Boteta, L.; Dores, J.; Patanita, M. Yield, technological quality and water footprints of wheat under Mediterranean climate conditions: A field experiment to evaluate the effects of irrigation and nitrogen fertilization strategies. *Agric. Water Manag.* **2021**, *258*, 107214.
- Trevisan, S.; Khorshidi, A.S.; Scanlon, M.G. Relationship between nitrogen functionality and wheat flour dough rheology: Extensional and shear approaches. *Food Res. Int.* **2022**, *162*, 112049.

- Twizerimana, A.; Niyigaba, E.; Mugenzi, I.; Ngnadong, W.A.; Li, C.; Hao, T.Q.; Shio, B.J.; Hai, J.B. The combined effect of different sowing methods and seed rates on the quality features and yield of winter wheat. *Agriculture* **2020**, *10*, 153.
- Tyagi, P.K.; Pannu, R.K.; Sharma, K.D.; Chaudhary, B.D.; Singh, D.P. Response of different cultivars to terminal heat stress. *T. Agrochem. Cult.* **2003**, *24*, 20–21.
- United Nations. World Population Prospects. 2019. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/wpp2019_10KeyFindings.pdf (dostęp: 20 grudnia 2023).
- United States Census Bureau. International Programs. International Data Base: World Population. 2016. <http://www.census.gov/population/international/data/idb/worldpoptotal.php> (dostęp: 20 grudnia 2023).
- Valdés-Valdés, C.; Estrada-Campuzano, G.; Martínez Rueda, C.G.; Domínguez López, A.; Solís-Moya, E.; Villanueva Carvajal, A. Grain and flour wheat quality modified by genotype, availability of nitrogen, and growing season. *Int. J. Agron.* **2020**, *2020*, 1974083.
- Valério, I.P.; De Carvalho, F.I.F.; Oliveira, A.C.; Benin, G.; Souza, V.Q.; Machado, A.A.; Bertan, I.; Busato, C.C.; Silveira, G.; Fonseca, D.A.R. Seeding density in wheat genotypes as a function of tillering potential. *Sci. Agric.* **2009**, *66*, 28–39.
- Valério, I.P.; De Carvalho, F.I.F.; Benin, G.; Da Silveira, G.; Da Silva, J.A.G.; Nornberg, R.; Hagemann, T.; Luche, H.D.S.; De Oliveira, A.C. Seeding density in wheat: The more, the merrier? *Sci. Agric.* **2013**, *70*, 176–184.
- Varga, B.; Svečnjak, Z.; Jurković, Z.; Kovačević, J.; Jukić, Ž. Wheat grain and flour quality as affected by cropping intensity. *Food Technol. Biotechnol.* **2003**, *41*, 321–329.
- Vetch, J.M.; Stougaard, R.N.; Martin, J.M.; Giroux, M.J. Revealing the genetic mechanisms of pre-harvest sprouting in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Sci.* **2019**, *281*, 180–185.
- Vogeler, I.; Jensen, J.L.; Thomsen, I.K.; Labouriau, R.; Hansen, E.M. Fertiliser N rates interact with sowing time and catch crops in cereals and affect yield and nitrate leaching. *Eur. J. Agron.* **2021**, *124*, 126244.
- Wall, D.P.; Plunkett, M. *Major and Micro Nutrient Advice for Productive Agricultural Crops*; Teagasc Johnstown Castle: Wexford, Ireland, 2020; s. 176.
- Wang, K.; Taylor, D.; Ruan, Y.; Pozniak, C.J.; Izidorczyk, M.; Fu, B.X. Unveiling the factors affecting milling quality of durum wheat: Influence of kernel physical properties, grain morphology and intrinsic milling behaviours. *J. Cereal Sci.* **2023**, *113*, 103755.
- Waraich, E.A.; Ahmad, R.; Saifullah, S.A.; Ahmad, A. Impact of water and nutrient management on nutritional quality of wheat. *Plant Nutr.* **2010**, *33*, 640–653.
- Warechowska, M.; Stępień, A.; Wojtkowiak, K.; Nawrocka, A. The impact of nitrogen fertilization strategies on selected qualitative parameters of spring wheat grain and flour. *Pol. J. Nat. Sci.* **2019**, *34*, 199–212.
- Wei, Y. *Cereal and Food Quality*; Shanxi People Press: Taiyuan, China, 2002.
- Whaley, J.M.; Sparkes, D.L.; Foulkes, M.J.; Spink, J.H.; Semere, T.; Scott, R.K. The physiological response of winter wheat to reductions in plant density. *Ann. Appl. Biol.* **2000**, *137*, 165–177.
- Wieser, H. Chemistry of gluten proteins. *Food Microbiol.* **2007**, *24*, 115–119.
- Wieser, H.; Kieffer, R. Correlations of the amount of gluten protein types to the technological properties of wheat flours determined on a micro-scale. *J. Cereal Sci.* **2001**, *34*, 19–27.
- Wieser, H.; Koehler, P.; Scherf, K.A. Chemistry of wheat gluten proteins: Quantitative composition. *Cereal Chem.* **2023**, *100*, 36–55.
- Wilcox, J.; Makowski, D. A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies. *Field Crops Res.* **2014**, *156*, 180–190.
- Wojtkowiak, K.; Stępień, A.; Orzech, K. Wpływ nawożenia azotem na elementy składowe plonów, zawartość makroskładników oraz wskaźniki technologiczne w ziarnie czterech odmian pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* ssp. *vulgare*). *Fragm. Agron.* **2018**, *35*, 146–155.
- Woźniak, A.; Rachoń, L. Effect of tillage systems on the yield and quality of winter wheat grain and soil properties. *Agriculture* **2020**, *10*, 405.
- Wu, H.; Wang, Z.; Zhang, X.; Wang, J.; Hu, W.; Wang, H.; Derong, G.; Souza, E.; Cheng, S. 2022. Effects of different fertilizer treatments, environment and varieties on the yield-, grain-, flour-, and dough-related traits and cookie quality of weak-gluten wheat. *Plants* **2022**, *11*, 3370.
- Xiao, D.; Moiwo, J.P.; Tao, F.; Yang, Y.; Shen, Y.; Xu, Q.; Liu, J.; Zhang, H.; Liu, F. Spatiotemporal variability of winter wheat phenology in response to weather and climate variability in China. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* **2015**, *20*, 1191–1202.
- Xiao, D.; Tao, F.; Liu, Y.; Shi, W.; Wang, M.; Liu, F.; Zhang, S.; Zhu, Z. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981–2009. *Int. J. Biometeo.* **2013**, *57*, 275–285.
- Xue, C.; Matros, A.; Mock, H.P.; Mühling, K.H. Protein composition and baking quality of wheat flour as affected by split nitrogen application. *Front. Plant Sci.* **2019**, *10*, 642.
- Xue, C.; Schulte auf'm Erley, G.; Rossmann, A.; Schuster, R.; Koehler, P.; Muehling, K.H. Split nitrogen application improves wheat baking quality by influencing protein composition rather than concentration. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*, 738.
- Yildirim, A.; Atasoy, A. Quality characteristics of some durum wheat varieties grown in the Southeastern Anatolia Region of Turkey (GAP). *Harran J. Agric. Food Sci.* **2020**, *24*, 420–431.
- Yin, L.; Dai, X.; He, M. Delayed sowing improves nitrogen utilization efficiency in winter wheat without impacting yield. *Field Crops Res.* **2018**, *221*, 90–97.
- Zahra, N.; Hafeez, M.B.; Wahid, A.; Al Masruri, M.H.; Ullah, A.; Siddique, K.H.; Farooq, M. Impact of climate change on wheat grain composition and quality. *J. Sci. Food Agric.* **2023**, *103*, 2745–2751.
- Zain, M.; Si, Z.; Li, S.; Gao, Y.; Mehmood, F.; Rahman, S.U.; Hamani, A.K.M.; Duan, A. The coupled effects of irrigation scheduling and nitrogen fertilization mode on growth, yield, and water use efficiency in drip-irrigated winter wheat. *Sustainability* **2021**, *13*, 2742.
- Zang, Y.; Yao, H.; Ran, L.; Zhang, R.; Duan, Y.; Yu, X.; Xiong, F. Physicochemical properties of wheat starch under different sowing dates. *Starch-Stärke* **2022**, *74*, 2100290.
- Zecevic, V.; Boskovic, J.; Knezevic, D.; Micanovic, D. Effect of seeding rate on grain quality of winter wheat. *Chil. J. Agric. Res.* **2014**, *74*, 23–28.

- Zende, N.B.; Sethi, H.N.; Karunakar, A.P.; Jiotode, D.J. Effect of sowing time and fertility levels on yield and quality of durum wheat genotypes. *Res. Crops* **2005**, *6*, 194–196.
- Zhai, S.; Liu, J.; Xu, D.; Wen, W.; Yan, J.; Zhang, P.; Wan, Y.; Cao, S.; Hao, Y.; Xia, X. A Genome-wide association study reveals a rich genetic architecture of flour color-related traits in bread wheat. *Front. Plant Sci.* **2018**, *9*, 1136.
- Zhang, C.; Ju, X.; Powelson, D.; Oenema, O.; Smith, P.J. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China. *Environ. Sci. Technol.* **2019**, *53*, 6678–6687.
- Zhang, J.; Khan, S.; Sun, M.; Gao, Z.Q.; Liang, Y.F.; Yang, Q.S.; Zhang, H.Y.; Li, N. Coordinated improvement of grain yield and protein content in dryland wheat by subsoiling and optimum planting density. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **2018**, *16*, 7847–7866.
- Zhang, P.; He, Z.; Chen, D.; Zhanga, Y.; Larroquee, O.R.; Xia, X. Contribution of common wheat protein fractions to dough properties and quality of northern-style Chinese steamed bread. *J. Cereal Sci.* **2007**, *46*, 1–10.
- Zhang, Y.; Dai, X.; Jia, D.; Li, H.; Wang, Y.; Li, C.; Xu, H.; He, M. Effects of plant density on grain yield, protein size distribution, and breadmaking quality of winter wheat grown under two nitrogen fertilisation rates. *Eur. J. Agron.* **2016**, *73*, 1–10.
- Zhang, Y.; Xu, M.; Zhang, X.; Hu, Y.; Luan, G. Application of zein in gluten-free foods: A comprehensive review. *Food Res. Int.* **2022**, *160*, 111722.
- Zhang, Z.; Jia, D.; Wang, D.; Zhou, N.; Xing, Z.; Xu, K.; Wei, H.; Guo, B.; Zhang, H. Starch and dough-related properties of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to varying temperatures and radiances after anthesis. *Agronomy* **2023**, *13*, 1069.
- Zhang, Z.; Yu, Z.; Zhang, Y.; Shi, Y. Split nitrogen fertilizer application improved grain yield in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) via modulating antioxidant capacity and 13 C photosynthate mobilization under water-saving irrigation conditions. *Ecol. Process.* **2021**, *10*, 21.
- Zhang, Z.; Zhang, Y.; Shi, Y.; Yu, Z. Optimized split nitrogen fertilizer increases photosynthesis, grain yield, nitrogen use efficiency, and water use efficiency under water-saving irrigation. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 20310.
- Zheng, J.C.; Zhang, H.; Yu, J.; Liu, T.; Li, W.; Xu, F.; Wang, G.; Liu, T.; Li, J. Late sowing and nitrogen application to optimize canopy structure and grain yield of bread wheat in a fluctuating climate. *Turk. J. Field Crops* **2021**, *26*, 170–179.
- Zhong, Y.; Wang, W.; Huang, X.; Liu, M.; Hebelstrup, K.H.; Yang, D.; Cai, J.; Wang, X.; Zhou, Q.; Cao, W.; Dai, T.; Jiang, D. Nitrogen topdressing timing modifies the gluten quality and grain hardness related protein levels as revealed by iTRAQ. *Food Chem.* **2019**, *277*, 135–144.
- Zhygunov, D.; Barkovska, Y.; Yehorshyn, Y.; Zhyhunova, H.; Barikian, K. Type 600 wheat-spelt, flour with improved bakery properties. *Food Sci. Technol.* **2020**, *14*, 53–62.
- Zhygunov, D.; Sots, S.; Barkovska, Y.; Liu, J.; Wang, F.; Liu, X.; Wang, Z.; Li, X. Influence of grain quality indicators on the flour quality indicators at the laboratory milling. *Grain Prod. Mix. Fodder's* **2022**, *22*, 17–29.
- Zörb, C.; Ludewig, U.; Hawkesford, M.J. Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply. *Trends Plant Sci.* **2018**, *23*, 1029–1037.
- Zubko, V.; Sirenko, V.; Kuzina, T.; Onychko, V.; Sokolik, S.; Roubik, H.; Koszel, M.; Shchur, T. Modelling wheat grain flow during sowing based on the model of grain with shifted center of gravity. *Agric. Eng.* **2022**, *26*, 25–37.

Article

An Agronomic Efficiency Analysis of Winter Wheat at Different Sowing Strategies and Nitrogen Fertilizer Rates: A Case Study in Northeastern Poland

Krzysztof Lachutta and Krzysztof Józef Jankowski * 

Department of Agrotechnology and Agribusiness, Faculty of Agriculture and Forestry, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Oczapowskiego 8, 10-719 Olsztyn, Poland; krzysztof.lachutta@ampol-merol.pl

* Correspondence: krzysztof.jankowski@uwm.edu.pl

Abstract: This study was undertaken to examine the influence of the sowing date, sowing density, and split spring application of nitrogen (N) fertilizer on plant density, tillering, yield components, and grain yields of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in northeastern Poland between 2018 and 2021. The experiment had a split-plot design with three sowing dates (early (3–6 September), delayed by 14 days, and delayed by 28 days), three sowing densities (200, 300, and 400 live grains m^{-2}), and three split spring N rates (40 + 100, 70 + 70, and 100 + 40 kg ha^{-1} applied in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively). The number of spikes m^{-2} increased by 11% on average when winter wheat was sown with a delay of 14 days (17–20 September) and 28 days (1–4 October). The number of spikes m^{-2} was highest when winter wheat was sown at 300 and 400 live grains m^{-2} . The application of 100 + 40 kg N ha^{-1} (BBCH 22–25 and 30–31, respectively) increased the number of spikes m^{-2} . An increase in sowing density from 200 to 300 to 400 live grains m^{-2} decreased the number of grains spike $^{-1}$ by 5% and 7%, respectively. Thousand grain weight (TGW) increased by 1% and 2% when sowing was delayed by 14 (17–20 September) and 28 days (1–4 October), respectively. In northeastern Poland, grain yields peaked when winter wheat was sown between 17 September and 4 October (10.52–10.58 Mg ha^{-1}). In late-sown winter wheat, grain yields increased due to a higher number of spikes m^{-2} and higher grain weight. The highest sowing density (400 live grains m^{-2}) induced a greater increase in grain yields than the lowest sowing density (200 live grains m^{-2}) (10.25 vs. 10.02 Mg ha^{-1}). In winter wheat sown at a density of 400 live grains m^{-2} , the increase in grain yields resulted in a higher number of spikes m^{-2} . Grain yields peaked in response to 100 kg N ha^{-1} applied in BBCH stages 22–25 and 40 kg N ha^{-1} applied in BBCH stages 30–31 (this split N rate increased the number of spikes m^{-2}). In turn, the highest straw yield (6.23 Mg ha^{-1}) was obtained when the second split of N fertilizer was applied in BBCH stages 30–31 (40 + 100 kg N ha^{-1}). Straw yields decreased significantly (by 6%) when winter wheat was sown late (early October). Delayed sowing (mid-September and early October) increased the harvest index (HI) of winter wheat by 5–7%. Split spring N application influenced grain and straw yields, but it had no effect on the HI of winter wheat.

Keywords: *Triticum aestivum* L.; sowing date; sowing density; split nitrogen application; tillering; yield components; yield; grain; straw; harvest index



Citation: Lachutta, K.; Jankowski, K.J. An Agronomic Efficiency Analysis of Winter Wheat at Different Sowing Strategies and Nitrogen Fertilizer Rates: A Case Study in Northeastern Poland. *Agriculture* **2024**, *14*, 442. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030442>

Academic Editors: Haiyong Xia, Xinglong Dai and Xiaoli Hui

Received: 27 January 2024

Revised: 22 February 2024

Accepted: 7 March 2024

Published: 8 March 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In the European Union (EU), the contribution of agriculture to the gross domestic product (GDP), one of the indicators of economic well-being, is generally low (approx. 1–2%) [1,2]. However, the role of agriculture is not to stimulate the economic growth of countries/regions, but to guarantee food security and, increasingly often, energy security [1,3–5]. It should also be noted that alternative scenarios for the use of agricultural raw materials (energy, chemicals, etc.) are possible, provided that non-competitive models of economic cooperation are introduced in production and processing [6–8]. Recent events clearly indicate that strategic food reserves should be produced locally. In countries that rely heavily on food imports, any disruptions

in the supply chain (pandemics, military conflicts) can limit the availability and affordability of food and undermine the biological survival of nations [9–11]. Cereals play a particularly important role in catering to the global food demand. The share of cereals in the human diet (based on energy equivalents) ranges from 30% to 80% [12]. Cereals occupy around 51% of arable land in the world [13]. The current increase in global cereal production caters solely to the needs of the world's growing population, and it does significantly affect production volume per capita, which has remained stable at around 380 kg for many years [13]. Wheat, in particular common wheat (*Triticum aestivum* L.), occupies more land than any other food crop. In 2021, wheat was grown on 220 million ha, with a mean yield of 3.4 Mg ha⁻¹ [13]. The global population is projected to increase to 9.7 billion by 2050, and so the significance of wheat as a strategic crop for global food security will continue to grow [14–16]. The expected increase in the supply of wheat grain can be achieved mainly through an improvement in yields [17–19]. A further increase in the area under wheat cultivation is unlikely because agricultural expansion has adverse environmental and social consequences (closure of small farms, community displacement, and decreased availability of land for non-agricultural use) [20,21].

Wheat yields could be increased by introducing new, high-yielding cultivars and developing production technologies that maximize nitrogen-use efficiency (NUE) [15,22]. Wheat genotypes that effectively utilize N offer a sustainable approach to meeting the growing global demand for grain [15].

Nearly 30% of global nitrogen (N) fertilizer is used in wheat production [23]. Nitrogen significantly increases yields, but excessive N fertilization has negative consequences, such as high soil acidity, greenhouse gas emissions, and water pollution [24–26]. Inadequate N management not only decreases wheat yields, but it can also contribute to the loss of N due to leaching, surface erosion, volatilization, and denitrification [27–29]. Higher N rates lead to a decrease in NUE [26,30–32]; therefore, N rates should be balanced with NUE to promote the sustainable development of global crop production and minimize the consequences of climate change [24,33].

Soil N levels are generally sufficient to promote the growth of winter wheat in fall and winter, but rapid plant growth in spring may lead to N deficiency [34]. In Europe, N fertilizer is applied in three splits during the spring growth of winter wheat [35–38]. The first split of N fertilizer is applied at the beginning of spring growth, which, in properly managed stands, corresponds to the tillering stage (BBCH 22–25, Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie [39]) [40]. In this stage of rapid plant growth, an adequate supply of N increases the NUE of winter wheat [41]. The first spring rate of N stimulates the development of side shoots and, consequently, increases the number of spikes, which are the main yield component. The first N rate should be selected based on the overwintering success of wheat stands. Stands that produced numerous shoots in fall and did not sustain losses in winter should not be supplied with very high N rates in early spring. Excess supply of N in spring can damage emerging shoots, and increased competition between tillers will inhibit the development of the root system [42]. In turn, winter wheat stands with sparse tillers require higher N rates in early spring [43]. The second application of N in the stem elongation stage (BBCH 30–32) regulates the development of side shoots, prevents a decrease in the number of spikelets and the number of grains per spike, and prolongs green area duration. Excess N supply in this period can lead to the rapid growth of above-ground biomass and tillers, which can contribute to lodging [43]. In many European regions, a third application of N in spring (BBCH 37–51) is required in the production of winter wheat for human consumption [34,35]. The third application of N enhances the quality of winter wheat by increasing the protein and gluten content of grain, but it has a minor effect on grain yield [43]. In a study by Podolska [44], the total N rate of 120 kg ha⁻¹ applied in two splits of 60 kg N ha⁻¹ each (spring emergence and beginning of stem elongation) induced a greater increase in yields than the same N rate divided into three portions of 40 kg N ha⁻¹ each (spring emergence, beginning of stem elongation, and heading). In turn, in the work of Barad et al. [45], yields were higher when winter wheat was supplied with 40 kg N ha⁻¹ in the tillering stage and 80 kg N ha⁻¹ at the beginning of stem elongation than with three

equal splits of 60 kg N ha⁻¹ each. The observed difference in grain yields resulted from a 14% increase in the number of spikes m⁻², a 12% increase in the number of grains spike⁻¹, and a 12% increase in TGW). According to Fageria et al. [46], in the early stages of plant growth, weakly developed roots are unable to effectively absorb large amounts of N.

Winter wheat yields and NUE are also influenced by the remaining agronomic practices, in particular sowing date [47,48] and sowing density [49]. Global climate change has prolonged the growth of winter wheat in fall, which prompts farmers to delay the sowing date [50–52]. However, delayed sowing can compromise N uptake in plants and decrease NUE [48], uptake efficiency (UPE), and utilization efficiency (UTE) [53].

Sowing density is a critical determinant of wheat grain yield because it optimizes the number of spikes m⁻² [54–56]. Plant density that is too low can compromise nutrient use efficiency, including NUE, thus decreasing grain yields [56–58]. In turn, too high sowing density can increase production costs and decrease yields due to a higher risk of disease, pest infestation, and lodging [59,60]. The optimal density of winter wheat stands at harvest is 550–650 spikes m⁻², which guarantees high yields in Poland and can be achieved through both low sowing density (promoting productive tillering) and high sowing density (limiting tillering). In the first case, winter wheat is sown at 200–300 live grains m⁻² to obtain 2–3 productive shoots per plant and maximize yields. However, the performance of low-density stands is highly dependent on environmental conditions (soil, weather, fertilizer rate, etc.). Under unfavorable conditions (light soil, dry year, low fertilizer rate, etc.), grain yields are highly likely to decrease in low-density stands [43]. The yield components of wheat effectively adapt to changes in environmental conditions [57,59]. However, these compensatory mechanisms differ across wheat genotypes [59,61]. In low-density stands that do not fully utilize the productive potential of a given site, the number of side shoots can increase to compensate for the absence of plants and to produce more spikes [62]. In turn, higher sowing densities can directly increase the number of spikes per unit area, but also decrease the weight and number of grains per spike [59,61]. Wheat seeding rates should be adjusted to optimize NUE [49,63,64]. In a study by Gao et al. [65], an increase in seeding rate from 180 kg ha⁻¹ to 220 kg ha⁻¹ increased the NUE by 17% on average. This observation indicates that higher sowing density can enhance N uptake when its supply is limited. According to Dai et al. [64], N uptake from deep soil layers can be improved by decreasing the N rate and increasing the sowing density.

The aim of this study was to determine the effect of sowing date, sowing density, and the split spring application of N fertilizer on the yield components (spikes m⁻², grains spike⁻¹, TGW) and yields of winter wheat (grain yield, straw yield, harvest index—HI) grown in northeastern Poland.

2. Materials and Methods

2.1. Field Experiment

Winter wheat (*Triticum aestivum* L.) was grown in a small-area field experiment conducted in the Agricultural Experiment Station (AES) in Bałcyny (53°35′46.4″ N, 19°51′19.5″ E, elevation 137 m, in NE Poland) between 2018 and 2021. The AES is part of the University of Warmia and Mazury in Olsztyn. The experimental variables were (i) sowing date: early (6 September 2018; 5 September 2019; 3 September 2020), delayed by 14 days (17–20 September), and delayed by 28 days (1–4 October); and (ii) sowing density: 200, 300, and 400 live grains m⁻²; (iii) split spring application of N at BBCH 22–25 + BBCH 30–31: 40 + 100, 70 + 70, and 100 + 40 kg ha⁻¹.

The experiment had a split-plot with three replications. The plot size was 15 m² (10 by 1.5 m). The preceding crop was winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). After the preceding crop was harvested (late July) in each year of the experiment, the field was skimmed to a depth of 6–8 cm and fertilized with 20 kg N ha⁻¹ (urea, 46% N), 17.4 kg P ha⁻¹ (enriched superphosphate, 17.4% P), and 41.5 kg K ha⁻¹ (potash salt, 49.8% K). The field was harrowed once (with a light-duty disc harrow) to incorporate the fertilizers and control weeds. In late August, the field was plowed to a depth of 20–22 cm. A shallow tillage

treatment was performed 4–5 days before sowing to level the soil. Winter wheat cv. Julius was sown to a depth of 3 cm with an inter-row spacing of 12.5 cm on the dates and at the densities described in the experimental design. Winter wheat was sown with a plot seeder (Promar SPZ-1.5, Poznań, Poland). Weeds were controlled with metribuzin (49 g ha^{-1}), flufenacet (147 g ha^{-1}), and diflufenican (100 g ha^{-1}) in BBCH stages 11–12. The first and the second splits of N fertilizer (ammonium nitrate, 34%) were applied in spring in BBCH stages 22–25 and 30–31 in the amounts indicated in the experimental design. The third split of N fertilizer (40 kg ha^{-1} ; ammonium nitrate, 34%) was applied in BBCH stage 37 in all plots. In BBCH stage 31, trinexapac-ethyl was applied at 100 g ha^{-1} to regulate plant growth. During the spring growing season, an insecticide was applied once (5 g ha^{-1} deltamethrin, BBCH 51–52) and fungicides were applied three times: (i) 375 g ha^{-1} spiroxamine + 150 g ha^{-1} prothioconazole + 75 g ha^{-1} bixafen (BBCH 30–31); (ii) 75 g ha^{-1} benzovindiflupyr + 150 g ha^{-1} prothioconazole (BBCH 37–39); and (iii) 250 g ha^{-1} tebuconazole (BBCH 61). Winter wheat was harvested in late July or early August (BBCH 89) with a small-plot harvester (Wintersteiger Classic, type 1540–447, Ried im Innkreis, Austria).

The experiment was established on Haplic Luvisol originating from boulder clay [66]. Soil pH ranged from 6.2 to 6.4 (digital pH meter), and soil nutrient levels were determined in the range of 1.22–1.39% C_{org} (modified Kurmies method; UV-1201V spectrophotometer, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan), $74.6\text{--}128.9 \text{ mg kg}^{-1}$ P (vanadium molybdate yellow colorimetric method; UV-1201V spectrophotometer, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan), $128.6\text{--}199.2 \text{ mg kg}^{-1}$ K (atomic emission spectrometry; Flame Photometers, BWB Technologies Ltd., Newbury, UK), $32.6\text{--}49.4 \text{ mg kg}^{-1}$ Mg (atomic absorption spectrophotometry; AAS1N, Carl Zeiss, Jena, Germany), and $1.0\text{--}1.86 \text{ mg kg}^{-1}$ SO_4^{2-} (nephelometry method; UV-1201V spectrophotometer, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan). The chemical properties of soil were determined in the laboratory of the District Chemical–Agricultural Station in Olsztyn.

2.2. Parameters Determined in the Field

The number of plants per m^2 was determined after emergence (BBCH 12–13) and in spring (BBCH 22–25) by counting plants ten times in each plot (four middle rows) on both sides of a 1 m band. In spring (BBCH 29), tillering was assessed by counting the number of shoots plant^{-1} in 80 randomly selected plants (8×10 plants) sampled from the four middle rows in each plot. The number of spikes was determined directly before harvest at five random locations in a plot with an area of 0.25 m^2 . The number of grains per spike was determined in 500 spikes randomly sampled from each plot (10×50 spikes). Thousand grain weight was determined in five samples of threshed grain (100 g each) from each plot. In each plot, grain and straw yields were determined by weighting directly after threshing. The dry matter (DM) content of grain and straw was determined directly after harvest by drying in an oven (FD 53 Binder GmbH, Tuttlingen, Germany) until constant weight (Equation (1)). Grain and straw yields in each plot were adjusted to 86% DM and expressed per 1 ha. The HI was calculated using Equation (2):

$$\text{Moisture content (\%)} = \frac{\text{Wet sample weight (g)} - \text{dry sample weight (g)}}{\text{Wet sample weight (g)}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Harvest index} = \frac{\text{Grain yield (Mg DM ha}^{-1}\text{)}}{\text{Grain and straw yield (Mg DM ha}^{-1}\text{)}} \quad (2)$$

2.3. Statistical Analysis

Plant density, tillering, the number of spikes m^{-2} , the number of grains spike^{-1} , TGW, grain yield, straw yield, and HI were analyzed in a general linear mixed model using Statistica software [67]. Sowing date, sowing density, and the split spring N rate were the fixed effects, whereas years and replications were the random effects. Treatment means were compared in Tukey's honest significant difference (HSD) test at a significance level of $p \leq 0.05$. The results of the *F*-test for fixed effects in ANOVA are presented in Table 1.

Table 1. *F*-test statistics in ANOVA of plant density, tillering, grain yield components, biomass yield, and the harvest index.

Trait	Plants m ⁻² (BBCH 12–13)	Plants m ⁻² (BBCH 22–25)	Shoots Plant ⁻¹ (BBCH 29)	Shoots m ⁻² (BBCH 29)	Spikes m ⁻²	Grains Spike ⁻¹	1000-Grain Weight (g)	Grain Yield (Mg ha ⁻¹)	Straw Yield (Mg ha ⁻¹)	Harvest Index
Y	11.086 **	10.515 **	32.657 **	9.677 **	179.406 **	83.788 **	101.954 **	256.557 **	46.733 **	11.226 **
SDE	5.938 **	5.310 **	22.008 **	32.784 **	29.615 **	0.893 ns	6.377 **	115.474 **	3.745 *	9.994 **
SDY	101.444 **	93.057 **	3.913 *	68.407 **	22.660 **	15.478 **	0.647 ns	3.702 *	3.602 *	0.047 ns
N	0.025 ns	0.030 ns	3.542 *	3.475 *	3.382 *	0.191 ns	0.547 ns	3.100 *	0.892 ns	0.261 ns
Y × SDE	8.551 **	7.932 **	12.085 **	14.453 **	22.752 **	3.724 **	1.372 ns	28.858 **	4.696 **	4.245 **
Y × SDY	0.220 ns	0.231 ns	2.282 ns	0.541 ns	2.408 ns	1.268 ns	2.197 ns	3.125 *	0.499 ns	0.941 ns
Y × N	0.050 ns	0.040 ns	3.750 **	2.862 ns	1.636 ns	1.886 ns	0.430 ns	0.686 ns	0.496 ns	0.154 ns
SDE × SDY	0.820 ns	0.758 ns	0.512 ns	1.039 ns	1.821 ns	0.662 ns	0.867 ns	1.950 ns	6.093 **	0.511 ns
SDE × N	0.040 ns	0.032 ns	0.219 ns	0.184 ns	2.325 ns	0.793 ns	1.992 ns	0.906 ns	1.094 ns	0.155 ns
SDY × N	0.022 ns	0.015 ns	0.211 ns	0.240 ns	0.380 ns	0.286 ns	0.377 ns	0.800 ns	0.526 ns	0.313 ns
Y × SDE × SDY	1.948 ns	1.829 ns	1.822 ns	1.859 ns	0.893 ns	0.772 ns	0.756 ns	0.414 ns	1.707 ns	0.889 ns
Y × SDE × N	0.036 ns	0.041 ns	0.142 ns	0.188 ns	0.945 ns	0.352 ns	0.488 ns	0.381 ns	0.245 ns	0.094 ns
Y × SDY × N	0.030 ns	0.028 ns	0.227 ns	0.135 ns	1.805 ns	1.853 ns	0.096 ns	0.343 ns	0.266 ns	0.082 ns
SDE × SDY × N	0.032 ns	0.044 ns	0.352 ns	0.209 ns	1.151 ns	0.771 ns	0.805 ns	0.191 ns	0.623 ns	0.630 ns
Y × SDE × SDY × N	0.040 ns	0.039 ns	0.280 ns	0.256 ns	1.155 ns	0.781 ns	0.558 ns	0.181 ns	0.388 ns	0.444 ns

* significant $p \leq 0.05$; ** significant $p \leq 0.01$; ns—not significant; Y—growing season; SDE—sowing date; SDY—sowing density; N—split spring N rate.

3. Results

3.1. Weather Conditions

In all years of the experiment, the fall growing season (September–November) of winter wheat was characterized by low precipitation (61–82% of the long-term average for 1981–2015) and high mean daily temperatures (2.0 °C above the long-term average). During winter dormancy (December–March), mean daily temperatures exceeded the long-term average by 2.8 °C, while winter precipitation approximated the long-term average in all years of the study (Figure 1).

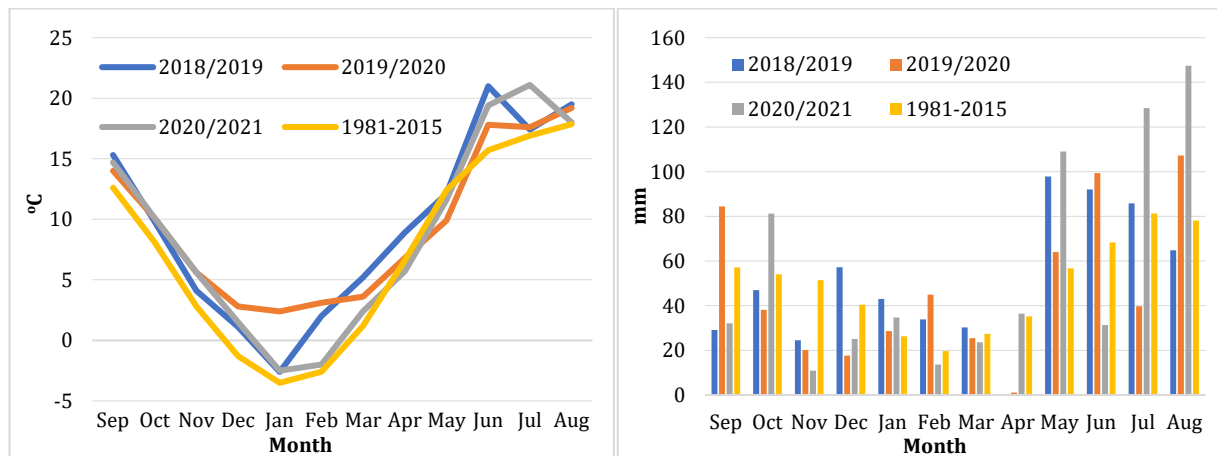


Figure 1. Average monthly temperature (°C) and total monthly rainfall (mm) during the growing season of winter wheat in 2018–2021 and the long-term average (1981–2015) at the experimental site.

In all years of the experiment, mean daily temperatures approximated the long-term average in April and May but exceeded the long-term average in June–August. Precipitation levels in the spring growing seasons differed considerably over several years. In the first growing season (2018/2019), there was no rainfall in April, whereas precipitation levels in May, June, and July exceeded the long-term average by 72%, 35%, and 5%, respectively. In the second growing season (2019/2020), April was also an extremely dry month (1 mm), but heavy precipitation was noted in May and June (113% and 145% above the long-term average, respectively). In the third growing season (2020/2021), May, July, and August were characterized by abundant precipitation (192%, 156%, and 189% above the long-term average, respectively). Total rainfall during the growing season of winter wheat was determined at 605 mm in 2018/2019, 570 mm in 2019/2020, and 674 mm in 2020/2021. The long-term monthly average (1981–2015) in the study area was 596 mm.

3.2. Plant Density and Tillering

After emergence, and in early spring, plant density was considerably differentiated by weather conditions, sowing date, and sowing density (Table 1). Favorable weather conditions in winter contributed to the high overwintering success rate of winter wheat plants (98–99%). Plant density after emergence and in early spring was highest in the second growing season. On average, plant density after emergence and in early spring was 15% lower in the first and third growing season. Delayed sowing (early October) decreased plant density in fall and spring by 13% relative to early sowing (September) (Table 2). Sowing delayed by 28 days induced a significant 40% decrease in plant density after emergence and in early spring in the third growing season (Figure 2). Higher sowing densities promoted a gradual increase in the number of plants after emergence and in early spring (Table 2), regardless of weather conditions (Table 1).

Table 2. Plant density and tillering of winter wheat.

Parameter	Plants m ^{−2}		Shoots Plant ^{−1} (BBCH 29)	Shoots m ^{−2} (BBCH 29)
	BBCH 12–13	BBCH 22–25		
Growing season				
2018/2019	257 ^b	254 ^b	5.0 ^b	1268 ^b
2019/2020	319 ^a	316 ^a	3.9 ^c	1232 ^b
2020/2021	285 ^b	282 ^b	5.4 ^a	1491 ^a
Sowing date, mean for 2018–2021				
Early	299 ^a	295 ^a	5.4 ^a	1560 ^a
Delayed (+14 days)	301 ^a	298 ^a	4.7 ^b	1380 ^b
Delayed (+28 days)	261 ^b	258 ^b	4.1 ^c	1051 ^c
Sowing density (live grains m ^{−2}), mean for 2018–2021				
200	193 ^c	191 ^c	5.0 ^a	959 ^c
300	286 ^b	283 ^b	4.7 ^{ab}	1326 ^b
400	381 ^a	377 ^a	4.5 ^b	1705 ^a
Split spring N rate (kg ha ^{−1}), mean for 2018–2021 †				
40 + 100	287	284	4.5 ^b	1272 ^b
70 + 70	285	282	4.6 ^{ab}	1292 ^{ab}
100 + 40	288	286	5.0 ^a	1427 ^a

† BBCH 22–25 + BBCH 30–31. Plant density and the number of shoots per plant were determined in spring before the second application of N fertilizer. Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test. Means without letters indicate that the main effect is not significant.

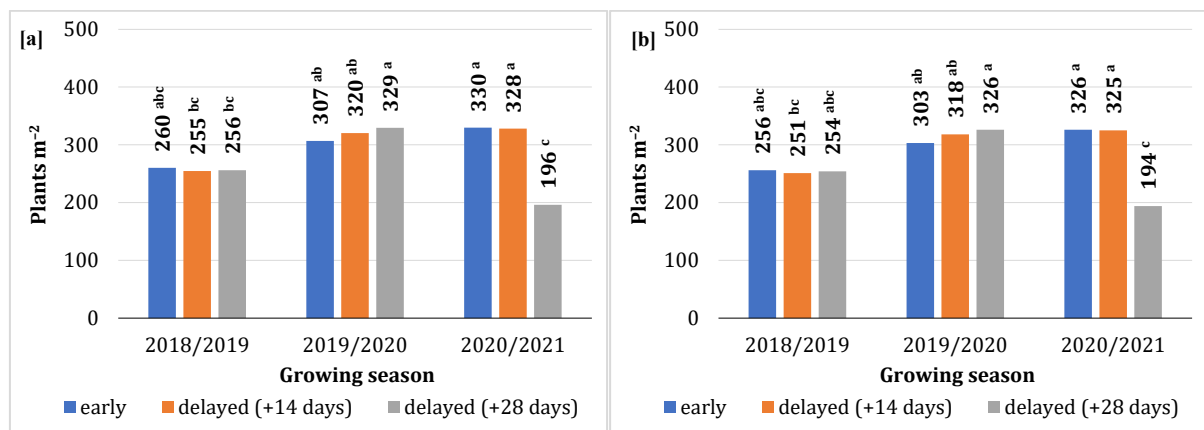


Figure 2. The effect of sowing date on the number of winter wheat plants in stages (a) BBCH 12–13, and (b) BBCH 22–25 (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021; mean for sowing density and split spring N rate). Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

The number of shoots plant⁻¹ and the number of shoots m⁻² were significantly differentiated by all experimental factors (Table 1). The values of both parameters were highest in the third growing season (2020/2021). In plots where sowing was delayed by 14 and 28 days, the number of shoots plant⁻¹ decreased by 13% and 24%, respectively, at the end of the tillering stage (BBCH 29) (Table 2). The number of shoots plant⁻¹ was not only affected by the sowing date in the growing season of 2019/2020 (Figure 3a). An increase in sowing density from 200 to 400 live grains m⁻² decreased the number of shoots plant⁻¹

by 10% in BBCH stage 29. A decrease in the first spring rate of N (BBCH 22–25) from 100 to 40 kg ha⁻¹ reduced the number of shoots plant⁻¹ by 10% on average (Table 2). The strongest response to the first spring rate of N was observed in the third growing season, when 100 kg N ha⁻¹ applied in BBCH stages 22–25 increased the number of shoots plant⁻¹ by 32% (Figure 3b).

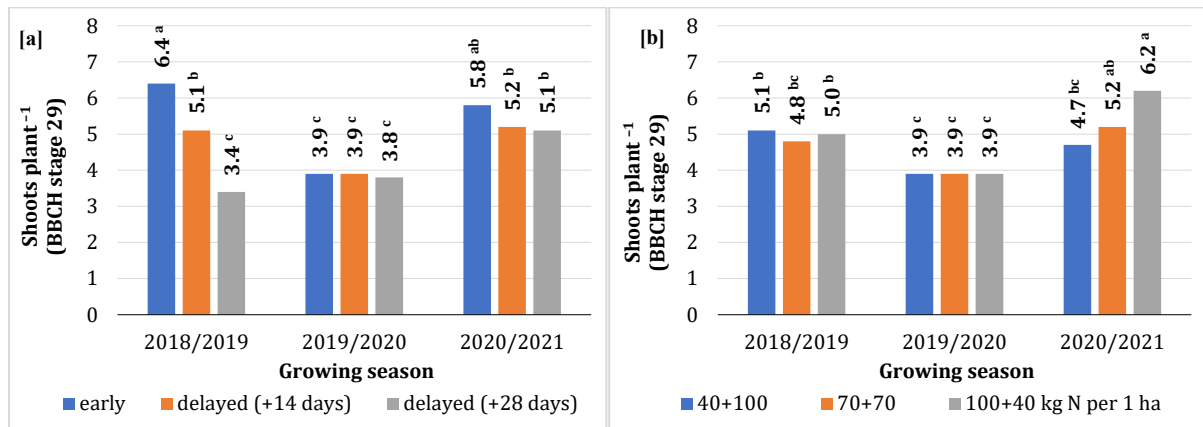


Figure 3. The effect of (a) sowing date and (b) split spring N rate on the number of shoots per plant of winter wheat (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021; (a): mean for sowing density and split spring N rate; (b) mean for sowing date and sowing density). The number of shoots per plant was counted before the second application of N fertilizer. Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

Delayed sowing also decreased the number of shoots m⁻² in BBCH stage 29 (which was calculated by multiplying plant density by the number of shoots per plant) (Table 2). Winter wheat sown in early October produced 33% fewer shoots m⁻² on average than wheat sown on the earliest date (3–6 September) (Table 2). The sowing date did not only affect the number of shoots m⁻² in the growing season of 2019/2020. In the remaining seasons, the number of shoots m⁻² decreased by 47–48% when sowing was delayed to early October (Figure 4). An increase in sowing density from 200 to 300 and 400 live grains m⁻² increased the number of shoots m⁻² by 38% and 78%, respectively. The number of shoots m⁻² increased by 12% when the first spring rate of N (BBCH 22–25) was increased from 40 to 100 kg ha⁻¹ (Table 2).

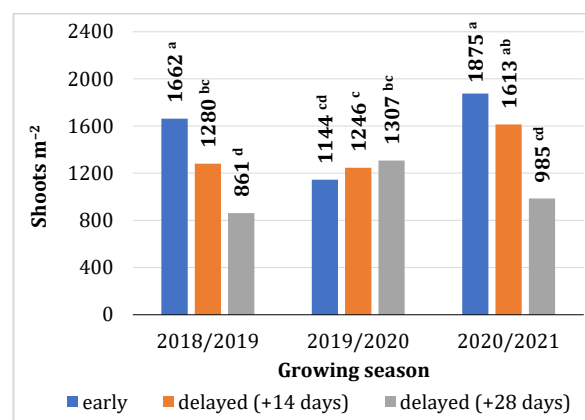


Figure 4. The effect of sowing date on the number of shoots m⁻² in BBCH stage 29 of winter wheat (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021; mean for sowing density and split spring N rate). Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

3.3. Yield Components

Winter wheat grown in northeastern Poland produced from 406 (2020/2021) to 538 (2018/2019) spikes m^{-2} . The number of spikes m^{-2} was lowest in the third growing season, which was characterized by the highest number of shoots plant^{-1} (5.4) and shoots m^{-2} (1491). In the third growing season, the number of shoots was strongly reduced between the late tillering stage and the heading stage, which could be attributed to low precipitation in June (approx. 50% of the long-term average). In the remaining seasons, June precipitation exceeded the long-term average by 35–45%. In the dry month of June, strong competition for light in dense stands could have additionally contributed to the observed decrease in the number of shoots. The number of spikes m^{-2} increased by 11% on average when sowing was delayed by 14 (17–20 September) and 28 days (1–4 October) (Table 3). Sowing date did not affect the number of spikes m^{-2} only in the first growing season. In the remaining seasons, winter wheat stands sown in mid-September or in early October were characterized by the highest number of spikes m^{-2} (Figure 5). The number of spikes m^{-2} was also significantly differentiated by sowing density (Table 1). The value of this parameter was lowest when winter wheat was sown at a density of 200 live grains m^{-2} . An increase in sowing density to 300 live grains m^{-2} led to a significant 8% increase in the number of spikes m^{-2} . A further increase in sowing density (400 live grains m^{-2}) did not induce significant changes in the number of spikes m^{-2} . The application of 100 + 40 kg N ha^{-1} (BBCH 22–25 and 30–31, respectively) had a positive impact on the number of spikes m^{-2} . The number of spikes m^{-2} decreased by 4% when the early spring rate of N was reduced to 40 kg ha^{-1} (40+100 kg N ha^{-1}) (Table 3).

Table 3. Yield components of winter wheat.

Parameter	Spikes m^{-2}	Grains Spike $^{-1}$	1000-Grain Weight (g)
Growing season			
2018/2019	538 ^a	43.7 ^c	45.53 ^b
2019/2020	507 ^b	45.4 ^b	47.76 ^a
2020/2021	406 ^c	51.5 ^a	43.39 ^c
Sowing date, mean for 2018–2021			
Early	452 ^b	47.3	44.95 ^c
Delayed (+14 days)	504 ^a	46.5	45.72 ^b
Delayed (+28 days)	495 ^a	46.7	46.01 ^a
Sowing density (live grains m^{-2}), mean for 2018–2021			
200	456 ^b	48.8 ^a	45.60
300	492 ^a	46.3 ^b	45.37
400	503 ^a	45.4 ^b	45.71
Split spring N rate (kg ha^{-1}), mean for 2018–2021 †			
40 + 100	477 ^b	46.8	45.63
70 + 70	479 ^{ab}	47.1	45.67
100 + 40	495 ^a	46.7	45.38

† BBCH 22–25 + BBCH 30–31; Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test. Means without letters indicate that the main effect is not significant.

Winter wheat produced 43.7 and 51.5 grains spike $^{-1}$ in the 2018/2019 and 2020/2021 seasons, respectively (Table 3). On average, the sowing date did not significantly influence the number of grains spike $^{-1}$ (Table 1). The number of grains spike $^{-1}$ only decreased in the third season, reducing by 7% when sowing was delayed by 28 days (early October) (Figure 6). An increase in sowing density from 200 to 300 to 400 live grains m^{-2} decreased

the number of grains spike⁻¹ by 5% and 7%, respectively (Table 3), regardless of weather conditions (Table 1). The split application of different N rates in spring had no significant influence on the number of grains spike⁻¹ (Table 1).

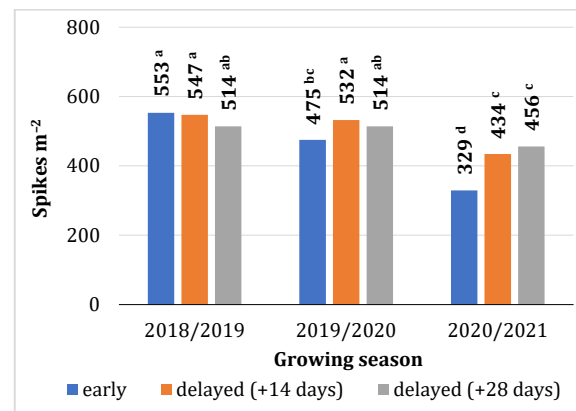


Figure 5. The effect of sowing date on the number of winter wheat spikes m⁻² (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021; mean for sowing density and split spring N rate). Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

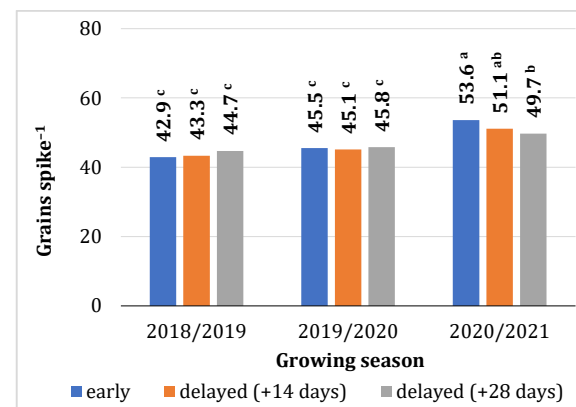


Figure 6. The effect of sowing date on the number of grains spike⁻¹ in winter wheat (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021; mean for sowing density and split spring N rate). Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

The thousand grain weight was significantly influenced by weather conditions and sowing date (Table 1). The value of this parameter was highest in the second growing season (47.76 g). On average, TGW was 5% and 9% lower in the first and third growing season, respectively. Winter wheat sown in early September was characterized by the lowest TGW (44.95 g). Sowing delayed by 14 (17–20 September) and 28 days (1–4 October) increased TGW by 1% and 2%, respectively (Table 3).

3.4. Biomass Yield and the Harvest Index

The grain yields of winter wheat grown in northeastern Poland ranged from 8.99 (2020/2021) to 10.57–10.90 Mg ha⁻¹ (2018/2019 and 2019/2020) (Table 4). The number of spikes m⁻² and TGW were 20–25% and 5–9% lower, respectively, in the third growing season than in the remaining seasons, which resulted in the lowest yields in the third year of the study. Early sowing (3–6 September) decreased grain yields (9.36 Mg ha⁻¹). Grain yields were considerably higher (by 12–13% on average) when winter wheat was sown between 17 September and 4 October (Table 4). Winter wheat sown with a delay of 14 and

28 days was characterized by a significantly higher number of spikes m^{-2} (by 10–12%) and higher TGW (by 1–2%) (Table 3). Sowing date only exhibited no effect on the grain yields in the first growing season. In the second and third growing season, grain yields were 10% and 22% lower in early sown winter wheat (3–6 September), respectively, than in wheat sown with a delay of 14 and 28 days (Figure 7a). Sowing density induced minor differences ($\pm 2\%$) in grain yields. However, yields were higher in densely sown (400 live grains m^{-2}) than in sparsely sown stands (200 live grains m^{-2}) (10.25 vs. 10.02 Mg ha^{-1}) (Table 4). Grain yields were not influenced by sowing density during the second growing season exclusively (Figure 7b). In stands sown at 400 live grains m^{-2} , yields increased due to a rise in the number of spikes m^{-2} (by 8–10%). However, higher sowing density decreased the number of grains spike $^{-1}$ by 5–7% (Table 3). Yields peaked in response to 100 and 40 kg N ha^{-1} applied in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively (Table 4), regardless of sowing date or sowing density (Table 1). When a portion of N was moved from the first to the second split (40 + 100 kg N ha^{-1} in BBCH 22–25 and 30–31, respectively), grain yields decreased by 2%, mainly due to a decrease in the number of spikes m^{-2} (Table 3).

Table 4. Biomass yield and the harvest index of winter wheat.

Parameter	Grain Yield (Mg ha^{-1})	Straw Yield (Mg ha^{-1})	Harvest Index
Growing season			
2018/2019	10.57 ^b	6.78 ^a	0.61 ^b
2019/2020	10.90 ^a	5.89 ^b	0.65 ^a
2020/2021	8.99 ^c	5.28 ^c	0.64 ^a
Sowing date, mean for 2018–2021			
Early	9.36 ^b	6.10 ^a	0.61 ^b
Delayed (+14 days)	10.58 ^a	6.11 ^a	0.64 ^a
Delayed (+28 days)	10.52 ^a	5.74 ^b	0.65 ^a
Sowing density (live grains m^{-2}), mean for 2018–2021			
200	10.02 ^b	5.87	0.64
300	10.19 ^{ab}	6.07	0.64
400	10.25 ^a	6.01	0.63
Split spring N rate (kg ha^{-1}), mean for 2018–2021 †			
40 + 100	10.03 ^b	6.23 ^a	0.63
70 + 70	10.17 ^{ab}	5.87 ^b	0.63
100 + 40	10.25 ^a	5.86 ^b	0.63

† BBCH 22–25 + BBCH 30–31; Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October; Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test. Means without letters indicate that the main effect is not significant.

Straw yields ranged from 5.28–5.89 (2019/2020 and 2020/2021) to 6.78 Mg ha^{-1} (2018/2019). Delayed sowing (early October) significantly decreased straw yields (by 6%) (Table 4), and the sowing date only had no effect on straw yields in the first growing season (Figure 8). The relationship between sowing density and straw yields was influenced by the sowing date (Table 1). In early sown stands (early September), an increase in sowing density from 200 to 300 and 400 live grains m^{-2} decreased straw yields by 16% and 20%, respectively. In stands sown with a delay of 14 and 28 days, straw yields were not significantly differentiated by sowing density (200, 300, and 400 live grains m^{-2}) (Figure 9). Straw yields peaked (6.23 Mg ha^{-1}) in response to the lowest first spring rate of N (40 + 100 kg ha^{-1} in BBCH 22–25 and 30–31, respectively). Straw yields decreased by 6% on average when the first spring rate of N was increased to 70 or 100 kg ha^{-1} and when the second N rate was decreased (70 + 70 or 100 + 40 kg ha^{-1}) (Table 4).

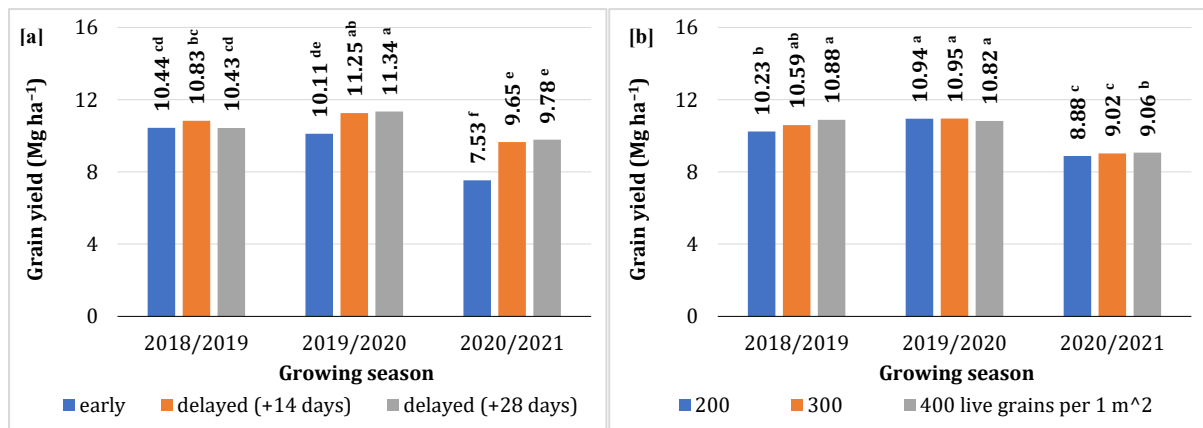


Figure 7. The effect of (a) sowing date and (b) sowing density on the grain yield of winter wheat (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021; (a) mean for sowing density and split spring N rate; (b) mean for sowing date and split spring N rate). Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

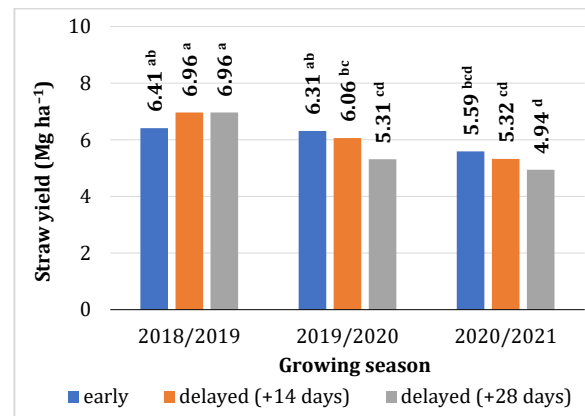


Figure 8. The effect of sowing date on the straw yield of winter wheat (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021; mean for sowing density and split spring N rate). Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

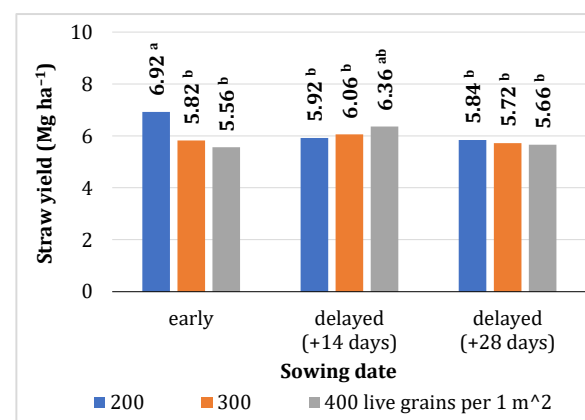


Figure 9. The effect of sowing date and sowing density on the straw yield of winter wheat (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021; mean for sowing date and split spring N rate). Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

The HI of winter wheat ranged from 0.61 (2018/2019) to 0.64–0.65 (2019/2020–2020/2021). The HI increased by 5–7% when sowing was delayed to mid-September and early October (Table 4). The sowing date did not significantly influence the HI of winter wheat only in the first growing season (Figure 10). The ratio of grain yield to biomass yield was not significantly affected by sowing density or the split spring N rate (Table 1).

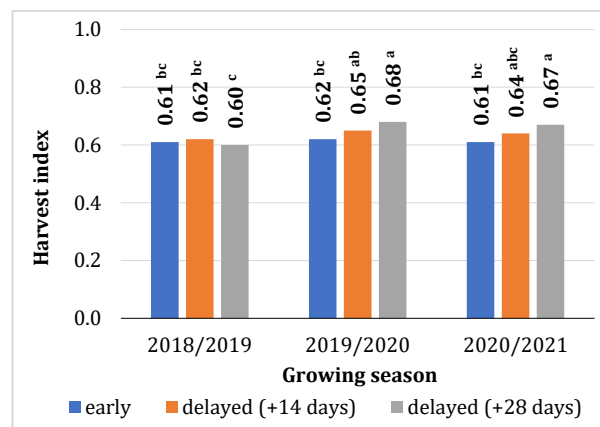


Figure 10. The effect of sowing date on the harvest index of winter wheat (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021; mean for sowing density and split spring N rate). Early: 3–6 September; delayed (+14 days): 17–20 September; delayed (+28 days): 1–4 October. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

4. Discussion

4.1. Yield Components

The grain yield of winter wheat is determined mainly by the number of spikes m^{-2} and, to a smaller extent, by the number of grains spike⁻¹ and TGW [68–70]. Delayed sowing can potentially decrease the number of productive shoots and spikelet buds due to a lower number of leaves per unit area and a low leaf area index (LAI) [71–74]. In addition, delayed sowing shifts the phenological stages of winter wheat to periods with higher temperatures, which can induce considerable differences in grain formation (grains spike⁻¹ and TGW) [75]. However, the mechanism responsible for the decrease in grain yield in late-sown wheat remains unclear [74,76–90]. Aslani and Mehrvar [80] and Zhou et al. [90] reported that delayed sowing decreased the number of spikes m^{-2} (by 12–13%) and the number of grains spike⁻¹ (by 5–6%) but did not affect TGW. In turn, Baloch et al. [78], Khosravi et al. [79], and Silva et al. [83] found that delayed sowing decreased TGW by 3–8% but had no effect on the remaining wheat yield components. In a study by Tahir et al. [77], delayed sowing decreased the number of spikes m^{-2} (by 25%), but it did not influence the remaining yield components. Delayed sowing decreased the values of all yield components in the work of Shah et al. [74], Wajid et al. [76], Mukherjee [81], Alam et al. [82], Gupta et al. [84], Gebrel et al. [85], Madhu et al. [86], Pathania et al. [87], and Yusuf et al. [89]. However, delayed sowing of winter wheat can have different consequences due to climate change. Delayed sowing can increase grain yields ([47,53,56,59,72,91], present study, Table 4) and, according to Dai et al. [48], Lloveras et al. [59], and Chen et al. [91] contributes to high wheat grain yields because the number of grains spike⁻¹ increases as plants compete for light, nutrients, and water. In the current experiment, delayed sowing increased grain yields mainly due to an increase in the number of grains spike⁻¹ (by 11%) and, to a smaller extent, an increase in TGW (by 1–2%). In the work of Ma et al. [72], delayed sowing also increased the number of spikes m^{-2} (by 7%), but it induced a minor decrease in the number of grains spike⁻¹ (by 3%) and TGW (by 4%). Contrary results were reported by Sun et al. [47]. In a study by Yin et al. [53], delayed sowing decreased the spikes m^{-2} (by 6%), increased the number grains spike⁻¹ (by 5%), but had no effect on TGW. In turn, Budzyński et al. [92] found that sowing date had no influence on yield components or grain weight.

In winter wheat, grain yields can be maximized by optimizing sowing density [54–56,72]. Modern winter wheat cultivars are more tolerant to higher sowing density, relative to previous recommendations [93]. Therefore, the optimal sowing density should be redefined to ensure that winter wheat plants effectively utilize natural resources [64]. Winter wheat's response to sowing density should be also examined due to the high genetic diversity of cultivars [93,94]. In winter wheat, sowing density is selected mainly based on a given cultivar's tillering potential [61]. Sowing density should be higher in cultivars with a low tillering capacity [61] and lower in genotypes with a high tillering capacity [62]. According to Valério et al. [95] and Mehring [96], to maximize yields, wheat cultivars with a low tillering potential should be sown at a density of 417 to 555 grains m^{-2} , whereas cultivars with a high tillering potential should be sown at a density of 221 to 422 grains m^{-2} . In turn, in the work of Dai et al. [49], the optimal sowing density was determined to be 135–405 grains m^{-2} in a cultivar with a lower tillering capacity, and at 90–345 grains m^{-2} in a cultivar with a higher tillering capacity. In general, sowing densities higher than optimal not only increase production costs (by increasing the demand for seeds), but also decrease wheat's yield potential [49,59], mainly due to greater competition for natural resources [97,98] or higher disease pressure [60]. Sparse stands produce fewer spikes than dense stands [95], which is consistent with the results of the current study (Table 3). In turn, an increase in sowing density generally increases the number of spikes m^{-2} but decreases the number of grains spike $^{-1}$ [78,94,99,100]. Sander et al. [97], Podolska and Wyzińska [101], Buczek and Bobrecka-Jamro [102], and the present study (Table 3) demonstrated that a high sowing density increases the number of spikes and decreases the number of grains spike $^{-1}$ in various wheat genotypes. In general, the TGW of winter wheat is weakly differentiated by sowing density ([59,61,103] and present study, Table 3).

Nitrogen fertilization is an agronomic factor that exerts the strongest influence on the yield potential of winter wheat because it affects all yield components by (i) preventing a decrease in the number of productive shoots and, consequently, the number of spikes m^{-2} ; (ii) preventing a decrease in the number of spikelets per spike, which increases the number of grains spike $^{-1}$; and (iii) increasing grain weight [43]. In the present study, the split application of N fertilizer in spring (40 + 100, 70 + 70, and 100 + 40 kg ha^{-1}) induced significant differences only in the number of spikes m^{-2} . This parameter was maximized (495 spikes m^{-2}) in response to 100 and 40 kg N ha^{-1} applied in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively. The number of spikes m^{-2} decreased by 4% when the N rate was reduced to 40 kg ha^{-1} in BBCH stages 22–25 and increased to 100 kg ha^{-1} in BBCH stages 30–31. In the work of López-Bellido et al. [104], Budzyński and Bielski [105], and Podolska [44], a decrease in the early spring N rate also decreased the number of spikes m^{-2} by 5%, 10%, and 5–11%, respectively. In turn, Brzozowska et al. [106] found that TGW was the only parameter that was significantly influenced by the split application of N fertilizer in spring. A decrease in the second N split applied in BBCH stages 35–36 decreased TGW by 1%. López-Bellido et al. [104] and Ferrari et al. [107] also found that the split application of N fertilizer was associated with TGW. In a study by Zhang et al. [70], splitting the N fertilizer rate induced significant differences in the number of grains spike $^{-1}$ and TGW. The highest number of grains spike $^{-1}$ (39.4–40.9) and the highest TGW (43.2–44.3 g) were observed when N was applied at 120 kg ha^{-1} before sowing and at 120 kg ha^{-1} at the beginning of stem elongation (the total N rate of 240 kg ha^{-1} was split into two equal doses) [70]. An increase in the pre-sowing N rate, followed by a decrease in the N rate at the beginning of stem elongation (the ratio at which N splits were applied between sowing and stem elongation was changed to 100:0 and 70:30) decreased the number of grains spike $^{-1}$ by 6–7% and decreased TGW by 9–10% [70].

4.2. Biomass Yield and the Harvest Index

Sowing date is a non-material agronomic factor that considerably influences the quality of crops [92]. The interactions between sowing date and weather conditions, particularly in regions with harsh winters (including northeastern Poland, Scandinavian

and Baltic countries), affect the grain yields of winter wheat and other winter cultivars of *Triticum* species (durum wheat, *T. durum* Desf, and spelt—*T. spelta* L.). Winter cultivars of common wheat have to be sown on a date which ensures that plants reach at least BBCH stage 23 before winter dormancy. The achievement of BBCH stage 23 before winter dormancy ensures the optimal use of water and temperature [72], promotes cold hardening and, consequently, increases overwintering success [92]. In northeastern Poland, winter cultivars of *Triticum* species develop the optimal number of shoots only when they are sown in September. October seeding is generally regarded as late for all winter cultivars of *T. aestivum*, *T. durum*, and *T. spelta* because it delays seedling emergence, prolongs the initial stages of plant development, and prevents complete tiller formation before winter [43]. However, sowing is frequently delayed, relative to the optimal date, in agricultural practice, which prevents wheat cultivars from fully achieving their genetic yield potential [74]. Late-sown wheat usually develops under less supportive conditions, even in years with favorable weather [108]. The vegetative growth (between sowing and winter dormancy) of late-sown wheat is compromised by less sunlight, shorter day length [74], and lower mean daily temperatures, which decreases germination, tillering potential, and the number of shoots [74,109–111]. In the current study, delayed sowing also decreased the number of plants after emergence and in early spring (by 13%), and decreased the number of shoots plant^{−1} (by 13–24%) and shoots m^{−2} (by 24–33%) at the end of tillering (BBCH 29). Delayed sowing can also affect inflorescence emergence, and it exposes wheat plants to higher temperatures during grain filling [112], which can speed up and shorten reproductive spike development and decrease the number of grains spike^{−1} [109–114]. In northwestern China, every day of delay in the sowing date decreased grain yields by 1% due to slower plant growth and a decrease in both yield components and the LAI [74]. A significant decrease in wheat yields (21%) was also reported in the eastern coastal area of China when sowing was delayed by 30 days [78]. In Pakistan, grain yields were reduced by 7–12% when winter wheat was sown with a delay of 10–20 days [47,115]. In southeastern Germany, sowing delayed by 26 days decreased the grain yields of winter wheat by 7% on average [116]. According to Dai et al. [48], delayed sowing does not always affect inflorescence emergence, DM accumulation, grain filling, or grain yield in wheat. In a study by Budzyński et al. [92], common wheat, spelt, and durum wheat grown in northeastern Poland weakly responded to a 10- and 20-day delay in sowing. Delayed sowing (including in October) did not induce changes in the grain yields of winter cultivars of the examined wheat species [92]. Oleksiak [117] also reported a minor (1–5%) decrease in the grain yields of late-sown winter wheat in Poland. In the present experiment, grain yields did not decrease when sowing was delayed by 2 or 4 weeks. On the contrary, grain yields increased by 13% (by 1.22 Mg ha^{−1}) when sowing was delayed by 14 days (mid-September). According to Paymard et al. [118], winter wheat's response to delayed sowing can be attributed to climate change. Ding et al. [119] also noted that, in an era of climate change, winter wheat should be sown with a delay of 10–25 days, depending on precipitation levels. Different responses of winter wheat to delayed sowing in an era of climate change are also manifested by the ratio of grain yield to biomass yield [86,88,120–124]. Tahir et al. [88], Moustafa et al. [121], Shirinzadeh et al. [122], and Singh [124] found that delayed sowing decreased the HI by 4–36%. In turn, in the work of Madhu et al. [86], Donaldson et al. [120], Acharya et al. [123], and in the present study (Table 4), delayed sowing increased the HI by 6% or even 14–20%.

Sowing density directly affects the number of spikes m^{−2} in all cereal species [43]. However, stand density is influenced by environmental conditions, weather, and the applied production technology, which is why the strength of the interactions between cultivar and environmental factors is generally below the threshold of statistical significance [125,126]. Sowing density that is too high can compromise plant survival, contribute to plant loss, and decrease the performance of the surviving plants without influencing grain yield [92]. Weather and environmental conditions affect yields, which is why the optimal sowing density should be adapted to local requirements [93,94]. According to Lloveras et al. [59], the recommended sowing density in Belgium and

northern France is 200 grains m^{-2} , whereas, in the USA, this parameter ranges from 67 grains m^{-2} (dryland plains) to even 400 grains m^{-2} (eastern regions). In the USA, the most recommended wheat sowing density is 200 grains m^{-2} , which can be increased by 50% for irrigated conditions [93]. In Slovenia, the recommended sowing density is 600–800 grains m^{-2} [99]. In Serbia, wheat grain yields were maximized at a sowing density of 500–600 grains m^{-2} [100,127]. In southeastern Poland, the optimal sowing densities for winter wheat were determined at 300 [101] and 400 grains m^{-2} [102]. In the present experiment, the lowest sowing density (200 live grains m^{-2}) was also least productive, and a significant increase in the grain yields of winter wheat was observed at a sowing density of 400 live grains m^{-2} (10.02 vs. 10.25 Mg ha^{-1}). According to Dubis and Budzyński [128], the influence of sowing density on grain yield is determined by precipitation during spring growth. In the cited study, in years with average or low precipitation in spring, grain yields peaked when winter wheat was sown at 480–600 grains m^{-2} . In turn, low sowing densities (120–240 grains m^{-2}) were most productive in years with high spring precipitation [128]. In the current study, weather conditions did not affect grain yields in winter wheat stands with different sowing densities (in all years, grain yields peaked at the sowing density of 400 grains m^{-2}). In the work of Budzyński et al. [92], the yields of common wheat, spelt, and durum wheat grown in northeastern Poland were not significantly differentiated by the tested sowing densities (350–550 kernels m^{-2}). Sowing density did not affect wheat yields in studies conducted in Brazil, Egypt, and Iran by Sander et al. [97], Ahmadi et al. [129], Gross et al. [130], Teixeira Filho et al. [131], and El-Metwally et al. [132]. According to Aćin [127], sowing density should be increased when winter wheat is sown late. The cited author demonstrated that the sowing density of late-sown winter wheat in Serbia should be increased from 500–600 to even 700 grains m^{-2} [127]. Lloveras et al. [59], Staggenborg et al. [133], and Kristó et al. [134] also found that sowing density should be increased when winter wheat is sown late to counteract the decrease in plant growth and shoot formation in the tillering stage. In the present experiment, the sowing date was not significantly associated with sowing density (no significant interaction was found between these factors). Winter wheat responded differently to the tested sowing densities because yield components are significantly affected by genotype, environmental conditions, and weather [43]. Sowing density does not exert a unidirectional effect on the HI of winter wheat. The HI is strongly determined by a cultivar's tillering capacity and plant responses to stand density. In the work of Whaley et al. [57], Laghari et al. [60], Ahmadi et al. [129], and Hu et al. [135], higher sowing density decreased the HI by 9–28%. Farooq et al. [136] and Abd El-Lattief [137] reported a 6–17% increase in the HI of wheat with an increase in sowing density. In turn, in studies conducted by Ahmadi et al. [129], Porker et al. [138], Hussain et al. [139], Dalia et al. [140], and in the current experiment (Table 4), the HI was not influenced by sowing density.

Nitrogen fertilization is the key determinant of grain yield in wheat production [43,92,141,142]. Depending on soil type and cultivar, N fertilization increased grain yields in common wheat up to the N rate of 120–150 kg N ha^{-1} [92,143,144] or 200–240 kg N ha^{-1} in high-input production technologies [145,146]. Excess N available to plants can decrease tolerance to stress, photosynthetic efficiency, and grain yields [147]. The split application of N fertilizer improves NUE and minimizes the environmental impact of N fertilization [148]. In the present study, the grain yields of winter wheat peaked in response to 100 kg N ha^{-1} applied in BBCH stages 22–25 and 40 kg N ha^{-1} applied in BBCH stages 30–31. Podolska [44], Pisarek et al. [149], Sedlář et al. [150], and Belete et al. [151] also demonstrated that a higher rate of N should be applied in the tillering stage than in the stem elongation stage (grain yields increased by 4–16%). In turn, Budzyński and Bielski [105] did not report significant differences in grain yields when winter wheat was supplied with lower (120 kg ha^{-1}) and higher (150 kg ha^{-1}) N rates in early spring. In the work of Brzozowska et al. [106] and Školníková et al. [152], the split application of different N rates (135–160 kg ha^{-1}) had no significant influence on winter wheat yields. However, in many studies, the greatest increase in grain yield was reported when the total N rate in early spring was split into two

equal doses (50:50) [70,104,153–156]. A high N rate in the early stages of growth can inhibit DM accumulation during grain filling (and decrease TGW) [70]. The split application of N fertilizer in spring exerts varied effects on the HI of winter wheat ([104,157,158], present study, Table 4). In a study by Pisarek et al. [157] and in the present experiment (Table 4), the HI was not influenced by the spring N rate applied in splits. In the work of López-Bellido et al. [104], the HI peaked when N was applied in two equal splits (50:50). In turn, in a study by Akhter et al. [158], the HI was highest when N was applied before sowing (25%), in the tillering stage (50%), and in the heading stage (25%).

5. Conclusions

In northeastern Poland, winter wheat can be sown in late September or early October without the risk of decreasing grain yields. Delayed sowing did not decrease but actually increased grain yields (by 1.16–1.22 Mg ha^{−1}, i.e., by 12–13%) by boosting the number of spikes m^{−2} (10–12%) and TGW (by 1–2%) relative to early-sown wheat (beginning of September). Grain yields peaked in response to a sowing density of 400 live grains m^{−2}, which can be attributed to an increase in the number of spikes m^{−2}. The application of 40 and 100 kg N ha^{−1} in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively, maximized grain yields. This split spring N rate exerted a positive impact on the number of spikes m^{−2}. However, in an era of rapid climate change, further research involving different winter wheat cultivars grown under different environmental conditions is needed to validate the present findings.

Author Contributions: Conceptualization, K.L. and K.J.J.; methodology, K.L. and K.J.J.; software, K.L.; validation, K.L.; formal analysis, K.L.; investigation, K.L.; resources, K.L.; data curation, K.L.; writing—original draft preparation, K.L.; writing—review and editing, K.L. and K.J.J.; visualization, K.L.; supervision, K.J.J.; project administration, K.L. and K.J.J.; funding acquisition, K.J.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The results presented in this paper were obtained as part of a comprehensive study financed by the Faculty of Agriculture and Forestry, University of Warmia and Mazury in Olsztyn (grant No. 30.610.013-110). Funded by the Minister of Science under “the Regional Initiative of Excellence Program”.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Acknowledgments: We would like to thank the staff of the AES in Balcyny for technical support during the experiment.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

- Domagała, J. Economic and environmental aspects of agriculture in the EU countries. *Energies* **2021**, *14*, 7826. [CrossRef]
- Eurostat. Performance of the Agricultural Sector. 2023. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Performance_of_the_agricultural_sector (accessed on 20 December 2023).
- Sunderji, S.; Bass, R.; Hand, D.; Nova, N. *Understanding Impact Performance: Agriculture Investments*; Global Impact Investing Network: New York, NY, USA, 2020; Available online: https://thegiin.org/assets/Understanding%20Impact%20Performance_Agriculture%20Investments_webfile.pdf (accessed on 20 December 2023).
- Baldock, D.; Buckwell, A. *Just Transition in the EU Agriculture and Land Use Sector*; Institute for European Environmental Policy: London, UK, 2021.
- Bielski, S.; Marks-Bielska, R.; Zielińska-Chmielewska, A.; Romaneckas, K.; Šarauskis, E. Importance of agriculture in creating energy security—A case study of Poland. *Energies* **2021**, *14*, 2465. [CrossRef]
- Allami, H.A.; Tabasizadeh, M.; Rohani, A.; Nayeibzadeh, H.; Farzad, A. Effect of ultrasonic irradiation on the properties and performance of biodiesel produced from date seed oil used in the diesel engine. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *60*, 104672. [CrossRef]
- Pawlak, K.; Kołodziejczak, M. The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production. *Sustainability* **2020**, *12*, 5488. [CrossRef]
- Reinhardt, J.; Hilgert, P.; Von Cossel, M. Yield performance of dedicated industrial crops on low-temperature characterized marginal agricultural land in Europe—A review. *Biofuels Bioprod. Bioref.* **2022**, *16*, 609–622. [CrossRef]

9. Behnassi, M.; El Haiba, M. Implications of the Russia–Ukraine war for global food security. *Nat. Hum. Behav.* **2022**, *6*, 754–755. [CrossRef]
10. Mottaleb, K.A.; Gideon, K.; Sieglind, S. Potential impacts of Ukraine–Russia armed conflict on global wheat food security: A quantitative exploration. *Globa. Food Sec.* **2022**, *35*, 100659. [CrossRef]
11. Alabi, M.O.; Ngwenyama, O. Food security and disruptions of the global food supply chains during COVID-19: Building smarter food supply chains for post COVID-19 era. *Br. Food J.* **2023**, *125*, 167–185. [CrossRef]
12. Alexandratos, N.; Bruinsma, J. *World Agriculture: Towards 2030/2050*; ESA Working Paper No. 12–03; FAO: Rome, Italy, 2012.
13. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. 2023. Available online: <http://www.apps.fao.org> (accessed on 20 December 2023).
14. United States Census Bureau. International Programs. International Data Base: World Population. 2016. Available online: <http://www.census.gov/population/international/data/idb/worldpoptotal.php> (accessed on 22 December 2023).
15. Guttieri, M.J.; Frels, K.; Regassa, T.; Waters, B.M.; Baenziger, P.S. Variation for nitrogen use efficiency traits in current and historical Great Plains hard winter wheat. *Euphytica* **2017**, *213*, 87. [CrossRef]
16. United Nations. World Population Prospects. 2019. Available online: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/wpp2019_10KeyFindings.pdf (accessed on 20 December 2023).
17. Neumann, K.; Verburg, P.H.; Stehfest, E.; Müller, C. The yield gap of global grain production: A spatial analysis. *Agric. Syst.* **2010**, *103*, 316–326. [CrossRef]
18. Buczek, J.; Jarecki, W.; Bobrecka-Jamro, D. The response of population and hybrid wheat to selected agro-environmental factors. *Plant Soil Environ.* **2016**, *62*, 67–73. [CrossRef]
19. Jańczak-Pieniążek, M.; Buczek, J.; Kwiatkowski, C.A.; Harasim, E. The course of physiological processes, yielding, and grain quality of hybrid and population wheat as affected by integrated and conventional cropping systems. *Agronomy* **2022**, *12*, 1345. [CrossRef]
20. Foley, J.A.; Ramankutty, N.; Brauman, K.A.; Cassidy, E.S.; Gerber, J.S.; Johnston, M.; Mueller, N.D.; O’Connell, C.; Ray, D.K.; West, P.C.; et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature* **2011**, *478*, 337–342. [CrossRef]
21. Meyfroidt, P.; Carlson, K.M.; Fagan, M.E.; Gutiérrez-Vélez, V.H.; Macedo, M.N.; Curran, L.M.; DeFries, R.S.; Dyer, G.A.; Gibbs, H.K.; Lambin, E.F.; et al. Multiple pathways of commodity crop expansion in tropical forest landscapes. *Environ. Res. Lett.* **2014**, *9*, 074012. [CrossRef]
22. Ren, K.; Xu, M.; Li, R.; Zheng, L.; Wang, H.; Liu, S.; Zhang, W.; Duan, D.; Lu, C. Achieving high yield and nitrogen agronomic efficiency by coupling wheat varieties with soil fertility. *Sci. Total Environ.* **2023**, *881*, 163531. [CrossRef] [PubMed]
23. Economic Research Service. Fertilizer Use and Price. U.S. Department of Agriculture. 2019. Available online: <https://data.nal.usda.gov/dataset/fertilizer-use-and-price> (accessed on 20 December 2023).
24. Cui, Z.; Zhang, H.; Chen, X.; Zhang, C.; Ma, W.; Huang, C.; Zhang, W.; Mi, G.; Miao, Y.; Li, X.; et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature* **2018**, *7696*, 363–366. [CrossRef] [PubMed]
25. Liang, S.; Li, Y.; Zhang, X.; Sun, Z.; Sun, N.; Duan, Y.; Xu, M.; Wu, L. Response of crop yield and nitrogen use efficiency for wheat-maize cropping system to future climate change in Northern China. *Agric. For. Meteorol.* **2018**, *262*, 310–321. [CrossRef]
26. Zhang, C.; Ju, X.; Powlson, D.; Oenema, O.; Smith, P.J. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China. *Environ. Sci. Technol.* **2019**, *53*, 6678–6687. [CrossRef] [PubMed]
27. Carvalho, J.M.G.; Bonfim-Silva, E.M.; Da Silva, T.J.A.; Sousa, H.H.D.F.; Guimarães, S.L.; Pacheco, A.B. Nitrogen and potassium in production, nutrition and water use efficiency in wheat plants. *Cienc. Investig. Agrar.* **2016**, *43*, 442–451. [CrossRef]
28. Ladha, J.; Tirol-Padre, A.; Reddy, C.K.; Cassman, K.G.; Verma, S.; Powlson, D.S.; Van Kessel, C.; Richter, D.D.B.; Chakraborty, D.; Pathak, H. Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice and wheat production systems. *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 19355. [CrossRef]
29. Rossini, F.; Provenzano, M.E.; Sestili, F.; Ruggeri, R. Synergistic effect of sulfur and nitrogen in the organic and mineral fertilization of durum wheat: Grain yield and quality traits in the Mediterranean environment. *Agronomy* **2018**, *8*, 189. [CrossRef]
30. Shah, A.N.; Yang, G.; Tanveer, M.; Iqbal, J. Leaf gas exchange, source–sink relationship, and growth response of cotton to the interactive effects of nitrogen rate and planting density. *Acta Physiol. Plant.* **2017**, *39*, 119. [CrossRef]
31. Bhattacharya, A. Global Climate Change and Its Impact on Agriculture. In *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2019; pp. 1–50.
32. Bhattarai, D.; Abagandura, G.O.; Nleya, T.; Kumar, S. Responses of soil surface greenhouse gas emissions to nitrogen and sulfur fertilizer rates to *Brassica carinata* grown as a bio-jet fuel. *GCB Bioenergy* **2021**, *13*, 627–639. [CrossRef]
33. Shah, A.N.; Iqbal, J.; Tanveer, M.; Yang, G.; Hassan, W.; Fahad, S.; Yousaf, M.; Wu, Y. Nitrogen fertilization and conservation tillage: A review on growth, yield, and greenhouse gas emissions in cotton. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2017**, *24*, 2261–2272. [CrossRef] [PubMed]
34. Efratuei, A.; Gooding, M.; White, E.; Spink, J.; Hackett, R. Effect of nitrogen fertilizer application timing on nitrogen use efficiency and grain yield of winter wheat in Ireland. *Ir. J. Agric. Food Res.* **2016**, *55*, 63–73. [CrossRef]
35. Litke, L.; Gaile, Z.; Ruža, A. Effect of nitrogen fertilization on winter wheat yield and yield quality. *Agron. Res.* **2018**, *16*, 200–209.
36. Zörb, C.; Ludewig, U.; Hawkesford, M.J. Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply. *Trends Plant Sci.* **2018**, *23*, 1029–1037. [CrossRef]
37. Moitzi, G.; Neugschwandtnr, R.W.; Kaul, H.P.; Wagentristsl, H. Efficiency of mineral nitrogen fertilization in winter wheat under Pannonian climate conditions. *Agriculture* **2020**, *10*, 541. [CrossRef]

38. Tabak, M.; Lepiarczyk, A.; Filipek-Mazur, B.; Lisowska, A. Efficiency of nitrogen fertilization of winter wheat depending on sulfur fertilization. *Agronomy* **2020**, *10*, 1304. [\[CrossRef\]](#)
39. Meier, U. *Growth Stages of Mono- and Dicotyledonous Plants: BBCH Monograph*; Julius Kühn-Institut: Quedlinburg, Germany, 2018; Available online: <https://www.julius-kuehn.de/media/Veroeffentlichungen/bbch%20paper%20en/page.pdf> (accessed on 10 December 2023).
40. Wall, D.P.; Plunkett, M. *Major and Micro Nutrient Advice for Productive Agricultural Crops*; Teagasc Johnstown Castle: Wexford, Ireland, 2020; p. 176.
41. Limaux, F.; Recous, S.; Meynard, J.M.; Guckert, A. Relationship between rate of crop growth at date of fertilizer N application and fate of fertilizer N applied to winter wheat. *Plant Soil* **1999**, *214*, 49–59. [\[CrossRef\]](#)
42. Grzebisz, W. Cereals. In *Crop Fertilization Technologies—The Physiology of Crop Yield*; Cereals and Maize; Grzebisz, W., Ed.; PWRiL: Poznań, Poland, 2012; pp. 8–193. (In Polish)
43. Budzyński, W. Common wheat. In *Wheats—Common, Spelt, Durum*; Budzyński, W., Ed.; PWRiL: Poznań, Poland, 2012; pp. 23–150. (In Polish)
44. Podolska, G. Effect of nitrogen fertilization doses and way of its application on yield and technological quality of winter wheat cultivars grain. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2008**, *7*, 57–65. (In Polish)
45. Barad, B.B.; Mathukia, R.K.; Bodar, K.H.; Der, H.N. Real time nitrogen fertilization using precision tools for enhancing productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Int. J. Pure Appl. Biosci.* **2018**, *6*, 434–440. [\[CrossRef\]](#)
46. Fageria, N.K.; Baligar, V.C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Adv. Agron.* **2005**, *88*, 97–185.
47. Sun, H.; Zhang, X.; Chen, S.; Pei, D.; Liu, C. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat–summer maize in the North China Plain. *Ind. Crops Prod.* **2007**, *25*, 239–247. [\[CrossRef\]](#)
48. Dai, X.; Wang, Y.; Dong, X.; Qian, T.; Yin, L.; Dong, S.; He, M. Delayed sowing can increase lodging resistance while maintaining grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat. *Crop J.* **2017**, *5*, 541–552. [\[CrossRef\]](#)
49. Dai, X.; Zhou, X.; Jia, D.; Xiao, L.; Kong, H.; He, M. Managing the seeding rate to improve nitrogen-use efficiency of winter wheat. *Field Crops Res.* **2013**, *154*, 100–109. [\[CrossRef\]](#)
50. Ainsworth, E.A.; Ort, D.R. How do we improve crop production in a warming world? *Plant Physiol.* **2010**, *154*, 526–530. [\[CrossRef\]](#)
51. Xiao, D.; Tao, F.; Liu, Y.; Shi, W.; Wang, M.; Liu, F.; Zhang, S.; Zhu, Z. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981–2009. *Int. J. Biometeorol.* **2013**, *57*, 275–285. [\[CrossRef\]](#)
52. Xiao, D.; Moir, J.P.; Tao, F.; Yang, Y.; Shen, Y.; Xu, Q.; Liu, J.; Zhang, H.; Liu, F. Spatiotemporal variability of winter wheat phenology in response to weather and climate variability in China. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* **2015**, *20*, 1191–1202. [\[CrossRef\]](#)
53. Yin, L.; Dai, X.; He, M. Delayed sowing improves nitrogen utilization efficiency in winter wheat without impacting yield. *Field Crops Res.* **2018**, *221*, 90–97. [\[CrossRef\]](#)
54. Hochman, Z.; Horan, H. Causes of wheat yield gaps and opportunities to advance the water-limited yield frontier in Australia. *Field Crops Res.* **2018**, *228*, 20–30. [\[CrossRef\]](#)
55. Jaenisch, B.R.; de Oliveira Silva, A.; DeWolf, E.; Ruiz-Diaz, D.A.; Lollato, R.P. Plant population and fungicide economically reduced winter wheat yield gap in Kansas. *Agron. J.* **2019**, *111*, 650–665. [\[CrossRef\]](#)
56. Lollato, R.P.; Ruiz Diaz, D.A.; DeWolf, E.; Knapp, M.; Peterson, D.E.; Fritz, A.K. Agronomic practices for reducing wheat yield gaps: A quantitative appraisal of progressive producers. *Crop Sci.* **2019**, *59*, 333. [\[CrossRef\]](#)
57. Whaley, J.M.; Sparkes, D.L.; Foulkes, M.J.; Spink, J.H.; Semere, T.; Scott, R.K. The physiological response of winter wheat to reductions in plant density. *Ann. Appl. Biol.* **2000**, *137*, 165–177. [\[CrossRef\]](#)
58. Fischer, R.A.; Ramos, O.M.; Monasterio, I.O.; Sayre, K.D. Yield response to plant density, row spacing, and raised beds in low latitude spring wheat with ample soil resources: An update. *Field Crops Res.* **2019**, *232*, 95–105. [\[CrossRef\]](#)
59. Lloveras, J.; Manent, J.; Viudas, J.; Lopez, A.; Santiveri, P. Seeding rate influence on yield and yield components of irrigated winter wheat in a Mediterranean climate. *Agron. J.* **2004**, *96*, 1258–1265. [\[CrossRef\]](#)
60. Laghari, G.M.; Oad, F.C.; Tunio, S.; Chachar, Q.; Ghandahi, A.; Siddiqui, M.H.; Hassan, S.W.; Ali, A. Growth and yield attributes of wheat at different seed rates. *Sarhad J. Agric.* **2011**, *27*, 177–183.
61. Valério, I.P.; De Carvalho, F.I.F.; Benin, G.; Da Silveira, G.; Da Silva, J.A.G.; Nornberg, R.; Hagemann, T.; Luche, H.D.S.; De Oliveira, A.C. Seeding density in wheat: The more, the merrier? *Sci. Agric.* **2013**, *70*, 176–184. [\[CrossRef\]](#)
62. Bastos, L.M.; Carciocchi, W.; Lollato, R.P.; Jaenisch, B.R.; Rezende, C.R.; Schwalbert, R.; Prasad, P.V.V.; Zhang, G.; Fritz, A.K.; Foster, C.; et al. Winter wheat yield response to plant density as a function of yield environment and tillering potential: A review and field studies. *Front. Plant Sci.* **2020**, *11*, 54. [\[CrossRef\]](#)
63. Arduini, I.; Masoni, A.; Ercoli, L.; Mariotti, M. Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate. *Eur. J. Agron.* **2006**, *25*, 309–318. [\[CrossRef\]](#)
64. Dai, X.; Xiao, L.; Jia, D.; Kong, H.; Wang, Y.; Li, C.; Zhang, Y.; He, M. Increased plant density of winter wheat can enhance nitrogen-uptake from deep soil. *Plant Soil* **2014**, *384*, 141–152. [\[CrossRef\]](#)
65. Gao, Y.; Li, Y.; Zhang, J.; Liu, W.; Dang, Z.; Cao, W.; Qiang, Q. Effects of mulch, N fertilizer, and plant density on wheat yield, wheat nitrogen uptake, and residual soil nitrate in a dryland area of China. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **2009**, *85*, 109–121. [\[CrossRef\]](#)
66. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources 2022*; FAO: Rome, Italy, 2022. Available online: https://eurasian-soil-portal.info/wp-content/uploads/2022/07/wrb_fourth_edition_2022-3.pdf (accessed on 20 December 2023).
67. TIBCO Software Inc. *Statistica (Data Analysis Software System), Version 13*; TIBCO Software Inc.: Palo Alto, CA, USA, 2017.

68. Agami, R.A.; Alamri, S.A.; Abd El-Mageed, T.A.; Abousekken, M.S.M.; Hashem, M. Role of exogenous nitrogen supply in alleviating the deficit irrigation stress in wheat plants. *Agric. Water Manag.* **2018**, *210*, 261–270. [\[CrossRef\]](#)
69. Rivera-Amado, C.; Trujillo-Negrellos, E.; Molero, G.; Reynolds, M.P.; Sylvester-Bradley, R.; Foulkes, M.J. Optimizing dry-matter partitioning for increased spike growth, grain number and harvest index in spring wheat. *Field Crops Res.* **2019**, *240*, 154–167. [\[CrossRef\]](#)
70. Zhang, Z.; Yu, Z.; Zhang, Y.; Shi, Y. Split nitrogen fertilizer application improved grain yield in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) via modulating antioxidant capacity and ¹³C photosynthate mobilization under water-saving irrigation conditions. *Ecol. Process.* **2021**, *10*, 21. [\[CrossRef\]](#)
71. Arduini, I.; Pellegrino, E.; Ercoli, L. Contribution of main culm and tillers to grain yield of durum wheat: Influence of sowing date and plant traits. *Ital. J. Agron.* **2018**, *13*, 235–247. [\[CrossRef\]](#)
72. Ma, S.C.; Wang, T.C.; Guan, X.K.; Zhang, X. Effect of sowing time and seeding rate on yield components and water use efficiency of winter wheat by regulating the growth redundancy and physiological traits of root and shoot. *Field Crop. Res.* **2018**, *221*, 166–174. [\[CrossRef\]](#)
73. Zhai, Y.; Wu, Q.; Chen, G.; Zhang, H.; Yin, X.; Chen, F. Broadcasting winter wheat can increase grain yield without reducing the kernels per spike and the kernel weight. *Sustainability* **2018**, *10*, 4858. [\[CrossRef\]](#)
74. Shah, F.; Coulter, J.A.; Ye, C.; Wu, W. Yield penalty due to delayed sowing of winter wheat and the mitigatory role of increased seeding rate. *Eur. J. Agron.* **2020**, *119*, 126120. [\[CrossRef\]](#)
75. Sattar, A.; Cheema, M.A.; Farooq, M.; Wahid, M.A.; Wahid, A.; Babar, B.H. Evaluating the performance of wheat cultivars under late sown conditions. *Int. J. Agric. Biol.* **2010**, *12*, 561–565.
76. Wajid, A.; Hussain, A.; Ahmad, A.; Goheer, A.R.; Ibrahim, M.; Mussaddique, M. Effect of sowing date and plant population on biomass, grain yield and yield components of wheat. *Int. J. Agric. Biol.* **2004**, *6*, 1003–1005.
77. Tahir, M.; Ali, A.; Nadeem, M.A.; Hussain, A.; Khalid, F. Effect of different sowing dates on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties in district Jhang, Pakistan. *Pak. J. Life Soc. Sci.* **2009**, *27*, 66–69.
78. Baloch, M.S.; Shah, I.T.H.; Nadim, M.A.; Khan, M.I.; Khakwani, A.A. Effect of seeding density and planting time on growth and yield attributes of wheat. *J. Anim. Plant Sci.* **2010**, *20*, 239–240.
79. Khosravi, V.; Khajoe-Nejad, G.; Mohammadi-Nejad, G.; Yousefi, K. The effect of different sowing dates on yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Int. J. Agron. Plant Prod.* **2010**, *1*, 77–82.
80. Aslani, F.; Mehrvar, M.R. Responses of wheat genotypes as affected by different sowing dates. *Asian J. Agric. Sci.* **2012**, *4*, 72–74.
81. Mukherjee, D. Effect of different sowing dates on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*) cultivars under mid hill situation of West Bengal. *Indian J. Agron.* **2012**, *57*, 152–156. [\[CrossRef\]](#)
82. Alam, M.P.; Kumar, S.; Ali, N.; Manjhi, R.P.; Kumari, N.; Lakra, R.K.; Izhar, T. Performance of wheat varieties under different sowing dates in Jharkhand. *J. Wheat Res.* **2013**, *5*, 61–64.
83. Silva, R.R.; Benin, G.; Almeida, J.L.D.; Fonseca, I.C.D.B.; Zucareli, C. Grain yield and baking quality of wheat under different sowing dates. *Acta Sci. Agron.* **2014**, *36*, 201–210. [\[CrossRef\]](#)
84. Gupta, S. Effect of different sowing dates on growth and yield attributes of wheat in Udham Singh Nagar district of Uttarakhand, India. *Plant Arch.* **2017**, *17*, 232–236.
85. Gebrel, E.E.; Gad, M.A.; Kishk, A.M.S. Effect of sowing dates on potential yield and rust resistance of some wheat cultivars. *J. Plant Prod.* **2018**, *9*, 369–375. [\[CrossRef\]](#)
86. Madhu, U.; Begum, M.; Salam, A.; Sarkar, S.K. Influence of sowing date on the growth and yield performance of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Arch. Agric. Environ. Sci.* **2018**, *3*, 89–94. [\[CrossRef\]](#)
87. Pathania, R.; Prasad, R.; Rana, R.S.; Mishra, S.; Sharma, S. Growth and yield of wheat as influenced by dates of sowing and varieties in north western Himalayas. *J. Pharmacogn. Phytochem.* **2018**, *7*, 517–520.
88. Tahir, S.; Ahmad, A.; Khaliq, T.; Cheema, M.J.M. Evaluating the impact of seed rate and sowing dates on wheat productivity in semi-arid environment. *Int. J. Agric. Biol.* **2019**, *22*, 57–64.
89. Yusuf, M.; Kumar, S.; Dhaka, A.K.; Singh, B.; Bhuker, A. Effect of sowing dates and varieties on yield and quality performance of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agric. Sci. Dig.* **2019**, *39*, 306–310. [\[CrossRef\]](#)
90. Zhou, B.; Sun, X.; Ge, J.; Li, C.; Ding, Z.; Ma, S.; Ma, W.; Zhao, M. Wheat growth and grain yield responses to sowing date-associated variations in weather conditions. *Agron. J.* **2020**, *112*, 985–997. [\[CrossRef\]](#)
91. Chen, C.; Neill, K.; Wichman, D.; Westcott, M. Hard red spring wheat response to row spacing, seeding rate, and nitrogen. *Agron. J.* **2008**, *100*, 1296–1302. [\[CrossRef\]](#)
92. Budzyński, W.S.; Bepirszcz, K.; Jankowski, K.J.; Dubis, B.; Hłasko-Nasalska, A.; Sokółski, M.M.; Olszewski, J.; Załuski, D. The responses of winter cultivars of common wheat, durum wheat and spelt to agronomic factors. *J. Agric. Sci.* **2018**, *156*, 1163–1174. [\[CrossRef\]](#)
93. Lindsey, L.E.; Goodwin, A.W.; Harrison, S.K.; Paul, P.A. Optimum seeding rate and stand assessment of soft red winter wheat. *Agron. J.* **2020**, *112*, 4069–4075. [\[CrossRef\]](#)
94. Kondić, D.; Bajić, M.; Hajder, Đ.; Bosančić, B. The rate of productive tillers per plant of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under different sowing densities. *Agro-Know. J.* **2017**, *17*, 345–357. [\[CrossRef\]](#)
95. Valério, I.P.; Carvalho, F.I.F.; Oliveira, A.C.; Benin, G.; Souza, V.Q.; Machado, A.A.; Bertan, I.; Busato, C.C.; Silveira, G.; Fonseca, D.A.R. Seeding density in wheat genotypes as a function of tillering potential. *Sci. Agric.* **2009**, *66*, 28–39. [\[CrossRef\]](#)
96. Mehring, G.H. *Determining Optimum Seeding Rates for Diverse Hard Red Spring Wheat (Triticum aestivum L.) Cultivars*; North Dakota State University ProQuest Dissertations Publishing: Fargo, ND, USA, 2016; p. 10144681.

97. Sander, G.; da Costa, A.C.T.; Júnior, J.B.D. Agronomic performance of wheat as a function of different spacing and sowing densities in two agricultural years. *Afr. J. Agric. Res.* **2017**, *12*, 3099–3105.
98. Khan, A.; Ahmad, A.; Ali, W.; Hussain, S.; Ajayo, B.S.; Raza, M.A.; Kamran, M.; Te, X.; Al Amin, N.; Ali, S. Optimization of plant density and nitrogen regimes to mitigate lodging risk in wheat. *Agron. J.* **2020**, *112*, 2535–2551. [[CrossRef](#)]
99. Bavec, M.; Bavec, F.; Varga, B.; Kovacevic, V. Relationship among yield, it's quality and yield components in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars affected by seeding rates. *Die Bodenkult.* **2002**, *53*, 143–151.
100. Bokan, N.; Malešević, M. The planting density effect on wheat yield structure. *Acta Agric. Serb.* **2004**, *9*, 65–79.
101. Podolska, G.; Wyżńska, M. The response of new winter wheat cultivars to density and sowing date. *Pol. J. Agron.* **2011**, *6*, 44–51. (In Polish)
102. Buczek, J.; Bobrecka-Jamro, D. Response of population and hybrid wheat to diverse sowing rate. *Fragm. Agron.* **2015**, *32*, 7–16. (In Polish)
103. Tavares, L.C.V.; Foloni, J.S.S.; Bassoi, M.C.; Prete, C.E.C. Wheat genotypes under different seeding rates. *Pesqui. Agropecu. Trop.* **2014**, *44*, 166–174. (In Portuguese) [[CrossRef](#)]
104. López-Bellido, L.; López-Bellido, R.J.; Redondo, R. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crop Res.* **2005**, *94*, 86–97. [[CrossRef](#)]
105. Budzyński, W.; Bielski, S. The effect of nitrogen fertilization on winter wheat yields. *Fragm. Agron.* **2008**, *25*, 27–38. (In Polish)
106. Brzozowska, I.; Brzozowski, J.; Hruszka, M. Yielding and yield structure of winter wheat in dependence on methods of crop cultivation and nitrogen fertilisation. *Acta Agropys.* **2008**, *11*, 597–611. (In Polish)
107. Ferrari, M.; Szareski, V.J.; Nardino, M.; de Pelegrin, A.J.; Carvalho, I.R.; de Souza, V.Q. Effects of sources and split application of nitrogen fertilizer on wheat genotypes performance. *Aust. J. Crop Sci.* **2016**, *11*, 1669–1674. [[CrossRef](#)]
108. Tester, M.; Langridge, P. Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science* **2010**, *327*, 818–822. [[CrossRef](#)]
109. Jan, A.; Hamid, I.; Muhammad, T. Seed rates and sowing dates effect on the performance of wheat variety Bakhtawar-92. *Pak. J. Biol. Sci.* **2000**, *3*, 1409–1411.
110. Hussain, S.; Khaliq, A.; Bajwa, A.A.; Matloob, A.; Areeb, A.; Ashraf, U.; Hafeez, A.; Imran, M. Crop growth and yield losses in wheat due to little seed canary grass infestation differ with weed densities and changes in environment. *Planta Daninha* **2017**, *35*, e017162328. [[CrossRef](#)]
111. Kaur, C. Performance of wheat varieties under late and very late sowing conditions. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* **2017**, *6*, 3488–3492. [[CrossRef](#)]
112. Garg, D.; Sareen, S.; Dalal, S.; Tiwari, R.; Singh, R. Grain filling duration and temperature pattern influence on the performance of wheat genotypes under late planting. *Cereal Res. Commun.* **2013**, *41*, 500–507. [[CrossRef](#)]
113. Bailey-Serres, J.; Parker, J.E.; Ainsworth, E.A.; Oldroyd, G.E.D.; Schroeder, J.I. Genetic strategies for improving crop yields. *Nature* **2019**, *575*, 109–118. [[CrossRef](#)]
114. Dubey, R.; Pathak, H.; Singh, S.; Chakravarti, B.; Thakur, A.K.; Fagodia, R.K. Impact of sowing dates on terminal heat tolerance of different wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Acad. Sci. Lett.* **2019**, *42*, 445–449. [[CrossRef](#)]
115. Ali, M.; Ali, L.; Sattar, M.; Ali, M.A. Improvement in wheat (*Triticum aestivum* L.) yield by manipulating seed rate and row spacing in Vehari zone. *J. Anim. Plant Sci.* **2010**, *20*, 225–230.
116. Prey, L.; Germer, M.; Schmidhalter, U. Temporal and organ-specific responses in NUE traits to N fertilization, fungicide intensity and early sowing in winter wheat cultivars. *Agronomy* **2019**, *9*, 313. [[CrossRef](#)]
117. Oleksiak, T. Effect of sowing date on winter wheat yields in Poland. *J. Cent. Eur. Agric.* **2014**, *15*, 83–99. [[CrossRef](#)]
118. Paymard, P.; Bannayan, M.; Haghighi, R.S. Analysis of the climate change effect on wheat production systems and investigate the potential of management strategies. *Nat. Hazards* **2018**, *91*, 1237–1255. [[CrossRef](#)]
119. Ding, D.; Feng, H.; Zhao, Y.; He, J.; Zou, Y.; Jin, J. Modifying winter wheat sowing date as an adaptation to climate change on the Loess Plateau. *Agron. J.* **2016**, *108*, 53–63. [[CrossRef](#)]
120. Donaldson, E.; Schillinger, W.F.; Dofing, S.M. Straw production and grain yield relationships in winter wheat. *Crop Sci.* **2001**, *41*, 100–106. [[CrossRef](#)]
121. Moustafa, A.T.H.; El-Sawi, S.A. Influence of sowing date on development, harvest index and yield components for bread wheat cultivars having different thermal responses in middle Egypt. *J. Plant Prod.* **2014**, *5*, 211–226. [[CrossRef](#)]
122. Shirinzadeh, A.; Abad, H.H.S.; Nourmohammadi, G.; Harvan, E.M.; Madani, H. Effect of planting date on growth periods, yield, and yield components of some bread wheat cultivars in Parsabad Moghan. *Int. J. Farm. Allied Sci.* **2017**, *6*, 109–119.
123. Acharya, R.; Marahatta, S.; Amgain, L.P. Response of wheat cultivars in different agricultural practices differed by sowing date. *Int. J. Appl. Sci. Biotechnol.* **2017**, *5*, 250–255. [[CrossRef](#)]
124. Singh, Y.P.; Singh, S.; Dhangra, V.K.; Mishra, T. Effects of sowing dates on yield and yield components of different varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) in western Uttar Pradesh. *Int. J. Econ. Plants* **2021**, *8*, 188–192. [[CrossRef](#)]
125. Slafer, G.A.; Savin, R.; Sadras, V.O. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Res.* **2014**, *157*, 71–83. [[CrossRef](#)]
126. Rozbicki, J.; Ceglińska, A.; Gozdowski, D.; Jakubczak, M.; Cacak-Pietrzak, G.; Mądry, W.; Golba, J.; Piechociński, M.; Sobczyński, G.; Studnicki, M.; et al. Influence of the cultivar, environment and management on the grain yield and bread-making quality in the winter wheat. *J. Cereal Sci.* **2015**, *61*, 126–132. [[CrossRef](#)]
127. Aćin, V. Sowing Dates and Densities in a Function of Winter Wheat Yield in the Long-Term Field Trial. Ph.D. Thesis, University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Novi Sad, Serbia, 2016. (In Serbian).
128. Dubis, B.; Budzyński, W. Response of winter wheat to the date and density of sowing. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2006**, *5*, 15–24. (In Polish)

129. Ahmadi, G.H.; Kahrizi, D.; Mohammadi, G.; Shirkhani, A. Effects of sowing density on yield and yield components of irrigated bread wheat cultivars. *Agric. Food Sci.* **2011**, *5*, 91–95.
130. Gross, T.F.; Dias, A.R.; Kappes, C.; Schiebelbein, L.M.; Anselmo, J.L.; Holanda, H.V. Productive performance of wheat in different sowing methods and densities. *Sci. Agrar. Parana.* **2012**, *11*, 50–60. (In Portuguese)
131. Teixeira Filho, M.C.M.; Buzetti, S.; Alvarez, R.; de Freitas, J.G.; Arf, O.; de Sá, M.E. Response of wheat cultivars to plant population and nitrogen fertilization in a cerrado region. *Cientifica* **2008**, *36*, 97–106. (In Portuguese)
132. El-Metwally, E.A.; Mekkei, M.E.R.; El-Salam, A.; Abo Shama, H.M. Effect of some mineral and bio fertilization treatments on yield and yield components of bread wheat under two seeding rates. *J. Plant Prod.* **2018**, *9*, 733–738. [\[CrossRef\]](#)
133. Staggenborg, S.; Whitney, D.; Fjell, D.; Shroyer, J. Seeding and nitrogen rates required to optimize winter wheat yields following grain sorghum and soybean. *Agron. J.* **2003**, *95*, 253–259. [\[CrossRef\]](#)
134. Kristó, I.; Gyuris, K.; Torma, M.; Hódi-Szél, M.; Petróczy, I.M. Investigation of sowing date and seeding rate on the yield of winter wheat. *Cereal Res. Commun.* **2007**, *35*, 685–688. [\[CrossRef\]](#)
135. Hu, C.; Zheng, C.; Sadras, V.O.; Ding, M.; Yang, X.; Zhang, S. Effect of straw mulch and seeding rate on the harvest index, yield and water use efficiency of winter wheat. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 8167. [\[CrossRef\]](#)
136. Farooq, U.; Khan, E.A.; Khakwani, A.A.; Ahmed, S.; Ahmed, N.; Zaman, G. Impact of sowing time and seeding density on grain yield of wheat variety Gomali-08. *Asian J. Agric. Biol.* **2016**, *2*, 38–44.
137. Abd El-Lattief, E.A. Determining the optimization seeding rate for improved productivity of wheat under Southern Egypt conditions. *Int. J. Agron. Agric. Res.* **2014**, *4*, 47–57.
138. Porker, K.; Straight, M.; Hunt, J.R. Evaluation of G×E×M interactions to increase harvest index and yield of early sown wheat. *Front. Plant Sci.* **2020**, *11*, 994. [\[CrossRef\]](#)
139. Hussain, S.; Sajjad, A.; Hussain, M.I.; Saleem, M. Growth and yield response of three wheat varieties to different seeding densities. *Int. J. Agric. Biol.* **2001**, *3*, 228–229.
140. Dalia, A.A.; Hag, D.A.E. Effect of seeding rates on yield and yield components of two bread wheat cultivars. *J. Agric. Res.* **2016**, *42*, 71–81.
141. Basso, B.; Cammarano, D.; Fiorentino, C.; Ritchie, J.T. Wheat yield response to spatially variable nitrogen fertilizer in Mediterranean environment. *Eur. J. Agron.* **2013**, *51*, 65–70. [\[CrossRef\]](#)
142. Vogeler, I.; Jensen, J.L.; Thomsen, I.K.; Labouriau, R.; Hansen, E.M. Fertiliser N rates interact with sowing time and catch crops in cereals and affect yield and nitrate leaching. *Eur. J. Agron.* **2021**, *124*, 126244. [\[CrossRef\]](#)
143. Saint Pierre, C.; Peterson, C.J.; Ross, A.S.; Ohm, J.B.; Verhoeven, M.C.; Larson, M.; Hoefer, B. White wheat grain quality changes with genotype, nitrogen fertilization, and water stress. *Agron. J.* **2008**, *100*, 414–420. [\[CrossRef\]](#)
144. Harasim, E.; Wesołowski, M.; Kwiatkowski, C.; Harasim, P.; Staniak, M.; Feledyn-Szewczyk, B. The contribution of yield components in determining the productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Agrobot.* **2016**, *69*, 1675. [\[CrossRef\]](#)
145. Sieling, K.; Stahl, C.; Winkelmann, C.; Christen, O. Growth and yield of winter wheat in the first 3 years of a monoculture under varying N fertilization in NW Germany. *Eur. J. Agron.* **2005**, *22*, 71–84. [\[CrossRef\]](#)
146. Shekoofa, A.; Emam, Y. Effects of nitrogen fertilization and plant growth regulators (PGRs) on yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. Shiraz. *J. Agric. Sci. Technol.* **2010**, *10*, 101–108.
147. Xue, H.; Han, Y.; Li, Y.; Wang, G.; Feng, L.; Fan, Z.; Du, W.; Yang, B.; Cao, C.; Mao, S. Spatial distribution of light interception by different plant population densities and its relationship with yield. *Field Crop. Res.* **2015**, *184*, 17–27. [\[CrossRef\]](#)
148. Hu, C.; Sadras, V.O.; Lu, G.; Zhang, P.; Han, Y.; Liu, L.; Xie, J.; Yang, X.; Zhang, S. A global meta-analysis of split nitrogen application for improved wheat yield and grain protein content. *Soil Tillage Res.* **2021**, *213*, 105111. [\[CrossRef\]](#)
149. Pisarek, M.; Rozbicki, J.; Samborski, S.; Wawryło, B.; Golba, J. Effect of seven agronomic factors on winter wheat productivity cultivating in condition of an excessive share of cereals in crop rotation. Part II. Grain yield and its components. *Fragm. Agron.* **2013**, *30*, 113–120. (In Polish)
150. Sedlář, O.; Balík, J.; Černý, J.; Peklová, L.; Kulhánek, M. Nitrogen uptake by winter wheat (*Triticum aestivum* L.) depending on fertilizer application. *Cereal Res. Commun.* **2015**, *43*, 515–524. [\[CrossRef\]](#)
151. Belete, F.; Dechassa, N.; Molla, A.; Tana, T. Effect of split application of different N rates on productivity and nitrogen use efficiency of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agric. Food Secur.* **2018**, *7*, 92. [\[CrossRef\]](#)
152. Školníková, M.; Škarpá, P.; Ryant, P.; Kozáková, Z.; Antošovský, J. Response of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to fertilizers with nitrogen-transformation inhibitors and timing of their application under field conditions. *Agronomy* **2022**, *12*, 223. [\[CrossRef\]](#)
153. Zhang, Z.; Zhang, Y.; Shi, Y.; Yu, Z. Optimized split nitrogen fertilizer increases photosynthesis, grain yield, nitrogen use efficiency, and water use efficiency under water-saving irrigation. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 20310. [\[CrossRef\]](#)
154. Zain, M.; Si, Z.; Li, S.; Gao, Y.; Mehmood, F.; Rahman, S.U.; Hamani, A.K.M.; Duan, A. The coupled effects of irrigation scheduling and nitrogen fertilization mode on growth, yield, and water use efficiency in drip-irrigated winter wheat. *Sustainability* **2021**, *13*, 2742. [\[CrossRef\]](#)
155. Abubakar, S.A.; Hamani, A.K.M.; Chen, J.; Traore, A.; Abubakar, N.A.; Usman Ibrahim, A.; Duan, A. Optimized drip fertigation scheduling improves nitrogen productivity of winter wheat in the North China Plain. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* **2022**, *22*, 2955–2968. [\[CrossRef\]](#)
156. Hamani, A.K.M.; Abubakar, S.A.; Si, Z.; Kama, R.; Gao, Y.; Duan, A. Responses of grain yield and water-nitrogen dynamic of drip-irrigated winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to different nitrogen fertigation and water regimes in the North China Plain. *Agric. Water Manag.* **2023**, *288*, 108494. [\[CrossRef\]](#)

157. Pisarek, M.; Rozbicki, J.; Samborski, S.; Wawryło, B.; Golba, J. Effect of seven agronomic factors on winter wheat productivity cultivating in condition of an excessive share of cereals in crop rotation. Part I. Yield of aboveground biomass, nitrogen nutrition index and infection rate of root rot. *Fragm. Agron.* **2013**, *30*, 99–112. (In Polish)
158. Akhter, S.; Kotru, R.; Lone, B.A.; Jan, R. Effect of split application of potassium and nitrogen on wheat (*Triticum aestivum*) growth and yield under temperate Kashmir. *Indian J. Agron.* **2017**, *62*, 49–53.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Article

The Quality of Winter Wheat Grain by Different Sowing Strategies and Nitrogen Fertilizer Rates: A Case Study in Northeastern Poland

Krzysztof Lachutta and Krzysztof Józef Jankowski * 

Department of Agrotechnology and Agribusiness, Faculty of Agriculture and Forestry, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Oczapowskiego 8, 10-719 Olsztyn, Poland; krzysztof.lachutta@ampol-merol.pl

* Correspondence: krzysztof.jankowski@uwm.edu.pl

Abstract: The present study was undertaken to determine the effect of different sowing strategies and spring nitrogen (N) fertilizer rates on the technological quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grain in terms of its milling quality, protein complex quality, and enzyme activity (falling number). Winter wheat grain for laboratory analyses was produced in a small-area field experiment conducted between 2018 and 2021 in the AES in Bałcyny (53°35′46.4″ N, 19°51′19.5″ E, NE Poland). The experimental variables were (i) sowing date (early: 6 September 2018, 5 September 2019, and 3 September 2020; delayed by 14 days: 17–20 September; and delayed by 28 days: 1–4 October), (ii) sowing density (200, 300, and 400 live grains m⁻²), and (iii) split application of N fertilizer in spring (40 + 100, 70 + 70, and 100 + 40 kg ha⁻¹) at BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively. A sowing delay of 14 and 28 days increased the bulk density (by 1 and 1.5 percent points (%p), respectively), vitreousness (by 3 and 6%p, respectively), and total protein content of grain (by 1% and 2%, respectively). A sowing delay of 14 days increased grain hardness (by 5%), the flour extraction rate (by 1.4%p), and the falling number (by 3%) while also decreasing grain uniformity (by 1.9%p). In turn, a sowing delay of 28 days increased the wet gluten content of grain (+0.5–0.6%p) and improved the quality of the protein complex in the Zeleny sedimentation test (+1.5%). An increase in sowing density from 200 to 300 live grains m⁻² led to a decrease in grain uniformity (by 2.6%p), the total protein content (by 1.5%), and the wet gluten content of grain (by 0.7%p). A further increase in sowing density decreased grain vitreousness (by 1.4%p). The grain of winter wheat fertilized with 40 and 100 kg N ha⁻¹ in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively, was characterized by the highest hardness (64.7), vitreousness (93%), flour extraction rate (73.9%), total protein content (134 g kg⁻¹ DM), wet gluten content (36%), and Zeleny sedimentation index (69 mL).

Keywords: *Triticum aestivum* L.; grain; milling quality; protein; gluten; sedimentation index; falling number



Citation: Lachutta, K.; Jankowski, K.J. The Quality of Winter Wheat Grain by Different Sowing Strategies and Nitrogen Fertilizer Rates: A Case Study in Northeastern Poland. *Agriculture* **2024**, *14*, 552. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040552>

Academic Editors: Haiyong Xia, Xiaoli Hui and Xinglong Dai

Received: 7 March 2024

Revised: 27 March 2024

Accepted: 28 March 2024

Published: 30 March 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Wheat grain accounts for 21% of total dietary calories, 20% of protein, and 55% of carbohydrates consumed by 4.5 billion people around the world. Wheat a staple food for 36% of the global population [1–4] and one of the most popular cereal crops around the world [5–8]. Wheat, rice, and maize are the three main pillars of the human diet [5]. In 2021, the global harvests of maize, rice, and wheat reached 1210, 778, and 771 Tg, respectively, and accounted for 90% of the total cereal grain harvests worldwide [7]. However, wheat has a considerable advantage over other strategic cereals in terms of global food security because it easily adapts to varied environmental conditions due to its high plasticity [2,6,9,10]. Wheat is cultivated from 67° N in Scandinavia and Russia to 45° S in Argentina, including in elevated areas of tropical and sub-tropical regions [9]. The global area covered by wheat is estimated to be 216–221 million ha (2019–2021), which accounts for around 16% of gross cropped area [7]. In 2019–2021, the world's leading wheat producers were China (135 million Mg y⁻¹), India (107 million Mg y⁻¹), Russia (79 million Mg y⁻¹), the United States (49 million Mg y⁻¹), France (35 million Mg y⁻¹), Canada (30 million Mg y⁻¹), and

Ukraine (29 million Mg y⁻¹). Wheat is also a principal cereal in the European Union (135 million Mg y⁻¹, 2019–2021), including Poland (12 million Mg y⁻¹, 2019–2021). In 2019–2021, wheat accounted for 46% and 36% of total cereal production in the EU and Poland, respectively [7]. Due to the observed increase in the global human population, wheat will continue to play an important role as a strategic cereal crop for sustaining food security [10].

At present, hexaploid common wheat (*Triticum aestivum* L.) accounts for 95% of the wheat grown worldwide, whereas the remaining 5% is mostly tetraploid hard wheat (*T. durum* Desf.) [9]. Common wheat grown for consumption should be characterized by high yields and high technological quality [11,12]. The processing suitability of wheat is determined by grain quality attributes, including (i) the physical properties of grain that influence its milling quality [8,13,14] and (ii) the protein complex, the starch complex, and the activity of amylolytic enzymes [15]. Milling quality is defined as the processing suitability of grain for the milling industry by determining the properties of kernels responsible for high milling yields [16–18]. The milling quality of grain can be evaluated directly in laboratory milling tests [19], and it can be assessed indirectly by analyzing the physical properties of grain (hardness, vitreousness, bulk density, 1000-kernel weight, and uniformity) [14,20]. Kernels with hard (vitreous) and soft (floury) endosperm can be identified in grain hardness tests [21–23]. Hard endosperm strongly adheres to protein particles, which increases its compressive strength. Grain with floury endosperm is characterized by a lower milling yield (milled grain tends to clog the sieves), which increases with a rise in endosperm hardness [16,22,24]. Endosperm color is linked with vitreousness [17,25]. White endosperm is typically found in starchy kernels with low protein content. In turn, gray endosperm is characteristic of vitreous (hard) kernels that are high in protein but contain less starch [26,27]. Vitreousness and hardness are good predictors of grain filling [27], and seed coat thickness affects grain hardness. These parameters determine the bulk density of grain, namely the ratio of kernel weight to kernel volume [20,28–32]. To maximize flour extraction rates in common wheat, bulk density should be a minimum of 72 kg hL⁻¹ and optimally exceed 76 kg hL⁻¹ [10,33,34]. Wheat kernels should also be characterized by uniform thickness (minimum 2.5 mm—thicker kernels are more desirable) because this parameter facilitates processing and increases milling yields [8,10,35]. In the milling and baking industry, the milling quality of wheat grain has to be monitored and controlled to support the production of high-quality flour and cereal products. The milling quality of grain is also an important consideration for farmers and agricultural producers, as it may affect grain purchase prices [10,19].

The protein content of grain also significantly affects flour quality [36,37]. Storage proteins (gliadin and glutenin) play an important role during dough formation and are chiefly responsible for the baking value of wheat flour [38–41]. Gliadins contribute to the extensibility and viscosity of dough, whereas glutenins enhance its elasticity and strength [42,43]. During mechanical kneading, the two proteins are combined in the presence of water to form a viscous and elastic mass (gluten). Gluten determines the water absorption capacity of flour and, consequently, the elasticity and springiness of the obtained dough [44]. The quality of the protein complex is evaluated based on the value of the sedimentation index in the sodium dodecyl sulfate (SDS) test or the Zeleny sedimentation test [45–47]. These tests rely on differences in the size of glutenin particles (high-molecular-weight glutenins, or HMW-GSs, and low-molecular-weight glutenins, or LMW-GSs) [48,49]. Grain with a higher content of HMW-GSs is characterized by higher values of the sedimentation index [10]. HMW-GSs are regarded as the critical determinants of the processing suitability of wheat grain [50–53] despite the fact that they account for only 5–10% of storage proteins in wheat kernels [4,54]. The endosperm of wheat kernels contains 20–30% LMW-GSs [4,54]. Wheat flours with a high HMW/LMW-GSs ratio are characterized by higher baking value [55,56]. The milling quality of wheat grain is also influenced by enzyme activity, which is measured in the falling number test [15,57]. Wheat grain for bread production should have a falling number of 250–350 s. The activity of amylolytic

enzymes is very high in grain with a low falling number (<150 s) and low in grain with a high falling number (>400 s). In both cases, the produced bread is of low quality [58,59]. Protein complex quality and enzyme activity in wheat grain are key parameters in the food processing sector. They are also important for farmers because they determine the quality, technological properties, and nutritional value of flour, being taken into account when selecting cultivars and agronomic management strategies [10,13,15,33,58].

The technological quality of grain is determined mostly by the wheat cultivar and its genetic profile [10,60–63], as well as weather conditions in the generative growth phase of wheat plants [10,50,64–69]. However, mistakes in the wheat production technology can decrease grain quality [13,21,70–76]. Nitrogen (N) fertilization is an agricultural management practice that exerts the greatest impact on the technological quality of wheat grain [10,77]. Grain quality is significantly affected not only by the N rate, but also by the method and date of N application [23,78–80]. Under the agroecological conditions of Poland, the optimal rate of N fertilizer in wheat grown for human consumption is 160 to 180 kg ha^{−2}, and 40–50% of the rate should be applied at the beginning of spring growth [10]. Above all, the N rate affects the biomechanical properties of grain (1000-kernel weight, density, uniformity, and vitreousness) [31,81]. Higher spring N rates increase the bulk density [13] and vitreousness of wheat grain [31,82–84]. According to Kindred et al. [85] and Dargie et al. [86], N fertilization also improves grain filling (by reducing empty spaces and decreasing the content of α -amylase), delays ripening, and prolongs grain dormancy. However, increasing N rates result in smaller and less uniform grain, which can compromise milling yields [70,71]. Higher N rates also increase the content of protein [13,31,81,84,87,88] and gluten in grain [83,88–90]. In turn, lower N rates increase the concentration of gliadins and decrease the content of HMW-GSs and LMW-GSs in grain [90–92]. However, it should be noted that the impact of N fertilization on the content and quality of gluten is strongly correlated with genetic factors (cultivar) and weather conditions during grain filling and ripening [10,93,94]. In some cultivars of common wheat, high N rates are required to obtain grain that is abundant in protein and gluten and can be processed into flour with a high baking value. In other cultivars, the optimal values of these grain parameters can be achieved already at low N rates, and an increase in the N rate can decrease the content and quality of gluten. The above is observed when high N rates are accompanied by high total precipitation, which increases enzyme activity in kernels and triggers kernel germination in spikes [10,95–98]. High enzyme activity decreases the falling number, which often renders grain unsuitable for processing in the milling industry [58,99]. The technological quality of grain is influenced not only by the N rate, but also by N application timing [100,101]. Nitrogen applied in the early stages of wheat growth and development in spring (BBCH stages 22–31, Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie–Meier [102]) affects mainly grain yields, whereas N applied in later stages (BBCH stages 37–51) influences grain quality parameters, mostly total protein content, gluten content, and the sedimentation index [71,80,103–107]. Due to climate change, which affects N use efficiency, fertilization strategies should be thoroughly analyzed to produce winter wheat grain of high technological quality [10,76,93,94].

Different sowing strategies (sowing date and sowing density) are evaluated mostly in terms of their effect on wheat yields, but they are rarely analyzed in the context of grain quality. In Poland, 250–350 live grains m^{−2} should be sown between 15 and 20 September [10]. According to Zende et al. [108], grain characterized by high milling quality can be obtained only when wheat is sown on the optimal date. Delayed sowing generally decreases bulk density [109–113], grain hardness, and milling yield [112,114]. In turn, the grain of late-sown wheat is more abundant in protein and gluten, which increases the sedimentation index [108,112,115–120]. The effect of sowing density on the quality of wheat grain has been rarely investigated in the literature, and the results are inconclusive [11,73,74,121,122]. Geleta et al. [121] and Zecevic et al. [74] found that high sowing density (650 vs. 500 live grains m^{−2}) had a beneficial influence on the milling quality of grain in several cultivars of winter wheat. In the cited studies, densely sown

wheat produced a higher number of main shoots and larger and heavier kernels with a more desirable protein/starch ratio. In less dense stands, grain ripening was delayed, and the plants produced a higher number of secondary shoots (tillers) and smaller and lighter kernels with low bulk density and low quality [74,121]. In turn, Guerrini et al. [11] and Sun et al. [123] found that higher sowing density decreased 1000-kernel weight but did not affect the bulk density of wheat grain. In the work of Soofizada et al. [122], Caglar et al. [73], and Zecevic et al. [74], higher sowing density increased the protein content, gluten content, and the sedimentation index of wheat grain. In view of global climate change, optimal sowing strategies should be defined again to ensure stable production of grain characterized by high processing suitability [112].

Previous studies have mostly focused on evaluating the effect of single agronomic factors on the quality of winter wheat grain. However, the optimal sowing and N management strategies aimed at improving the technological quality of winter wheat grain have not been identified to date. The present study can contribute to optimizing winter wheat cultivation practices in terms of grain quality. The objective of this study was to determine the effect of split spring application of N fertilizer, sowing date, and sowing density on the milling quality (bulk density, vitreousness, uniformity, and flour extraction rate), protein complex quality, and enzyme activity (total protein content, gluten content, Zeleny sedimentation index, and falling number) of winter wheat grain grown in northeastern Poland. The findings from this study can be used to formulate recommendations for optimizing winter wheat cultivation practices, including sowing date, sowing density and N fertilization, to improve the technological quality of grain.

2. Materials and Methods

2.1. Field Experiment

Winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grain was produced in 2018–2021 during a small-area field experiment conducted in the Agricultural Experiment Station in Bałczyn (53°35′46.4″ N, 19°51′19.5″ E, elevation 137 m, north-eastern Poland, *Dfb* according to Köppen’s classification), owned by the University of Warmia and Mazury in Olsztyn. The experiment had a split-plot design with three replicates. The experimental variables were as follows: (i) sowing date: early (6 September 2018, 5 September 2019, and 3 September 2020), delayed by 14 days (17–20 September), and delayed by 28 days (1–4 October); (ii) sowing density: 200, 300, and 400 live grains m^{-2} ; (iii) split application of N fertilizer in spring (BBCH stages 22–25 and 30–31; full tillering stage and first node stage, respectively): 40 + 100, 70 + 70, and 100 + 40 kg ha^{-1} (ammonium nitrate, 34% N). The third portion of N fertilizer (40 kg ha^{-1} ; ammonium nitrate, 34%) was applied in flag leaf, just visible, still rolled (BBCH stage 37) in all plots.

Plot size was 15 m^2 (10 m by 1.5 m). The forecrop was winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). All field treatments were consistent with the agronomic requirements of winter wheat and good agricultural practices. The experimental conditions (soil type and chemical properties) and the production technology of winter wheat were described in detail by Lachutta and Jankowski [124].

2.2. Grain Analysis

Grain uniformity was assessed in a mechanical grain separator (ZBPP sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland) according to Polish Standard PN R-74110:1998 [125]. Wheat kernels (100 g) were placed on the top screen (2.5 × 25 mm) and separated at 310 rpm. The grain remaining on the top screen after 3 min was weighed. Grain uniformity was expressed as the percentage of grain remaining on the top screen in the total weight of the sample. The analysis was conducted on three grain samples (100 g each) from each plot.

The bulk density of winter wheat grain was determined using a density analyzer with a volume of 1 dm^3 (ZBPP sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland) according to Polish Standard PN-EN ISO 7971-3:2019-03 [126]. Bulk density was measured in three grain samples from each plot.

Grain hardness (86% dry matter, DM) was determined with the InfratecTM 1241 grain analyzer (FOSS, Hillerød, Denmark), which relies on the near-infrared transmittance technology in the wavelength range of 570–1050 nm. The analyses were conducted in three grain samples from each plot.

Vitreousness was determined by analyzing the horizontal cross-sections of 50 winter wheat kernels from each plot. The examined kernels were cut in half with a commercial grain cutter (Farinotom, ZBPP sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland). Kernels were classified as vitreous if >75% of their cross-sectional area had a gray color. Grain vitreousness was expressed as the percentage of kernels with vitreous endosperm in the total number of the analyzed kernels, with vitreousness being determined according to Polish Standard PN R-74008:1970 [127].

The flour extraction rate was determined as the percentage of flour obtained from a grain sample (on a weight basis). Flour was obtained by grinding wheat grain in a laboratory mill (Brabender, Quadrumat Junior, Duisburg, Germany). The moisture content of the grain was brought to 14% before milling. The initial moisture content of wheat grain was 10.5–13.0%. The amount of water (with a temperature of 20 °C) required to adjust the moisture content of a 1500 g grain sample to 14% was determined. Grain was conditioned in closed glass containers and stored in a cooled incubator (ICP 500, Memmert, Eagle, WI, USA) for 48 h. The analysis was conducted on three grain samples (150 g each) from each plot.

Total protein content was determined with the AgriCheck instrument (Bruins Instruments, Puchheim, Bayern, Germany), which measures near-infrared transmittance in the wavelength range of 730–1100 nm. Wet gluten content was determined by the gravimetric method with a gluten washing device according to Polish Standard PN-EN ISO 21415-2:2015-12E [128]. Dough was prepared by combining 10 g of sifted flour (250 µm mesh size) and 4.8 cm³ of 2% NaCl solution in a vortex mixer (ZBPP sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland). Gluten was separated in a dual-chamber glutomatic system (ZBPP sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland) with the addition of 250–280 mL of 2% NaCl solution. The separated gluten was dried in a gluten centrifuge (ZBPP sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland) at 3000 rpm for 60 s. The total protein content and wet gluten content were determined in three grain samples from each plot.

The sedimentation index was determined in the Zeleny sedimentation test with the use of the SWD-89 measuring device with a laboratory shaker (ZBPP sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland) according to Polish Standard PN-EN ISO 5529:2010 [129].

The falling number was determined in the Hagberg–Perten test [130,131] with the use of the SWD-SZ falling number system (ZBPP sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland) according to Polish Standard PN-EN ISO 3093:2010 [132].

The bulk density, vitreousness, uniformity of grain, total protein content and wet gluten content of grain, as well as the Zeleny sedimentation index and the falling number were determined in the laboratory of ZBPP sp. z o. o. in Bydgoszcz, Poland. Grain hardness and the flour extraction rate were determined in the laboratories of the University of Warmia and Mazury in Olsztyn.

2.3. Weather Conditions

Weather conditions (mean daily temperature and precipitation) in the growing seasons of winter wheat (2018/2019, 2019/2020, and 2020/2021) were described by Lachutta and Jankowski [124]. Weather conditions between the flowering and fully ripe (harvest) stages are described in detail in the present study. In these phenological growth stages, temperature and precipitation exert the greatest influence on the technological quality of winter wheat grain [10]. Meteorological data (mean daily temperature and total precipitation) were acquired with the use of the PM Ecology automatic weather station (PM Ecology Ltd., Gdynia, Poland) in the AES in Bałcyny. In each growing season, the number of growing degree days (GDD) (Equation (1)) and the Sielyaninov hydrothermal index [133] (Equation (2)) were determined between the beginning of flowering and the milk stage (BBCH stages

61–73), between the milk stage and the dough stage (BBCH stages 73–83), between the dough stage and the fully ripe stage (BBCH stages 83–89), and between the beginning of flowering and the fully ripe stage (BBCH stages 61–89). The Sielyaninov hydrothermal index measures effective precipitation in a given period (as the ratio of precipitation to evaporation, which is determined mainly by the mean daily temperature).

$$\text{GDD} = \Sigma (\text{MDT} - T_{\text{base}}) \quad (1)$$

where:

GDD—growing degree days (°C),

MDT—mean daily temperature (°C),

T_{base} —the base temperature for GDD calculations was 5 °C (period of active plant growth) [134].

$$K = \frac{\Sigma P}{\Sigma (T \times 0.1)} \quad (2)$$

where:

K—Sielyaninov index (K: 0–0.5-extreme dry spell, 0.6–1.0-dry spell, 1.1–2.0-humid spell, >2.1-wet spell),

ΣP —total precipitation in the analyzed period (mm),

ΣT —total mean daily temperature in the analyzed period (°C),

0.1—constant.

2.4. Statistical Analysis

The obtained data (bulk density, vitreousness, uniformity, flour extraction rate, total protein content, wet gluten content, Zeleny sedimentation index, and the falling number) were analyzed in ANOVA using Statistica software, version 13 [135]. Post hoc multiple comparisons were performed with the use of Tukey's test (HSD) in subsequent stages of statistical analyses. Data were regarded as statistically significant at $p \leq 0.05$. The results of the F-test for fixed effects in ANOVA are presented in Table S1. A linear regression method was used to evaluate the relationship between meteorological variables and the studied agronomic parameters. The values of Pearson's correlation coefficient (R) were regarded as significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$ (Table S2).

3. Results

3.1. Weather Conditions

Weather conditions during the phenological growth stages of winter wheat (growing seasons of 2018/2019, 2019/2020, and 2020/2021) were described by Lachutta and Jankowski [124]. This article focuses on weather conditions in growth stages that are critical for grain quality, i.e., from flowering to the fully ripe stage [10]. Mean daily temperature and precipitation between the flowering and harvest (BBCH stages 61–89) of winter wheat varied considerably across the experimental years (2018–2021) (Table 1). The mean thermal time between flowering and harvest was 696–796, 630–649, and 695–706 °C GDD in 2019, 2020, and 2021, respectively. In the first growing season, the mean thermal time between flowering and harvest increased by 22 and 100 °C GDD when sowing was delayed by 14 and 28 days, respectively. Delayed sowing induced a particularly high increase in GDD in BBCH stages 83–89 (93 vs. 118–187 °C). In the remaining years, delayed sowing did not lead to significant differences in GDD during flowering and ripening. In these phenological growth stages, precipitation was determined at 154–178 (1st growing season), 127–128 (2nd growing season), and 134–153 mm (3rd growing season). In the first growing season, late-sown plants were exposed to higher precipitation between flowering and ripening. In the second growing season, rainfall distribution in BBCH stages 61–89 was weakly differentiated by the sowing date. In the third growing season, more abundant precipitation was noted in the flowering stage and in the early stages of grain ripening (BBCH stages 61–73 and BBCH stages 73–83, respectively) in late-sown stands. The last stages of grain ripening

(BBCH 83–89) occurred during a dry spell (41 vs. 0–2 mm). In general, optimal values of the Sielyaninov hydrothermal index were noted during wheat flowering and grain ripening (humid spell). However, in the second growing season, a dry spell ($K = 0.35$ – 0.98) was observed between the milk stage and harvest (BBCH stages 73–89) (Table 1).

Table 1. Phenological development of winter wheat and weather conditions (2018/2019, 2019/2020, and 2020/2021).

Parameter	Growing Season	Sowing Date	Growth Stage			
			BBCH 61–73	BBCH 73–83	BBCH 83–89	BBCH 61–89
Growing Degree Days (°C)	2018/2019	6 September	445	158	93	696
		20 September	450	156	118	718
		4 October	447	166	187	796
	2019/2020	05 September	349	180	120	649
		19 September	359	153	107	630
		3 October	338	160	132	630
	2020/2021	3 September	351	202	152	705
		17 September	390	171	134	695
		1 October	381	172	152	706
Mean daily temperature (°C)	2018/2019	6 September	21.5	16.3	16.6	19.2
		20 September	21.5	16.1	18.0	19.4
		4 October	21.5	15.2	20.5	19.5
	2019/2020	5 September	19.0	17.0	18.3	18.2
		19 September	18.8	17.7	18.4	18.5
		3 October	19.1	17.3	18.2	18.4
	2020/2021	3 September	20.3	21.8	20.2	20.7
		17 September	21.3	22.1	19.9	21.2
		1 October	21.6	22.2	20.2	21.4
Total precipitation (mm)	2018/2019	6 September	92.0	49.9	12.4	154.3
		20 September	91.9	49.9	29.7	171.5
		4 October	101.4	52.8	23.5	177.7
	2019/2020	5 September	94.6	25.1	7.9	127.6
		19 September	107.4	13.4	5.7	126.5
		3 October	111.0	9.9	6.3	127.2
	2020/2021	3 September	55.1	56.9	41.0	153.0
		17 September	59.2	79.2	0.0	138.4
		1 October	65.2	73.2	2.3	140.7
Sielyaninov index (K)	2018/2019	6 September	1.59	2.19	0.93	1.64
		20 September	1.58	2.21	1.83	1.77
		4 October	1.74	2.18	0.95	1.66
	2019/2020	5 September	1.99	0.98	0.48	1.43
		19 September	2.20	0.63	0.39	1.49
		3 October	2.42	0.44	0.35	1.47
	2020/2021	3 September	1.18	2.17	2.03	1.65
		17 September	1.16	3.59	0.00	1.52
		1 October	1.31	3.29	0.11	1.53

K: 0–0.5-extreme dry spell, 0.6–1.0-dry spell, 1.1–2.0-humid spell, >2.1-wet spell. BBCH 61–73: beginning of flowering–milk stage; BBCH 73–83: milk stage to dough stage, BBCH 83–89: dough stage to fully ripe stage; BBCH 61–89: beginning of flowering to fully ripe stage.

3.2. Milling Quality

Grain uniformity was negatively correlated with the mean daily temperature between flowering and harvest (BBCH stages 61–89) (Figure 1). The most uniform grain (83.0%) was harvested in the second growing season (Table 2) when the mean daily temperature was low at BBCH stages 61–89 (18.2–18.5 °C) (Table 1). Grain uniformity was lowest (69.7%) in the third growing season (Table 2), which was characterized by the highest mean daily temperature between flowering and harvest (20.7–21.4 °C) (Table 1). Late-sown plants were exposed to higher mean daily temperatures between flowering and ripening (BBCH stages 61–89) (Table 1), which decreased grain uniformity by 1.9 percent points (%p) (Table 2). Sowing date exerted the greatest influence on grain uniformity in the first growing season when a sowing delay of 14 days decreased grain uniformity by 6.1%p (Figure 2a), mainly due to higher mean daily temperatures between flowering and ripening stages (20.7 vs. 21.2–21.4 °C) (Table 1). An increase in sowing density from 200 to 300 live grains m⁻² induced a 2.6%p decrease in grain uniformity (Table 2). The split spring N rate had no significant effect on grain uniformity (Table S1).

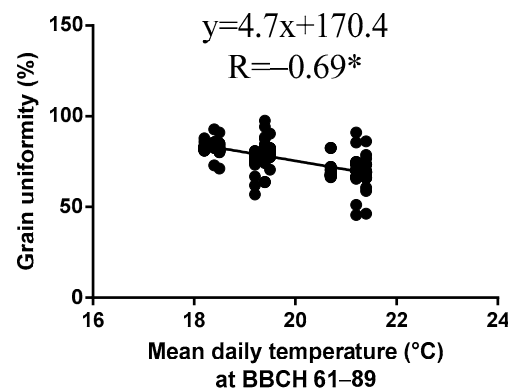


Figure 1. Linear regression between grain uniformity and mean daily temperature at BBCH 61–89. * significant at $p \leq 0.05$.

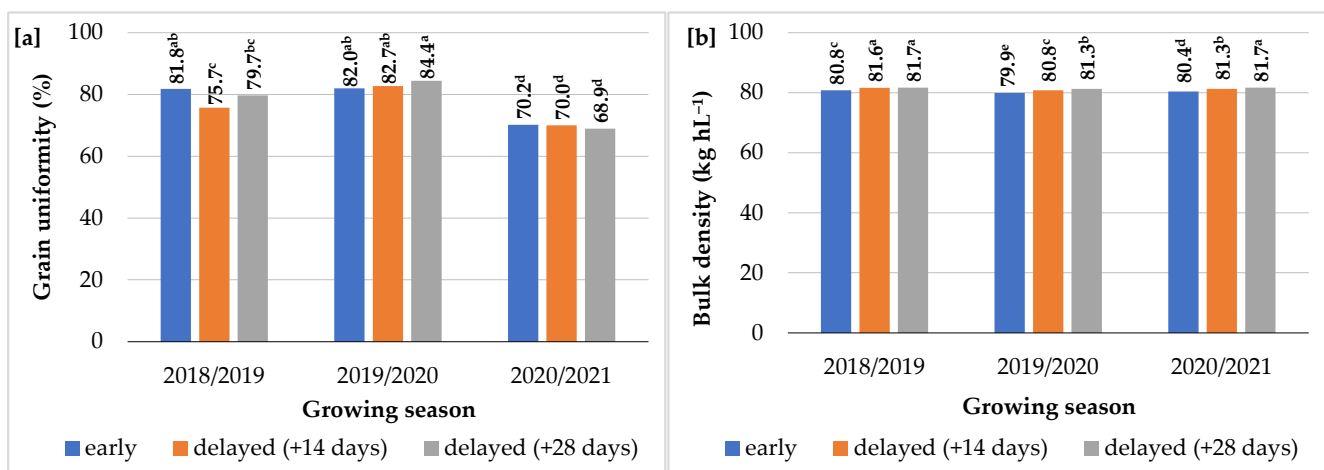


Figure 2. The effect of the sowing date on (a) grain uniformity and (b) the bulk density of winter wheat grain (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021). Early sowing: 3–6 September; delayed sowing (+14 days): 17–20 September; delayed sowing (+28 days): 1–4 October. Means followed by the same letters are not significantly different at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

The bulk density of winter wheat grain ranged from 80.7 (2019/2020) to 81.1–81.3 kg hL⁻¹ (2018/2019 and 2020/2021). Bulk density increased by 1.0%p and 1.5%p when winter wheat was sown, with a delay of 14 and 28 days, respectively (Table 2). In the first growing season, the grain of wheat sown in the middle of September had the highest bulk density

(81.6 kg hL⁻¹). In the second and third growing seasons, bulk density was highest (81.3 and 81.7 kg hL⁻¹, respectively) in winter wheat stands sown at the beginning of October (Figure 2b). Sowing density and the split spring N rate did not induce significant differences in the bulk density of grain, regardless of weather conditions (Table S1).

Table 2. Milling quality of winter wheat grain.

Parameter	Uniformity (%)	Bulk Density (kg hL ⁻¹)	Hardness	Vitreousness (%)	Flour Extraction Rate (%)
Growing season					
2018/2019	79.1 ^b	81.3 ^a	62.7 ^b	90.9 ^b	73.2 ^b
2019/2020	83.0 ^a	80.7 ^c	58.8 ^c	88.9 ^c	71.2 ^c
2020/2021	69.7 ^c	81.1 ^b	68.0 ^a	97.1 ^a	74.7 ^a
Sowing date, mean for 2018–2021					
Early	78.0 ^a	80.4 ^c	61.4 ^b	89.2 ^c	71.8 ^b
Delayed (+14 days)	76.1 ^b	81.2 ^b	64.3 ^a	92.5 ^b	73.2 ^a
Delayed (+28 days)	77.7 ^{ab}	81.6 ^a	63.8 ^a	95.2 ^a	74.0 ^a
Sowing density (live grains m ⁻²), mean for 2018–2021					
200	78.8 ^a	81.0	63.4	93.1 ^a	73.2
300	76.2 ^b	81.1	63.2	92.0 ^{ab}	72.9
400	76.9 ^b	81.1	63.0	91.7 ^b	73.0
Split spring N rate (kg ha ⁻¹), mean for 2018–2021 †					
40 + 100	76.7	81.1	64.7 ^a	93.2 ^a	73.9 ^a
70 + 70	77.8	81.1	62.0 ^b	91.9 ^b	73.0 ^{ab}
100 + 40	77.3	81.1	62.9 ^b	91.8 ^b	72.1 ^b

† BBCH stages 22–25 + BBCH stages 30–31. Early sowing: 3–6 September; delayed sowing (+14 days): 17–20 September; delayed sowing (+28 days): 1–4 October. Means followed by the same letters are not significantly different at $p \leq 0.05$ in Tukey's test. Means without letters indicate that the main effect is not significant.

Grain hardness was negatively correlated with grain uniformity (Table S2) and positively correlated with main daily temperature between flowering and harvest (Figure 3). Winter wheat plants produced the hardest grain (68.0) in the third growing season (2020/2021) (Table 1), which was characterized by the highest mean daily temperature between flowering and harvest (20.7–21.4 °C) (Table 1). Grain hardness was 8% and 14% lower in the first and second growing season, respectively (the mean daily temperature was 1.7 °C and 2.7 °C lower in BBCH stages 61–89, respectively). Grain hardness increased by 5% when wheat was sown with a 14-day delay (mid-September) relative to the early sowing date (Table 2). Late-sown plants were exposed to higher temperatures during flowering and ripening (Table 1), which explains the observed increase in grain hardness (Figure 3). Sowing density (200, 300, and 400 live grains m⁻²) had no effect on grain hardness (Table S1). The split spring N rate of 40 + 100 kg ha⁻¹ (BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively) promoted an increase in grain hardness. An increase in the early spring N rate with a simultaneous decrease in the N rate applied in the stem elongation stage (70 + 70 or 100 + 40 kg ha⁻¹) decreased grain hardness by 3–4% (Table 2).

Grain vitreousness ranged from 88.9% to 97.1% (Table 3). The regression analysis revealed a positive correlation between vitreousness and mean daily temperature in the dough stage (BBCH stages 83–89) (Figure 4); therefore, grain vitreousness was highest (97.1%) in the third growing season (Table 2), which was characterized by the highest mean daily temperature in BBCH stages 83–89 (19.9–20.2 °C) (Table 1). Late-sown plants were exposed to higher mean daily temperatures in the dough stage (Table 1), which increased grain vitreousness by 3%p (+14 days) and 6%p (+28 days) (Table 2). There was a lack of

interaction between grain vitreousness and the sowing date in the third growing season exclusively (Figure 5), which could be attributed to the absence of a relationship between the sowing date and the mean daily temperature in the dough stage (Table 1). Grain vitreousness decreased by 1.4%p when sowing density was increased from 200 to 400 live grains m^{-2} . An increase in the first spring N rate (BBCH stages 22–25) from 40 to 70 or 100 kg ha^{-1} with a simultaneous decrease in the N rate in BBCH stages 30–31 (from 100 to 70 and 40 kg ha^{-1}) increased grain vitreousness by 1.3–1.4%p (Table 2).

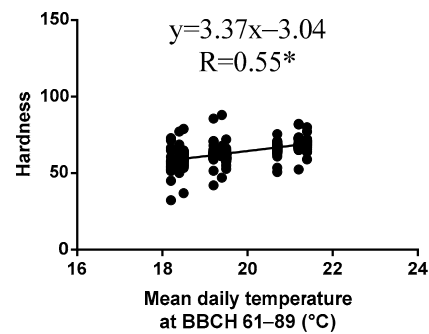


Figure 3. Linear regression between grain hardness and mean daily temperature at BBCH stages 61–89. * significant at $p \leq 0.05$.

Table 3. Protein complex quality and enzyme activity in winter wheat grain.

Parameter	Total Protein Content (g kg^{-1} DM)	Wet Gluten Content (%)	Zeleny Sedimentation Index (mL)	Falling Number (s)
Growing season				
2018/2019	137 ^a	34.0 ^b	68.1 ^b	364 ^b
2019/2020	129 ^c	34.3 ^b	68.2 ^b	328 ^c
2020/2021	132 ^b	38.3 ^a	69.0 ^a	381 ^a
Sowing date, mean for 2018–2021				
Early	131 ^c	35.4 ^b	68.0 ^b	352 ^b
Delayed (+14 days)	132 ^b	35.3 ^b	68.3 ^{ab}	364 ^a
Delayed (+28 days)	134 ^a	35.9 ^a	69.0 ^a	358 ^{ab}
Sowing density (live grains m^{-2}), mean for 2018–2021				
200	134 ^a	36.0 ^a	68.8	360
300	132 ^b	35.3 ^b	68.1	359
400	132 ^b	35.3 ^b	68.3	354
Split spring N rate (kg ha^{-1}), mean for 2018–2021 †				
40 + 100	134 ^a	36.0 ^a	68.9 ^a	356
70 + 70	133 ^b	35.5 ^b	68.4 ^{ab}	359
100 + 40	131 ^c	35.2 ^b	68.0 ^b	357

† BBCH stages 22–25 + BBCH stages 30–31. Early sowing: 3–6 September; delayed sowing (+14 days): 17–20 September; delayed sowing (+28 days): 1–4 October. Means followed by the same letters are not significantly different at $p \leq 0.05$ in Tukey's test. Means without letters indicate that the main effect is not significant.

The flour extraction rate ranged from 71.2% (2019/2020) to 74.7% (2020/2021) (Table 2), and it was significantly differentiated by the sowing date and the split spring N rate (Table S1). The flour extraction rate was lowest (71.8%) in early sown stands (beginning of September). The analyzed parameter increased from 1.4 to 2.2%p when sowing was delayed by 14 and 28 days. The flour extraction rate peaked (73.9%) in response to the spring N rate of 40 and 100 kg ha^{-1} applied in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively.

An increase in the early spring N rate with a simultaneous decrease in the N rate applied in BBCH stages 30–31 ($100 + 40 \text{ kg ha}^{-1}$) decreased the flour extraction rate by 1.8%p (Table 2).

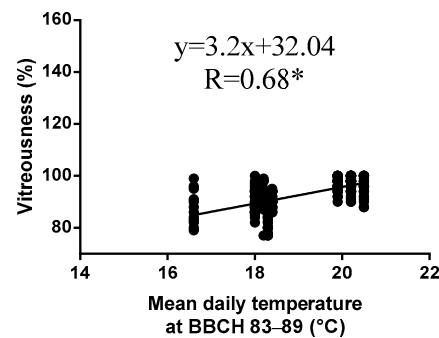


Figure 4. Linear regression between grain vitreousness and mean daily temperature at BBCH stages 83–89. * significant at $p \leq 0.05$.

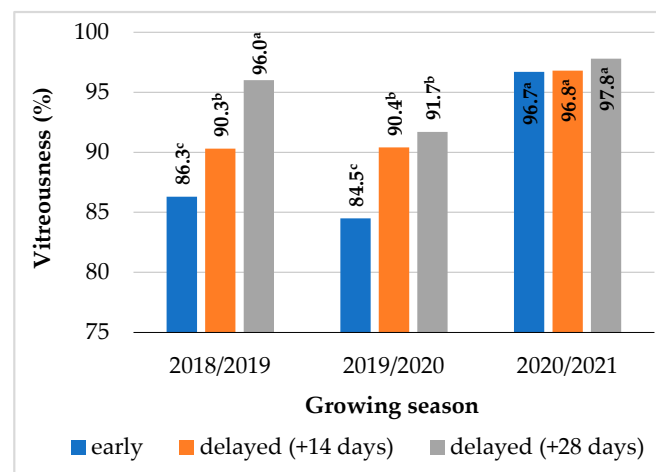


Figure 5. The effect of the sowing date on grain vitreousness (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021). Early sowing: 3–6 September; delayed sowing (+14 days): 17–20 September; delayed sowing (+28 days): 1–4 October. Means followed by the same letters are not significantly different at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

3.3. Protein Complex Quality and Enzyme Activity in Grain

The total protein content of winter wheat grain was positively correlated with GDD, precipitation, and the Sielyaninov hydrothermal index between flowering and harvest (BBCH stages 61–89) (Figure 6). Weather conditions were least favorable in the second growing season (Table 1), which resulted in the lowest total protein content of grain ($129 \text{ g kg}^{-1} \text{ DM}$) (Table 3). In the second and third growing season, weather conditions were more favorable during wheat flowering and grain ripening (Table 1), which increased the total protein content of grain (132 – $137 \text{ g kg}^{-1} \text{ DM}$) (Table 3). Delayed sowing increased total protein content by 1% (+14 days) and 2% (+28 days) (Table 3). A sowing delay of 14 and 28 days induced a particularly high increase in the total protein content of grain in the first growing season (4% and 8%, respectively) (Figure 7a). In this season, late-sown plants were exposed to higher GDD (696 vs. 718–796 °C), higher precipitation (154 vs. 172–178 mm), and higher values of the Sielyaninov index (1.64 vs. 1.66–1.77) (Table 1) between flowering and harvest, and these parameters are positively correlated with the total protein content of grain (Figure 6). The total protein content of winter wheat grain decreased by 1.5% when sowing density was increased from 200 to 300 live grains m^{-2} (Table 3). It should also be noted that the effect exerted by sowing density on the total protein content of grain was significantly modified by weather conditions during the growing season and the sowing date (Table S1). In the first growing season, a reduction in total protein content was observed already when sowing density was increased from 200 to 300 live grains m^{-2} .

In the second growing season, total protein content decreased only when sowing density was increased to 400 live grains m^{-2} . In turn, sowing density had no effect on the total protein content of grain in the third growing season (Figure 7b). An increase in sowing density decreased the total protein content of grain only in stands sown with a delay of 14 and 28 days (by 2% and 3%, respectively) (Figure 7c). Total protein content was highest when winter wheat was supplied with 40+100 kg N ha^{-1} in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively. An increase in the first spring N rate with a simultaneous decrease in the N rate applied in BBCH stages 30–31 (70 + 70 or 40 + 100 kg ha^{-1}) decreased the total protein content of grain by 1% and 2%, respectively (Table 3).

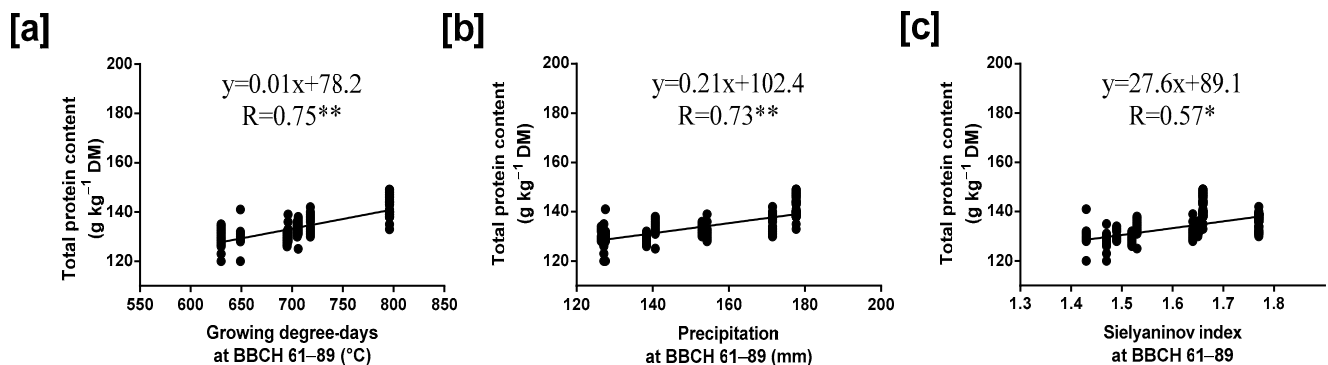


Figure 6. Linear regression between the total protein content of winter wheat grain and (a) growing degree days at BBCH stages 61–89; (b) precipitation at BBCH stages 61–89; (c) Sielyaninov index at BBCH stages 61–89. * significant at $p \leq 0.05$; ** significant $p \leq 0.01$.

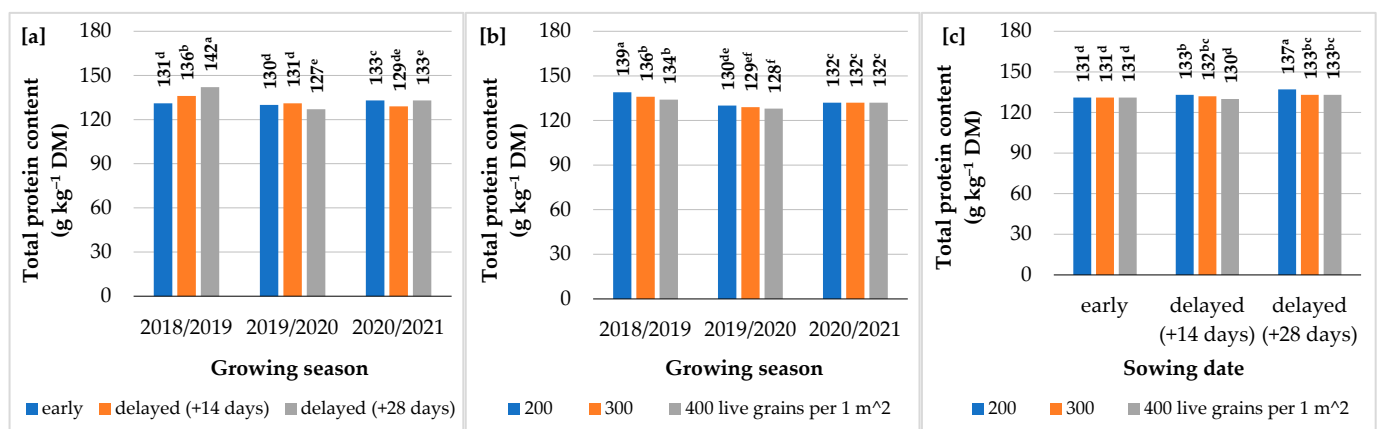


Figure 7. The effect of (a) the sowing date, (b) sowing density (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021), and (c) the interaction between the sowing date and sowing density (mean for 2018–2021) on the total protein content of winter wheat grain. Early sowing: 3–6 September; delayed sowing (+14 days): 17–20 September; delayed sowing (+28 days): 1–4 October. Means followed by the same letters are not significantly different at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

The wet gluten content of winter wheat grain was negatively correlated with grain uniformity and positively correlated with grain vitreousness (Table S2). Wet gluten content was also influenced by the mean daily temperatures in BBCH stages 61–89, and by precipitation and the Sielyaninov index in BBCH stages 73–83. An increase in the values of these parameters promoted the accumulation of wet gluten in grain (Figure 8). Therefore, wet gluten content was highest in grain harvested in the third growing season (38.3%), and it was 4.3%p and 4.0%p lower in the first and second growing season, respectively. A sowing delay of 28 days increased wet gluten content by 0.5–0.6%p. In stands sown with a 28-day delay, a greater increase in wet gluten content (2.2%p) was observed in the first growing season (Figure 9a). In this season, late-sown plants were exposed to more

favorable weather conditions during flowering and grain ripening. In turn, higher precipitation (by 6%) and higher values of the Sielyaninov index (by 52–65%) were observed in the milk stage (BBCH stages 73–83) (Table 1). An increase in sowing density from 200 to 300 live grains m^{-2} decreased wet gluten content by 0.7%p (Table 3). A greater decrease in the wet gluten content of grain (by 0.8%p and 1.5%p) was noted in late-sown stands (+14 and +28 days, respectively). In early sown stands (beginning of September), an increase in sowing density did not induce significant differences in wet gluten content (Figure 9b). The split application of different N rates in spring had no effect on the wet gluten content of winter wheat grain (Table S1).

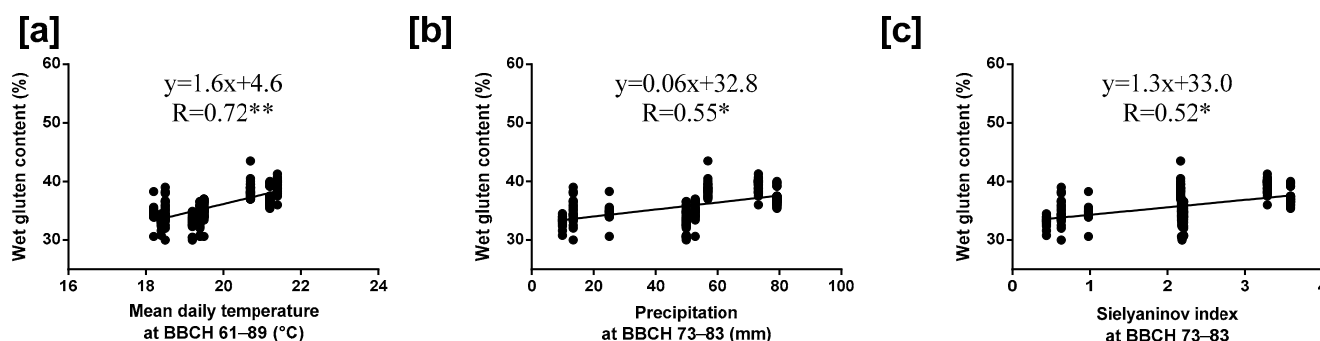


Figure 8. Linear regression between the wet gluten content of winter wheat grain and (a) mean daily temperature at BBCH stages 61–89; (b) precipitation at BBCH 73–83; (c) Sielyaninov index at BBCH stages 73–83. * significant at $p \leq 0.05$; ** significant at $p \leq 0.01$.

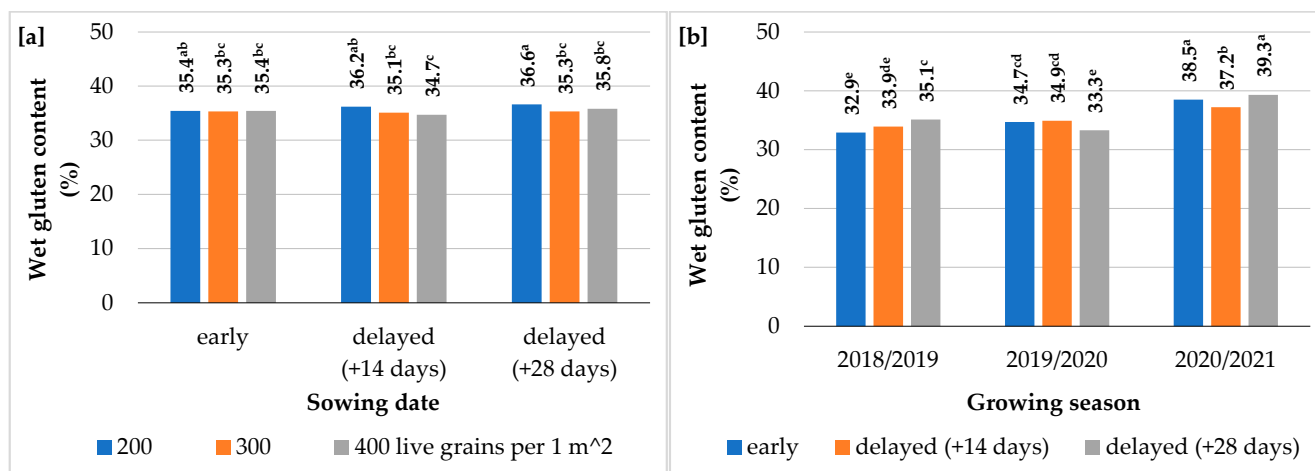


Figure 9. The effect of (a) the sowing date and (b) the interaction between the sowing date and sowing density on the wet gluten content of winter wheat grain (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021). Early sowing: 3–6 September; delayed sowing (+14 days): 17–20 September; delayed sowing (+28 days): 1–4 October. Means followed by the same letters are not significantly different at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

The quality of the protein complex (evaluated in the Zeleny sedimentation test) was somewhat higher in the grain of winter wheat grain harvested in the third growing season than in the first and second growing season (69.0 vs. 68.1–68.2 mL). A 28-day delay in sowing improved the sedimentation index of grain (Table 3) regardless of year, sowing density, or the split spring N rate (Table S1). These results could be indirectly indicative of a higher content of HMW-GSs and higher baking quality of flour. The sedimentation index was not differentiated by sowing density (200, 300, and 400 live grains m^{-2}) (Table S1). The spring N rate of 40 + 100 kg ha^{-1} applied in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively, exerted a more favorable influence on protein complex quality. An increase in the first spring N rate (BBCH stages 22–25) with a simultaneous decrease in the N rate applied in

BBCH stages 30–31 (40 + 100 vs. 70 + 70 or 100 + 40 kg ha^{−1}) decreased the sedimentation index by 0.7% and 1.3%, respectively (Table 3).

The falling number was positively correlated with the wet gluten content of winter wheat grain (Table S2). The falling number was also positively correlated with a mean daily temperature between flowering and harvest, as well as with precipitation and the Sielyaninov index in the milk stage (Figure 10). Enzyme activity in grain (falling number) was highest in the growing seasons of 2018/2019 and 2020/2021 (364 and 381 s, respectively), and it was 10% and 14% lower, respectively, in the second growing season (Table 1). This season was characterized by the lowest mean daily temperature (18.2–18.5 °C) between flowering and harvest and a dry spell in the milk stage (9.9–25.1 mm, K = 0.44–0.98) (Table 1). Alpha-amylase activity was very high, but it remained within (250–350 s) or somewhat above the optimal range of values for the falling number, not exceeding the level at which flour is unsuitable for breadmaking (<400 s). The falling number increased by 3% when sowing was delayed by 14 days (Table 3), which could be attributed to the fact that late-sown plants were exposed to higher mean daily temperatures during flowering and ripening, and more abundant precipitation and higher values of the Sielyaninov index in the milk stage (Table 1). These parameters were positively correlated with the falling number (Figure 10). Sowing density and the split spring N rate caused no significant differences in the falling number (Table S1).

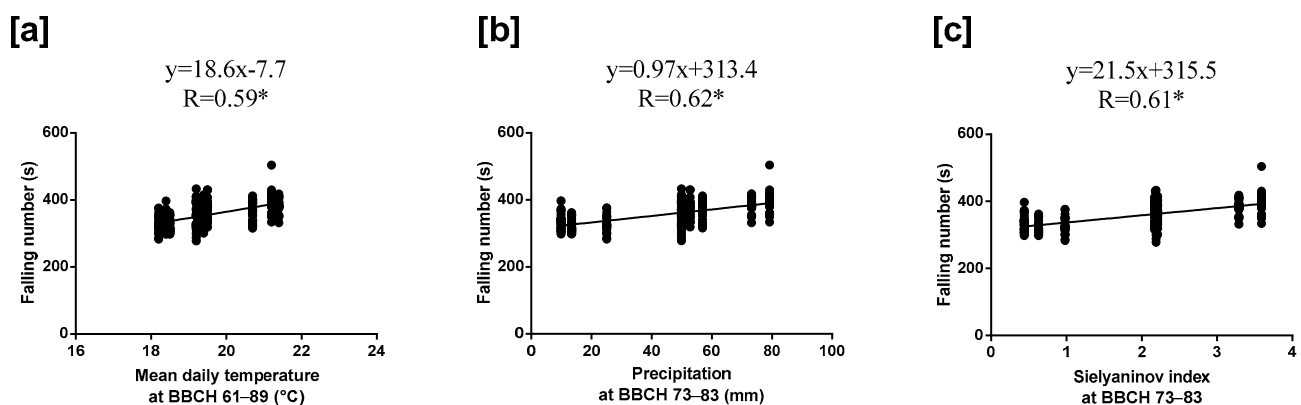


Figure 10. Linear regression between the falling number and (a) mean daily temperature at BBCH stages 61–89; (b) precipitation at BBCH stages 73–83; (c) Sielyaninov index at BBCH stages 73–83. * significant at $p \leq 0.05$.

4. Discussion

4.1. Milling Quality

Grain uniformity is an important indicator of grain quality and milling performance [136,137], and this trait is strongly influenced by the sowing date [112,138–142]. In the work of Meena et al. [112], early sown wheat produced the largest kernels (with a diameter of 2.87 and 2.90 mm). Kernel diameters decreased by 3–4% when sowing was delayed by 6 weeks. According to Meena et al. [112], the decrease in kernel size in late-sown stands could be attributed to higher temperature and lower precipitation during grain formation. The presence of a relationship between the sowing date and grain uniformity/kernel size was also noted by Panazzo and Eagles [138], Waraich et al. [140], Coventry et al. [141], and in this study [Table 2, Figure 1]. In the present study, grain uniformity was negatively correlated with mean daily temperatures between flowering and harvest (BBCH stages 61–89). The most uniform grain (83.0%) was harvested in a growing season with a low mean daily temperature at BBCH stages 61–89. In turn, wheat plants exposed to the highest mean daily temperature in BBCH stages 61–89 produced the least uniform grain (69.7%). Late-sown stands were exposed to higher mean daily temperatures during flowering and ripening, which decreased grain uniformity by 1.9%p. In a study by McKenzie [139], an increase in the sowing density of barley (*Hordeum vulgare* L.) from 150 to 350 grains m^{−2}

decreased kernel size by 5%. In the work of Forster et al. [142], the size of durum wheat kernels was reduced by 4% when sowing density was increased from 222 to 371 grains m^{-2} . In the current study, an increase in sowing density from 200 to 300 live grains m^{-2} also decreased grain uniformity by 2.6%p. In the experiment conducted by Sadowska et al. [143], an increase in the N rate from 50 to 150 kg ha^{-1} had no effect on the size of common wheat kernels. Varga [144] found no correlation between agricultural inputs in the production technology of wheat and kernel size (dimensions). Similar observations were made in the present study, where the split spring N rate had a minor influence on the uniformity of winter wheat grain.

Bulk density is an important indicator of grain development, grain structure, and the thickness of the seed coat [13]. Higher bulk density enhances the processing suitability of wheat grain [13,145]. In a study by Meena et al. [112], wheat grown on sandy-loamy soil in a semi-arid region of India was characterized by higher bulk density (80.2 kg hL^{-1}) in early sown stands (beginning of November) and significantly lower bulk density (78.3 kg hL^{-1}) in stands sown with a 6-week delay. According to the cited authors, delayed sowing led to premature ripening and drying of unripe grain in the filling stage due to high temperature. In a study conducted by Kaur et al. [111] in India, delayed sowing decreased the bulk density of wheat grain by 3%. Delayed sowing also considerably reduced the bulk density of grain grown in Australia, Brazil, India, and Iraq [109,110]. In contrast, in the present experiment, bulk density was highest (81.6 kg hL^{-1}) when sowing was delayed by 28 days, which could be attributed to the absence of a relationship between the bulk density of grain and weather conditions (GDD, mean daily temperature, precipitation, and the Sielyaninov index) between flowering and harvest. Densely sown wheat plants generally develop smaller and fewer spikes, which can contribute to an increase in kernel size [146]. In the current study, sowing density was not correlated with the bulk density of winter wheat grain, probably because the phenological development of grain occurred in periods when precipitation and nutrient levels were sufficient to counteract the decrease in the number and size of spikes. Similar observations were made by Otteson et al. [147] and Guerrini et al. [11], who found no correlation between sowing density and the bulk density of wheat grain. The bulk density of winter wheat grain can also be modified by adjusting the N rate [147–149]. Jankowski et al. [13] demonstrated that an increase in agricultural inputs in the production technology of winter wheat increased the bulk density of grain by 1%. In a study by Harasim and Wesolowski [148], the bulk density of wheat grain increased by 1% when the N rate was increased from 100 to 150 kg ha^{-1} . In turn, Jańczak-Pieniążek et al. [149] found that bulk density was associated with the cultivar of winter wheat. In open-pollinated cultivars, the bulk density of grain increased significantly (by 5%) when the N rate was increased from 110 to 150 kg ha^{-1} . In hybrid cultivars, the N rate had no influence on bulk density. No correlations between N fertilization and the bulk density of wheat grain were reported by either Otteson et al. [147], Guerrini et al. [11], or in this study [Tables S1 and 2].

Grain hardness determines milling quality by influencing milling yield and the baking value of flour [150]. In the present study, grain hardness was negatively correlated with grain uniformity (an increase in uniformity led to a decrease in hardness). In the work of Meena et al. [112], early sown stands produced the hardest grain, while delayed sowing decreased grain hardness by 7–11%. Similar results were reported by Coventry et al. [141,151]. In the current experiment, grain hardness was positively correlated with mean daily temperatures between flowering and harvest. Late-sown stands were exposed to higher temperature during flowering and ripening, which increased grain hardness by 5%. Grain hardness was not affected by sowing density (200, 300, and 400 live grains m^{-2}), which corroborates the findings of McKenzie et al. [152] and Twizerimana et al. [153]. According to Souza et al. [154], grain hardness is influenced by cultivar, environmental conditions, location, and N availability. In the present study, the hardest grain was produced in winter wheat stands supplied with 40 + 100 kg N ha^{-1} in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively. An increase in the early spring N rate, accompanied by a decrease in the N

rate at the beginning of stem elongation ($70 + 70$ or $100 + 40$ kg ha⁻¹), decreased grain hardness by 3–4%. In the work of Zhong et al. [155], grain hardness peaked in response to 60 kg N ha⁻¹ applied in BBCH stage 17 or 31, and it was 8% lower when N fertilizer was applied in BBCH stage 37. Hao et al. [156] found that grain hardness was reduced by around 10% when the total N rate of 210 kg ha⁻¹ was split into two portions (applied at the beginning of stem elongation and during flowering) than when the same N rate was split into four portions (beginning of stem elongation, heading, flowering, and grain filling). In turn, Blandino et al. [157] reported that the hardness of wheat grain was not affected when the total N rate of 130 kg ha⁻¹ was applied in one split (BBCH stage 23) or in two splits (BBCH stages 23 and 32). In a study by Valdés-Valdés et al. [158], N rates of 0 to 300 kg ha⁻¹ did not induce differences in the hardness of wheat grain. Split application of N fertilizer had no effect on grain hardness in the work of Mor et al. [159] and Zhang et al. [44].

Vitreousness is an important property of endosperm [13]. Vitreous kernels contain more endosperm and protein and are harder than non-vitreous kernels [160]. In the present study, harder grain was also characterized by higher vitreousness and higher milling yield. Vitreousness was positively correlated with mean daily temperatures in the dough stage. Late-sown plants were exposed to higher temperatures in the dough stage, which increased grain vitreousness by 3%p (+14 days) and 6%p (+28 days). A relationship between the sowing date and grain vitreousness was not observed only in the growing season when delayed sowing was not associated with different temperatures in the dough stage. In turn, Forster et al. [142] reported that neither sowing date nor sowing density affected the vitreousness of durum wheat grain. In the work of Božek et al. [161] and Karabínová et al. [162], the vitreousness of durum wheat and common wheat grain, respectively, was not significantly influenced by sowing density, either. In the current study, an increase in sowing density from 200 to 400 live grains m⁻² decreased grain vitreousness by 1.4%p. The results of studies investigating the effect of agricultural inputs on grain vitreousness are inconclusive [13]. In the work of Jańczak-Pieniążek et al. [149], an increase in the N rate from 110 to 150 kg ha⁻¹ in the production of open-pollinated wheat cultivars had no influence on grain vitreousness. Higher N rates increased grain vitreousness by 23–25%p in only two out of the seven examined hybrid cultivars of winter wheat. Jankowski et al. [13] reported that the vitreousness of winter wheat grain increased by 11%p in a high-input production technology. Higher N rates also increased the percentage of kernels with vitreous endosperm in the work of Budzyński et al. [70] and Narkiewicz-Jodko et al. [82]. In the present experiment, grain vitreousness was highest (93.2%) in winter wheat stands supplied with $40 + 100$ kg N ha⁻¹ (BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively). An increase in the N rate in BBCH stages 22–25, with a simultaneous decrease in the N rate in BBCH stages 30–31 ($70 + 70$ or $100 + 40$ kg ha⁻¹), decreased grain vitreousness by 1.3–1.4%p.

The flour extraction rate is a key parameter in analyses of the milling quality of grain, and it largely determines profits in flour production [13]. In a study by Meena et al. [112], the grain of early sown wheat was characterized by the highest flour recovery (63–68%), and delayed sowing decreased flour recovery by 3%p. A similar relationship between the sowing date and flour yield was reported by Gaire et al. [163] and Zheng et al. [164]. It should also be noted that milling yield is strongly correlated with kernel size, and the value of this parameter is highest in large and well-filled grain [13,165]. In the present study, late-sown wheat produced larger, harder, and more vitreous kernels, which increased flour extraction rates (by 1.4–2.2%p). Otteson et al. [147] found no correlation between sowing density and flour yield, and similar observations were made in the present study [Table 3]. In turn, in the work of Caglar et al. [73], flour yield was reduced by 3% when the seeding rate was increased from 325 to 625 grains m⁻². Milling yield is determined by the physical properties of kernels (size, hardness, vitreousness, and bulk density), which are strongly influenced by N fertilization. In the present study, the milling yield peaked (73.9%) in wheat stands supplied with 40 and 100 kg N ha⁻¹ in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively. An increase in the early spring N rate with a simultaneous decrease in the N rate at the beginning of stem elongation ($100 + 40$ kg ha⁻¹) decreased the milling

yield by 1.8%p. In turn, in the work of Zheng et al. [164], the flour yield was 1%p higher when N fertilizer was applied at a 6:4 ratio (BBCH stages 00 and 31) than a 7:3 ratio. In a study by Wu et al. [166], the application of the total N rate of 180 kg ha⁻¹ in three splits (before sowing and during tillering and stem elongation at a ratio of 5:1:4, 7:1:2, and 5:4:1, respectively) had no effect on flour yield. Budzyński et al. [70], Otteson et al. [147], and Jankowski et al. [13] also found that the intensity of agricultural inputs in wheat production had no significant influence on flour yield.

4.2. Protein Complex Quality and Enzyme Activity in Grain

Wheat grain is a rich source of essential nutrients, including protein, in the human diet [167,168]. Protein content is the main indicator of wheat grain quality in commerce and processing [90]. The protein content of wheat grain ranges from 100 to 150 g kg⁻¹ DM [9,11,90]. Genetic factors are responsible for approximately a third of the variation in the protein content of wheat grain [9]. The remaining two thirds of the variation are determined by environmental factors (soil quality, weather conditions) and agronomic practices, including sowing and fertilization [169]. The sowing date significantly affects the total protein content of grain mainly due to different temperatures during grain filling. When wheat is sown late, flowering is delayed and plants are exposed to high temperatures in the grain filling stage [170]. Thermal stress decreases kernel size, inhibits endosperm development, and increases protein concentration [171–173]. Moderate environmental stress (high temperature, water deficit during grain filling) can stimulate protein remobilization from vegetative organs to grain [64,174,175]. Meena et al. [112] found that delayed sowing significantly increased the protein content of grain (by 6–8%). Delayed sowing and exposure to higher temperatures also increased the protein content of grain in the work of Gooding et al. [115], Zende et al. [108], Motzo et al. [116], Sattar et al. [176], Farooq et al. [117], Singh et al. [118], and Shah et al. [177]. In the present study, the total protein content of grain was positively correlated with GDD, precipitation, and the Sielyaninov index between flowering and harvest (BBCH stages 61–89). Late-sown plants were exposed to higher GDD and higher precipitation in these phenological growth stages, which increased the total protein content of grain by 1–2%. The relationship between sowing density and the protein content of wheat grain is not unidirectional [11,147,178–184]. Otteson et al. [147], Nakano and Morita [180], Dragoş and Pîrşan [181], Jemal et al. [182], and Guerrini et al. [11] did not report any associations between sowing density and the protein content of grain. In the current study, an increase in sowing density from 200 to 300 live grains m⁻² reduced the total protein content of grain by 1.5% on average. However, the decrease in protein content induced by higher sowing density was exacerbated when wheat was sown with a delay of 14 and 28 days (protein content decreased by 2–3%). In the work of Gooding et al. [178] and Han and Yang [179], the protein content of grain also decreased by around 3% when sowing density was increased from 180–200 to 270–400 live grains m⁻². A reverse relationship was reported by Hao et al. [184], who found that an increase in sowing density from 200 to 250 live grains m⁻² induced a 6% increase in the protein content of grain. In turn, Zhang et al. [183] observed that the protein content of wheat grain was highest at a sowing density of 260 live grains m⁻², whereas lower or higher sowing densities decreased protein content by 3% [183]. Nitrogen fertilization is one of the key factors that affect the content and composition of protein in wheat grain [169]. Nitrogen is an essential component of amino acids, the building blocks of proteins, which is why N supply is critical in all stages of plant development [11,13,90,185]. However, the use of N fertilizers in crop production has to be reduced for environmental reasons, and alternative strategies are needed to maximize protein yields while decreasing the release of unused N to soil, water, and the atmosphere. For this reason, N fertilization should be optimized by selecting the appropriate total rate or split rate, application timing, and type of fertilizer [186,187]. The application of N fertilizer in the late stages of growth promotes protein accumulation in grain [186]. In a study by Landolfi et al. [185], an N rate of 80 or 160 kg ha⁻¹ applied in two equal portions (50:50) in tillering and stem elongation stages increased the protein content of grain by 15–18%. In the

work of Wieser et al. [90], the protein content of grain was 4–9% higher when N fertilizer was applied only before sowing than when N was applied both before sowing and in the stem elongation stage. In a study conducted by Landolfi et al. [188] in northern Italy, a total N rate of 160 kg ha⁻¹ applied in three splits (tillering, stem elongation, heading) increased the total protein content by around 1% relative to two splits. In the experiment by Xue et al. [189], the total protein content of grain was 6% higher when N fertilizer was split into three portions (BBCH stages 00, 30, and 47) than two portions (BBCH stages 00 and 30). A meta-analysis conducted by Hu et al. [190] revealed that the protein content of wheat grain was 2–5% higher on average when the total N rate was split into three to four portions. In the work of Mor et al. [159], an N rate of 120 or 160 kg ha⁻¹ increased the protein content of grain by 12% when split in two equal portions (BBCH stages 00 and 21), but by only 4% when split into five equal portions (BBCH stages 00, 21, 31, 39, and 65). In the present study, protein content peaked when winter wheat was supplied with 40 + 100 kg N ha⁻¹ in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively. An increase in the first N rate with a simultaneous decrease in the second N rate (70 + 70 and 100 + 40 kg ha⁻¹) decreased the total protein content of grain by 1–2%. In turn, Schulz et al. [191] found no correlation between split N application and the protein content of grain produced in Germany. The influence of N fertilization on the protein content of wheat grain can be mediated by differences in the availability of soil mineral nitrogen (N_{min}) during the growing season [154].

The concentration of gluten proteins in wheat grain is a very important consideration in the baking industry [13,90,192]. In this study, wet gluten content was positively correlated with grain vitreousness. Winter wheat grain produced in northeastern Poland contained 34.0–38.3% of wet gluten. Similar values were reported by Šip et al. [193] in Czechia, whereas much lower values were noted by Jaskulska et al. [66] and Jańczak-Pieniążek et al. [149] in Poland. In the work of Meena et al. [112], delayed sowing increased the wet gluten content of wheat by 9%p. In the present study, wet gluten content was also highest (35.9%) in late-sown wheat (early October). The analyzed parameter was determined by mean daily temperatures between flowering and harvest, as well as by precipitation and the Sielyaninov index in the milk stage. Late-sown wheat was exposed to more favorable temperatures during flowering and ripening, as well as to higher precipitation and higher values of the Sielyaninov index in the milk stage, which contributed to the accumulation of wet gluten in the flowering and milk stages. An increase in sowing density from 200 to 300 live grains m⁻² decreased wet gluten content by 0.7%p. The negative impact of higher sowing density on wet gluten content was exacerbated by delayed sowing (decrease of 0.8–1.5%p). When winter wheat was sown early, increasing sowing density did not significantly affect the wet gluten content of grain. Zecevic et al. [74] also reported a decrease in the wet gluten content of grain (by 6%p) when sowing density was increased from 500 to 650 live grains m⁻². An increase in sowing density (180 vs. 270 grains m⁻²) also reduced the wet gluten content of wheat grain (by 3–5%p) in the work of Han and Yang [179], Dragoş and Pîrşan [181] (400 vs. 500 live grains m⁻²), and Twizerimana et al. [153] (112 vs. 225 kg ha⁻¹). A reverse correlation was observed by Caglar et al. [73] and Guerrini et al. [11], with the former finding that wet gluten content decreased by 11% when sowing density was reduced from 525 and 625 grains m⁻² to 325 and 425 grains m⁻². Regardless of cultivar (open-pollinated or hybrid cultivars), winter wheat is highly sensitive to N fertilization, which affects both grain yield and grain quality, including the accumulation of gluten proteins [66]. In a study by Jańczak-Pieniążek et al. [149], an increase in the N rate from 110 to 150 kg ha⁻¹ increased the wet gluten content of winter wheat grain by 7–11%p (open-pollinated cultivars) and 10–16%p (hybrid cultivars). Nitrogen fertilization also increased gluten concentration in the grain of winter and spring wheat in the work of Podolska et al. [79], Sułek and Podolska [89], and Dubis [88]. In contrast, Jankowski et al. [13] and Wojtkowiak et al. [194] did not observe any associations between N fertilization and wet gluten content, regardless of cultivar. In the current study, splitting the N fertilizer rate did not induce differences in the wet gluten content of grain. In the work of Mor et al. [159], wet gluten content was lowest when the

total N rate of 120 or 160 kg ha⁻¹ was applied in two equal portions (BBCH stages 00 and 21), and it was 4% higher when the N rate was split into five equal portions (BBCH stages 00, 21, 31, 39, and 65).

The baking quality of wheat is determined by both the quantity and quality of gluten proteins in grain. The sedimentation index is the main predictor of gluten quality, and its value denotes the size of protein aggregates [13,145,195]. Meena et al. [112] found that delayed sowing increased the sedimentation index by 4–5%. In the work of Knapowski and Ralcewicz [78], the sedimentation index was also higher (by 12%) when winter wheat was sown with a delay. In the current experiment, the sedimentation index increased by 1% when winter wheat was sown with a 28-day delay, regardless of weather conditions. In turn, in a study conducted in India, the sedimentation index was 7% lower when wheat was sown with a delay of 40 days [196]. In the present study, sowing density did not affect the sedimentation index, which is consistent with the findings of Piekarczyk [197] and Mikos-Szymańska and Podolska [198]. In the work of Twizerimana et al. [153], sowing density influenced the sedimentation index in only one year of the experiment, when an increase in the seeding rate from 112 to 225 kg ha⁻¹ decreased the sedimentation index by 10%. In turn, Han and Yang [179] and Hao et al. [184] found that the sedimentation index decreased by 2–7% when the seeding rate was increased by 50–90 grains m⁻². The quality of the protein complex in wheat grain is also determined by agricultural inputs, including N fertilization [13]. Litke et al. [199] demonstrated that an increase in the N rate to 210 kg ha⁻¹ led to a significant increase in the sedimentation index. Nitrogen also improved protein quality in the grain of winter and spring wheat in the work of Budzyński et al. [70], Podolska et al. [79], Piekarczyk [197], Ellmann [83], Dubis [88], Rossini et al. [200], Kizilgeci et al. [201], and Zhang et al. [44]. In this study, the split spring N rate of 40 + 100 kg ha⁻¹ applied in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively, also enhanced the quality of grain protein. An increase in the first spring N rate (BBCH stages 22–25) with a simultaneous decrease in the second N rate applied in BBCH stages 30–31 (70 + 70 or 100 + 40 kg ha⁻¹) decreased the sedimentation index by 1% on average. Mor et al. [159] reported that the sedimentation index was 3% higher when the N rate was split into five rather than two portions. In a study by Hao et al. [156], the sedimentation index was 5% higher when the total N rate of 210 kg ha⁻¹ was applied in four rather than two splits.

The falling number denotes the activity of α -amylase in grain [13,85,202]. In the present study, the falling number was positively correlated with the wet gluten content of grain. Flours with a falling number in the range of 250–320 s are most suitable for baking purposes, and this parameter can be decreased through the addition of α -amylase preparations [203]. In the current experiment, the falling number was very high (328–381 s), but it remained within or somewhat above the optimal range of values, not exceeding the level at which grain is unsuitable for breadmaking (<400 s). According to Grausgruber et al. [204], α -amylase activity in grain may vary depending on environmental and genetic factors, particularly weather conditions, during grain ripening. The falling number was also strongly correlated with weather conditions in this study. A sowing delay of 14 days increased the falling number by 3%, which could be attributed to the fact that late-sown plants were exposed to higher mean daily temperatures during flowering and ripening, as well as higher precipitation and higher values of the Sieljaninov index in the milk stage (these parameters were also positively correlated with the falling number). In contrast, the sowing date had no influence on the falling number in the works of Knapowski and Ralcewicz [78] or Forster et al. [142]. Sowing density is bound by a weak and multidirectional relationship with the falling number [142,205,206]. Forster et al. [142] found no correlation between the sowing density of durum wheat and the falling number. Sowing density was not associated with α -amylase activity (falling number) in common wheat grain in the work of Korres and Froud-Williams [205], Piekarczyk [197], and Forster et al. [142], or in this study [Table 3]. In contrast, Hao et al. [184] found that the falling number increased by 5% when sowing density was increased from 200 to 250 grains m⁻². In wheat grain, α -amylase activity is also determined by agricultural inputs, including N fertilization [206]

and genotype [85,149]. In a study by Jańczak-Pieniążek et al. [149], an N rate of 150 kg ha⁻¹ increased the falling number by 0.3–1.6% (open-pollinated cultivar) to 3.5% (hybrid cultivar). Linina and Ruza [206] reported a significant increase in the falling number up to the N rate of 180 kg ha⁻¹. Szentpétery et al. [207] found that split N application had a positive impact on the falling number. In the cited study, the application of 40 or 80 kg N ha⁻¹ in the tillering stage and 40 kg N ha⁻¹ in the flowering stage increased the falling number by 6–11% relative to the treatment where a single N rate of 80 or 120 kg ha⁻¹ was applied in the tillering stage. According to Budzyński et al. [70], the absence of positive correlations between agricultural inputs and the falling number in many published studies can be attributed to unfavorable weather conditions [88,185,208–210]. In the present study, split N application did not induce significant differences in the falling number.

5. Conclusions

The present study demonstrated that the milling quality of winter wheat grain produced in northeastern Poland on Haplic Luvisol originating from boulder clay was significantly influenced by weather conditions, sowing strategies, and N fertilization. The sowing date affected the beginning and duration of phenological growth stages, which were characterized by different mean daily temperatures and precipitation. Grain uniformity and grain hardness were positively correlated with the mean daily temperature from the beginning of flowering until harvest, while grain vitreousness was positively correlated with the mean daily temperature in the dough stage. The total protein content of grain was positively correlated with GDD, precipitation, and the Sielyaninov index between flowering and harvest. Wet gluten content and the falling number were positively correlated with the mean daily temperature between flowering and harvest, as well as with precipitation and the Sielyaninov index in the milk stage. In general, delayed sowing exposed wheat plants to more favorable weather conditions during flowering and grain ripening, which increased the bulk density, vitreousness and hardness of grain, the flour extraction rate, the total protein content and wet gluten content of grain, the sedimentation index, and the falling number. The sowing density of 200 grains m⁻² enhanced grain uniformity, grain vitreousness, total protein content, and wet gluten content. Higher N supply in the stem elongation stage (BBCH stages 30–31) had a positive influence on grain vitreousness and hardness, the flour extraction rate, the total protein content and wet gluten content of grain, and the sedimentation index. These results indicate that the milling quality of winter wheat grain produced in northeastern Poland can be improved by sowing in late September or early October at 200 grains m⁻² and by applying N fertilizer at 40 and 100 kg ha⁻¹ in BBCH stages 22–25 and 30–31, respectively.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/agriculture14040552/s1>, Table S1. F-test statistics in ANOVA; Table S2. Pearson's correlation coefficients denoting the relationship between wheat grain parameters.

Author Contributions: Conceptualization, K.L. and K.J.J.; methodology, K.L. and K.J.J.; software, K.L.; validation, K.L.; formal analysis, K.L.; investigation, K.L.; resources, K.L.; data curation, K.L.; writing—original draft preparation, K.L.; writing—review and editing, K.L. and K.J.J.; visualization, K.L.; supervision, K.J.J.; project administration, K.L. and K.J.J.; funding acquisition, K.J.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The results presented in this paper were obtained as part of a comprehensive study financed by the University of Warmia and Mazury in Olsztyn (grant No. 30.610.013–110). Funded by the Minister of Science under the “Regional Initiative of Excellence Program”.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Acknowledgments: We would like to thank the staff of the AES in Balcyny for technical support during the experiment.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

- Breiman, A.; Graur, D. Wheat evolution. *Isr. J. Plant Sci.* **1995**, *43*, 85–98. [CrossRef]
- Braun, H.J.; Atlin, G.; Payne, T.; Reynolds, M.P. Multi-location testing as a tool to identify plant response to global climate change. In *Climate Change and Crop Production*; Reynolds, M.P., Ed.; CABI: Wallingford, UK, 2010; pp. 115–138.
- Riaz, M.W.; Yang, L.; Yousaf, M.I.; Sami, A.; Mei, X.D.; Shah, L.; Rehman, S.; Xue, L.; Si, H.; Ma, C. Effects of heat stress on growth, physiology of plants, yield and grain quality of different spring wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Sustainability* **2021**, *13*, 2972. [CrossRef]
- Khalid, A.; Hameed, A.; Tahir, M.F. Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Front. Nutr.* **2023**, *10*, 1053196. [CrossRef]
- Budzyński, W.S.; Bepirszcz, K.; Jankowski, K.J.; Dubis, B.; Hłasko-Nasalska, A.; Sokółski, M.M.; Olszewski, J.; Załuski, D. The responses of winter cultivars of common wheat, durum wheat and spelt to agronomic factors. *J. Agric. Sci.* **2018**, *156*, 1163–1174. [CrossRef]
- Zubko, V.; Sirenko, V.; Kuzina, T.; Onychko, V.; Sokolik, S.; Roubik, H.; Koszel, M.; Shchur, T. Modelling wheat grain flow during sowing based on the model of grain with shifted center of gravity. *Agric. Eng.* **2022**, *26*, 25–37. [CrossRef]
- Faostat, Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. 2023. Available online: <http://www.apps.fao.org/faostat/en/#home> (accessed on 19 February 2024).
- Mitura, K.; Cacak-Pietrzak, G.; Feledyn-Szewczyk, B.; Szablewski, T.; Studnicki, M. Yield and grain quality of common wheat (*Triticum aestivum* L.) depending on the different farming systems (organic vs. integrated vs. conventional). *Plants* **2023**, *12*, 1022. [CrossRef]
- Shewry, P.R. Wheat. *J. Exp. Bot.* **2009**, *60*, 1537–1553. [CrossRef] [PubMed]
- Budzyński, W. Common wheat. In *Wheats—Common, Spelt, Durum. Cultivation and Uses*; Budzyński, W., Ed.; PWRiL: Poznań, Poland, 2012; pp. 23–150. (In Polish)
- Guerrini, L.; Napoli, M.; Mancini, M.; Masella, P.; Cappelli, A.; Parenti, A.; Orlandini, S. Wheat grain composition, dough rheology and bread quality as affected by nitrogen and sulfur fertilization and seeding density. *Agronomy* **2020**, *10*, 233. [CrossRef]
- Dilmurodovich, D.S.; Bekmurodovich, B.N.; Shakirjonovich, K.N. Creation of new drought-resistant, high-yielding and high-quality varieties of bread wheat for rainfed areas. *Br. J. Glob. Ecol. Sustain. Dev.* **2022**, *2*, 61–73.
- Jankowski, K.J.; Kijewski, L.; Dubis, B. Milling quality and flour strength of the grain of winter wheat grown in monoculture. *Rom. Agric. Res.* **2015**, *32*, 191–200.
- Stepniewska, S. Milling value of grain of selected wheat cultivars from crop years 2012–2014. *Acta Agrophysica* **2016**, *23*, 105–117. (In Polish)
- Szafańska, A.; Rothkaehl, J. The falling number and the maximum viscosity of wheat flour starch. *Przegląd Zbożowo-Młynarski* **2011**, *10*, 6–7. (In Polish)
- Jurga, R. Evaluation of the milling yield of wheat grain based on ash content and flour color. *Przegląd Zbożowo-Młynarski* **2006**, *50*, 19–21. (In Polish)
- Guzmán, C.; Ibba, M.I.; Álvarez, J.B.; Sissons, M.; Morris, C. Wheat quality. In *Wheat Improvement: Food Security in a Changing Climate*; Reynolds, M.P., Braun, H., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022; pp. 177–193.
- Wang, K.; Taylor, D.; Ruan, Y.; Pozniak, C.J.; Izydorczyk, M.; Fu, B.X. Unveiling the factors affecting milling quality of durum wheat: Influence of kernel physical properties, grain morphology and intrinsic milling behaviours. *J. Cereal Sci.* **2023**, *113*, 103755. [CrossRef]
- Dziki, D. The latest innovations in wheat flour milling: A review. *Agric. Eng.* **2023**, *27*, 147–162. [CrossRef]
- Edwards, M.A. Morphological Features of Wheat Grain and Genotype Affecting Flour Yield. Ph.D. Thesis, Southern Cross University, East Lismore, NSW, Australia, 2010; pp. 1–203.
- Hrušková, M.; Švec, I. Wheat hardness in relation to other quality factors. *Czech J. Food Sci.* **2009**, *27*, 240–248. [CrossRef]
- Lafiandra, D.; Sestili, F.; Sissons, M.; Kiszona, A.; Morris, C.F. Increasing the versatility of durum wheat through modifications of protein and starch composition and grain hardness. *Foods* **2022**, *11*, 1532. [CrossRef] [PubMed]
- Ma, Q.; Wang, M.; Zheng, G.; Yao, Y.; Tao, R.; Zhu, M.; Ding, J.; Li, C.; Guo, W.; Zhu, X. Twice-split application of controlled-release nitrogen fertilizer met the nitrogen demand of winter wheat. *Field Crops Res.* **2021**, *267*, 108163. [CrossRef]
- Mastanjević, K.; Habschied, K.; Dvojković, K.; Karakašić, M.; Glavaš, H. Vitreosity as a major grain quality indicator—Upgrading the grain-cutter method with a new blade. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 2655. [CrossRef]
- Rachoń, L.; Szumiło, G.; Czubacka, M. Evaluation of grain glassiness of selected varieties and species of wheat. *Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska. Sect. E. Agric.* **2012**, *67*, 17–23. (In Polish)
- Sadkiewicz, J. Grain vitreousness—An important parameter in wheat quality evaluation. *Przegląd Zbożowo-Młynarski* **1998**, *7*, 18–19. (In Polish)
- Zhygunov, D.; Sots, S.; Barkovska, Y.; Liu, J.; Wang, F.; Liu, X.; Wang, Z.; Li, X. Influence of grain quality indicators on the flour quality indicators at the laboratory milling. *Grain Prod. Mix. Fodder's* **2022**, *22*, 17–29. [CrossRef]
- Carson, G.R.; Edwards, N.M. Criteria of wheat and flour quality. In *Book Wheat: Chemistry and Technology*, 4th ed.; Khan, K., Shewry, P.R., Eds.; AACC International: St. Paul, MN, USA, 2009; pp. 97–118.

29. Rozbicki, J.; Ceglińska, A.; Gozdowski, D.; Jakubczak, M.; Cacak-Pietrzak, G.; Mądry, W.; Golba, J.; Piechociński, M.; Sobczyński, G.; Studnicki, M.; et al. Influence of the cultivar, environment and management on the grain yield and bread-making quality in winter wheat. *J. Cereal Sci.* **2015**, *61*, 126–132. [\[CrossRef\]](#)
30. Guzmán, C.; Peña, R.J.; Singh, R.; Autrique, E.; Dreisigacker, S.; Crossa, J.; Rutkoski, J.; Poland, J.; Battenfield, S. Wheat quality improvement at CIMMYT and the use of genomic selection on it. *Appl. Transl. Genom.* **2016**, *11*, 3–8. [\[CrossRef\]](#)
31. Jarecki, W.; Bobrecka-Jamro, D.; Buczek, J.; Jańczak-Pieniążek, M. Effect of high nitrogen doses on yield, quality and chemical composition grain of winter wheat cultivars. *J. Elem.* **2020**, *25*, 1005–1017. [\[CrossRef\]](#)
32. Petingco, M.C.; Casada, M.E.; Maghirang, R.G.; Thompson, S.A.; Turner, A.P.; McNeill, S.G.; Montross, M. Discrete element method simulation of wheat bulk density as affected by grain drop height and kernel size distribution. *J. ASABE* **2022**, *65*, 555–566. [\[CrossRef\]](#)
33. Rothkaehl, J. Wheat grain for human consumption—Marketing and processing. In *Wheats—Common, Spelt, Durum. Cultivation and Uses*; Budzyński, W., Ed.; PWRiL: Poznań, Poland, 2012; pp. 235–264. (In Polish)
34. Dunăreanu, I.C.; Bonea, D. Grain yield and hectolitre weight of some wheat cultivars in organic and conventional production systems. *Rom. Agric. Res.* **2022**, *39*, 229–237. [\[CrossRef\]](#)
35. Manda, V.; Marinciu, C.M.; Șerban, G.; Ciontu, C.; Săulescu, N.N. Genetic and environmental effects on grain size uniformity in winter wheat. *Rom. Agric. Res.* **2022**, *39*, 133–138. [\[CrossRef\]](#)
36. Li, J.; Liu, X.; Yang, X.; Li, Y.; Wang, C.; He, D. Proteomic analysis of the impacts of powdery mildew on wheat grain. *Food Chem.* **2018**, *261*, 30–35. [\[CrossRef\]](#)
37. Kumar, A.; Nayak, R.; Purohit, S.R.; Rao, P.S. Impact of UV-C irradiation on solubility of Osborne protein fractions in wheat flour. *Food Hydrocoll.* **2021**, *110*, 105845. [\[CrossRef\]](#)
38. Wieser, H.; Kieffer, R. Correlations of the amount of gluten protein types to the technological properties of wheat flours determined on a micro-scale. *J. Cereal Sci.* **2001**, *34*, 19–27. [\[CrossRef\]](#)
39. Zhang, P.; He, Z.; Chen, D.; Zhanga, Y.; Larroquee, O.R.; Xia, X. Contribution of common wheat protein fractions to dough properties and quality of northern-style Chinese steamed bread. *J. Cereal Sci.* **2007**, *46*, 1–10. [\[CrossRef\]](#)
40. Li, Y.Q.; Zhu, R.J.; Tian, J.C. Influence of wheat protein contents and fractions on dough rheological properties as determined by using a reconstitution method. *Agric. Sci. China* **2008**, *7*, 395–404. [\[CrossRef\]](#)
41. Li, M.; Yue, Q.; Liu, C.; Zheng, X.; Hong, J.; Wang, N.; Bian, K. Interaction between gliadin/glutenin and starch granules in dough during mixing. *LWT* **2021**, *148*, 111624. [\[CrossRef\]](#)
42. Wieser, H. Chemistry of gluten proteins. *Food Microbiol.* **2007**, *24*, 115–119. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
43. Dizlek, H.; Girard, A.L.; Awika, J.M. High protein and gliadin content improves tortilla quality of a weak gluten wheat. *LWT* **2022**, *160*, 113320. [\[CrossRef\]](#)
44. Zhang, Y.; Xu, M.; Zhang, X.; Hu, Y.; Luan, G. Application of zein in gluten-free foods: A comprehensive review. *Food Res. Int.* **2022**, *160*, 111722. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
45. Simón, M.R.; Fleitas, M.C.; Castro, A.C.; Schierenbeck, M. How foliar fungal diseases affect nitrogen dynamics, milling, and end-use quality of wheat. *Front. Plant Sci.* **2020**, *11*, 1568. [\[CrossRef\]](#)
46. Lakić-Karalić, N.; Vasilisin, L.; Vučić, G. Relationship between the test weight and some physical and chemical properties of the wheat kernel. *Agro-Know. J.* **2021**, *22*, 137–148. [\[CrossRef\]](#)
47. Tian, S.; Zhang, M.; Li, J.; Wen, S.; Bi, C.; Zhao, H.; Wei, C.; Chen, Z.; Yu, J.; Shi, X.; et al. Identification and validation of stable quantitative trait loci for sds-sedimentation volume in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Front. Plant Sci.* **2021**, *12*, 747775. [\[CrossRef\]](#)
48. He, Z.H.; Liu, L.; Xia, X.C.; Liu, J.J.; Peña, R.J. Composition of HMW and LMW glutenin subunits and their effects on dough properties, pan bread, and noodle quality of Chinese bread wheats. *Cereal Chem.* **2005**, *82*, 345–350. [\[CrossRef\]](#)
49. Kała, M.; Przyborowski, M.; Ługowska, B.; Gasparis, S.; Nadolska-Orczyk, A. Characteristics of gluten proteins in breeding lines of wheat. *Biul. IHAR* **2017**, *282*, 41–49. (In Polish)
50. Buczek, J.; Jarecki, W.; Bobrecka-Jamro, D. The response of population and hybrid wheat to selected agro-environmental factors. *Plant Soil Environ.* **2016**, *62*, 67–73. [\[CrossRef\]](#)
51. Wang, Y.; Shewry, P.R.; Hawkesford, M.J.; Qi, P.; Wan, Y. High molecular weight glutenin subunit (HMW-GS) 1Dx5 is concentrated in small protein bodies when overexpressed in wheat starchy endosperm. *J. Cereal Sci.* **2021**, *101*, 103291. [\[CrossRef\]](#)
52. Bo, C.; Fan, Z.; Ma, X.; Li, A.; Wang, H.; Kong, L.; Wang, X. Identification and introgression of a novel HMW-GS gene from *Aegilops tauschii*. *Agronomy* **2022**, *12*, 2709. [\[CrossRef\]](#)
53. Yan, W.; Guo, Z.; Chen, Q.; Li, Y.; Zhao, K.; Wan, Y.-F.; Hawkesford, M.J.; Jiang, Y.-F.; Kong, L.; Pu, Z.-E.; et al. Effect of high-molecular-weight glutenin subunit Dy10 on wheat dough properties and end-use quality. *J. Integr. Agric.* **2023**, *22*, 1609–1617.
54. Veraverbeke, W.S.; Delcour, J.A. Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2002**, *42*, 179–208. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
55. Konopka, I.; Fornal, Ł.; Dziuba, M.; Czaplicki, S.; Nałęcz, D. Composition of proteins in wheat grain streams obtained by sieve classification. *J. Sci. Food Agric.* **2007**, *87*, 2198–2206. [\[CrossRef\]](#)
56. Feng, Y.; Zhang, H.; Wang, J.; Chen, H. Dynamic changes in glutenin macropolymer during different dough mixing and resting processes. *Molecules* **2021**, *26*, 541. [\[CrossRef\]](#)

57. Sjöberg, S.M.; Carter, A.H.; Steber, C.M.; Garland, K.A. Application of the factor analytic model to assess wheat falling number performance and stability in multi-environment trials. *Crops Sci.* **2021**, *61*, 372–382. [\[CrossRef\]](#)
58. Rothkaehl, J. The quality of wheat grain harvested in 2014 in Poland. *Przegląd Piek. I Cukier.* **2015**, *5*, 10–14. (In Polish)
59. Hu, Y.; Sjöberg, S.M.; Chen, C.; Hauvermale, A.L.; Morris, C.F.; Delwiche, S.R.; Cannon, A.E.; Steber, C.; Zhang, Z. As the number falls, alternatives to the Hagberg–Perten falling number method: A review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2022**, *21*, 2105–2117. [\[CrossRef\]](#)
60. Buczek, J.; Jarecki, W.; Jańczak-Pieniążek, M.; Bobrecka-Jamro, D. Hybrid wheat yield and quality related to cultivation intensity and weather condition. *J. Elem.* **2020**, *25*, 71–83. [\[CrossRef\]](#)
61. Fu, S.; Liu, X.M.; Ma, Y.; Li, H.; Zhen, Y.M.; Zhang, Z.X.; Wang, Y.Q.; Men, M.X.; Peng, Z.P. Effects of nitrogen supply forms on the quality and yield of strong and medium gluten wheat cultivars. *J. Plant Nutri. Fertil.* **2022**, *28*, 83–93.
62. Lou, H.; Zhang, R.; Liu, Y.; Guo, D.; Zhai, S.; Chen, A.; Zhang, Y.; Xie, C.; You, M.; Peng, H.; et al. Genome-wide association study of six quality-related traits in common wheat (*Triticum aestivum* L.) under two sowing conditions. *Theor. Appl. Genet.* **2021**, *134*, 399–418. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
63. Jańczak-Pieniążek, M.; Buczek, J.; Kwiatkowski, C.A.; Harasim, E. The course of physiological processes, yielding, and grain quality of hybrid and population wheat as affected by integrated and conventional cropping systems. *Agronomy* **2022**, *12*, 1345. [\[CrossRef\]](#)
64. Dupont, F.M.; Hurkman, W.J.; Vensel, W.H.; Tanaka, C.; Kothari, K.M.; Chung, O.K.; Altenbach, S. Protein accumulation and composition in wheat grains: Effects of mineral nutrients and high temperature. *Eur. J. Agron.* **2006**, *25*, 96–107. [\[CrossRef\]](#)
65. Ereku, O.; Köhn, W. Effect of weather and soil conditions on yield components and bread-making quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and winter triticale (*Triticosecale Wittm.*) varieties in North-East Germany. *J. Agron. Crop Sci.* **2006**, *192*, 452–464. [\[CrossRef\]](#)
66. Jaskulska, I.; Jaskulski, D.; Gałęzewski, L.; Knapowski, T.; Kozera, W.; Waclawowicz, R. Mineral composition and baking value of the winter wheat grain under varied environmental and agronomic conditions. *J. Chem.* **2018**, *2018*, 5013825. [\[CrossRef\]](#)
67. Woźniak, A.; Rachoń, L. Effect of tillage systems on the yield and quality of winter wheat grain and soil properties. *Agriculture* **2020**, *10*, 405. [\[CrossRef\]](#)
68. Buczek, J.; Migut, D.; Jańczak-Pieniążek, M. Effect of soil tillage practice on photosynthesis, grain yield and quality of hybrid winter wheat. *Agriculture* **2021**, *11*, 479. [\[CrossRef\]](#)
69. Djouadi, K.; Mekliche, A.; Dahmani, S.; Ladjari, N.I.; Abid, Y.; Silarbi, Z.; Hamadache, A.; Pisante, M. Durum wheat yield and grain quality in early transition from conventional to conservation tillage in semi-arid mediterranean conditions. *Agriculture* **2021**, *11*, 711. [\[CrossRef\]](#)
70. Budzyński, W.; Borysewicz, J.; Bielski, S. The effects of nitrogen level on yield and technological parameters of winter wheat grain. *Pam. Puł.* **2004**, *135*, 33–34. (In Polish)
71. Stankowski, S.; Smagacz, J.; Hury, G.; Ułasik, S. Effect of nitrogen fertilization intensity on grain and flour quality of winter wheat cultivars. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2008**, *7*, 105–114. (In Polish)
72. Muste, S.; Modoran, C.; Man, S.; Muresan, V.; Birou, A. The influence of wheat genotype on its quality. *J. Agroaliment. Proc. Technol.* **2010**, *16*, 99–103.
73. Caglar, O.; Bulut, S.; Karaoglu, M.M.; Kotancilar, H.G.; Ozturk, A. Quality response of facultative wheat to winter sowing, freezing sowing and spring sowing at different seeding rates. *J. Anim. Vet. Adv.* **2011**, *10*, 3368–3374. [\[CrossRef\]](#)
74. Zecevic, V.; Boskovic, J.; Knezevic, D.; Micanovic, D. Effect of seeding rate on grain quality of winter wheat. *Chil. J. Agric. Res.* **2014**, *74*, 23–28. [\[CrossRef\]](#)
75. Jankowski, K.J.; Budzyński, W.S.; Kijewski, L.; Dubis, D.; Lemański, M. Flour quality, the rheological properties of dough and the quality of bread made from the grain of winter wheat grown in a continuous cropping system. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2014**, *13*, 3–18.
76. Khan, M.A.; Basir, A.; Fahad, S.; Adnan, M.; Saleem, M.H.; Iqbal, A.; Amanullah; Al-Huqail, A.A.; Alosaimi, A.A.; Saud, S.; et al. Biochar optimizes wheat quality, yield, and nitrogen acquisition in low fertile calcareous soil treated with organic and mineral nitrogen fertilizers. *Front. Plant Sci.* **2022**, *13*, 879788. [\[CrossRef\]](#)
77. Tomaz, A.; Palma, J.F.; Ramos, T.; Costa, M.N.; Rosa, E.; Santos, M.; Boteta, L.; Dores, J.; Patanita, M. Yield, technological quality and water footprints of wheat under Mediterranean climate conditions: A field experiment to evaluate the effects of irrigation and nitrogen fertilization strategies. *Agric. Water Manag.* **2021**, *258*, 107214. [\[CrossRef\]](#)
78. Knapowski, T.; Ralcewicz, M. Estimation of the quality features of winter wheat corn and flour in the relation to diversification nitrogen fertilization. *Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska. Sect. E Agric.* **2004**, *59*, 959–968. (In Polish)
79. Podolsk, G.; Stankowski, S.; Dworakowski, T. The effect of nitrogen fertilization on yielding and technological value of winter wheat cultivars. *Fragm. Agron.* **2007**, *24*, 274–282. (In Polish)
80. Budzyński, W.; Bielski, S. Influence of nitrogen fertilization on technological quality of winter wheat grain. *Fragm. Agron.* **2008**, *25*, 27–38. (In Polish)
81. Reznick, J.P.K.; Barth, G.; Kaschuk, G.; Pauletti, V. Nitrogen and cultivars as field strategies to improve the nutritional status of wheat grain and flour. *J. Cereal Sci.* **2021**, *102*, 103290. [\[CrossRef\]](#)
82. Narkiewicz-Jodko, M.; Gil, Z.; Wojciechowski, W.; Zmijewski, M. Health and quality of grain spring wheat in relations to stubble crops and nitrogen fertilization. *Fragm. Agron.* **2008**, *25*, 251–260. (In Polish)

83. Ellmann, T. Effect of plant protection, nitrogen fertilization and date of harvest on yield of winter wheat. *Fragm. Agron.* **2011**, *28*, 15–25. (In Polish)
84. Sissons, M.; Egan, N.; Simpfendorfer, S. Effect of nitrogen fertilization and inoculation of durum wheat with fusarium pseudograminearum on yield, technological quality and gluten protein composition. *Agronomy* **2023**, *13*, 1658. [\[CrossRef\]](#)
85. Kindred, D.R.; Gooding, M.J.; Ellis, R.H. Nitrogen fertilizer and seed rate effects on Hagberg falling number of hybrid wheats and their parents are associated with α -amylase activity, grain cavity size and dormancy. *J. Sci. Food Agric.* **2005**, *85*, 727–742. [\[CrossRef\]](#)
86. Dargie, S.; Wogi, L.; Kidanu, S. Nitrogen use efficiency, yield, and yield traits of wheat response to slow-releasing N fertilizer under balanced fertilization in Vertisols and Cambisols of Tigray, Ethiopia. *Cogent Environ. Sci.* **2020**, *6*, 1778996. [\[CrossRef\]](#)
87. Shi, R.; Zhang, Y.; Chen, X.; Sun, Q.; Zhang, F.; Römheld, V.; Zou, C. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Cereal Sci.* **2010**, *51*, 165–170. [\[CrossRef\]](#)
88. Dubis, B. Agricultural, energy and economic analysis of spring wheat production for human consumption. In *Dissertations and Monographs*; Publishing House of the University of Warmia and Mazury: Olsztyn, Poland, 2012; Volume 171, p. 130. (In Polish)
89. Sulek, A.; Podolska, G. Grain yield and technological quality value of spring wheat cv. Nawra depending on nitrogen fertilization doses and time of its application. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2008**, *7*, 103–110. (In Polish)
90. Wieser, H.; Koehler, P.; Scherf, K.A. Chemistry of wheat gluten proteins: Quantitative composition. *Cereal Chem.* **2023**, *100*, 36–55. [\[CrossRef\]](#)
91. Stepień, A.; Wojtkowiak, K. Composition of gluten proteins in spring and winter wheat grain cultivated under conditions of varied fertilization. *Acta Agric. Scand. Sect. B—Soil Plant Sci.* **2013**, *63*, 588–594. [\[CrossRef\]](#)
92. Tóth, B.; Bilon, A.; Labuschagne, M. Influence of low soil nitrogen and phosphorus on gluten polymeric and monomeric protein distribution in two high quality spring wheat cultivars. *J. Cereal Sci.* **2020**, *92*, 102867. [\[CrossRef\]](#)
93. Horvat, D.; Šimić, G.; Dvojković, K.; Ivić, M.; Plavšin, I.; Novoselović, D. Gluten protein compositional changes in response to nitrogen application rate. *Agronomy* **2021**, *11*, 325. [\[CrossRef\]](#)
94. Keres, I.; Alaru, M.; Koppel, R.; Altosaar, I.; Tosens, T.; Loit, E. The combined effect of nitrogen treatment and weather conditions on wheat protein-starch interaction and dough quality. *Agriculture* **2021**, *11*, 1232. [\[CrossRef\]](#)
95. Vetch, J.M.; Stougaard, R.N.; Martin, J.M.; Giroux, M.J. Revealing the genetic mechanisms of pre-harvest sprouting in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Sci.* **2019**, *281*, 180–185. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
96. Singh, C.; Kamble, U.; Gupta, V.; Singh, G.; Sheoran, S.; Gupta, A.; Tyagi, B.S.; Kumar, P.; Mishra, C.N.; Krishannapa, G.; et al. Pre-harvest sprouting in wheat: Current status and future prospects. *J. Cereal Res.* **2021**, *13*, 1–22. [\[CrossRef\]](#)
97. Tai, L.; Wang, H.J.; Xu, X.J.; Sun, W.H.; Ju, L.; Liu, W.T.; Li, W.Q.; Sun, J.; Chen, K.M. Pre-harvest sprouting in cereals: Genetic and biochemical mechanisms. *J. Exp. Bot.* **2021**, *72*, 2857–2876. [\[CrossRef\]](#)
98. Chang, C.; Zhang, H.; Lu, J.; Si, H.; Ma, C. Genetic improvement of wheat with pre-harvest sprouting resistance in China. *Genes* **2023**, *14*, 837. [\[CrossRef\]](#)
99. Penning, B.W. Gene expression differences related to pre-harvest sprouting uncovered in related wheat varieties by RNAseq analysis. *Plant Gene* **2023**, *33*, 100404. [\[CrossRef\]](#)
100. Geisslitz, S.; Longin, C.F.H.; Scherf, K.A.; Koehler, P. Comparative study on gluten protein composition of ancient (Einkorn, Emmer and Spelt) and modern wheat species (durum and common wheat). *Foods* **2019**, *8*, 409. [\[CrossRef\]](#)
101. Kubar, M.; Feng, M.; Sayed, S.; Shar, A.; Rind, N.; Ullah, H.; Kalhor, S.; Xie, Y.; Yang, C.; Yang, W.; et al. Agronomical traits associated with yield and yield components of winter wheat as affected by nitrogen managements. *Saudi J. Biol. Sci.* **2021**, *28*, 4852–4858. [\[CrossRef\]](#)
102. Meier, U. *Growth Stages of Mono- and Dicotyledonous Plants: BBCH Monograph*; Julius Kühn-Institut: Quedlinburg, Germany, 2018. Available online: <https://www.julius-kuehn.de/media/Veroeffentlichungen/bbch%20epaper%20en/page.pdf> (accessed on 10 January 2024).
103. Majewska, K. Basis of classification and synthesis of wheat grain gluten proteins. *Żywn. Nauka Technol. Jakość* **1999**, *6*, 15–25. (In Polish)
104. Podolska, G. Effect of nitrogen fertilization doses and way of its application on yield and technological quality of winter wheat cultivars grain. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2008**, *7*, 57–65. (In Polish)
105. Ding, J.; Li, F.; Xu, D.; Wu, P.; Zhu, M.; Li, C.; Zhu, X.; Chen, Y.; Guo, W. Tillage and nitrogen managements increased wheat yield through promoting vigor growth and production of tillers. *Agron. J.* **2021**, *113*, 1640–1652. [\[CrossRef\]](#)
106. Sieling, K.; Kage, H. Apparent fertilizer N recovery and the relationship between grain yield and grain protein concentration of different winter wheat varieties in a long-term field trial. *Eur. J. Agron.* **2021**, *124*, 126246. [\[CrossRef\]](#)
107. Derebe, B.; Bitew, Y.; Asargew, F.; Chakelie, G. Optimizing time and split application of nitrogen fertilizer to harness grain yield and quality of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) in northwestern Ethiopia. *PLoS ONE* **2022**, *17*, e0279193. [\[CrossRef\]](#)
108. Zende, N.B.; Sethi, H.N.; Karunakar, A.P.; Jiotode, D.J. Effect of sowing time and fertility levels on yield and quality of durum wheat genotypes. *Res. Crops* **2005**, *6*, 194–196.
109. Tyagi, P.K.; Pannu, R.K.; Sharma, K.D.; Chaudhary, B.D.; Singh, D.P. Response of different cultivars to terminal heat stress. *T. Agrochem. Cult.* **2003**, *24*, 20–21.
110. Asseng, S.; Jameison, P.D.; Kimball, B.; Pinter, P.; Sayre, K.; Bowden, J.W.; Howden, S.M. Simulated wheat growth affected by rising temperature increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Res.* **2004**, *85*, 85–102. [\[CrossRef\]](#)

111. Kaur, A.; Pannu, R.K.; Buttar, G.S. Quality of wheat (*T. aestivum*) as influenced by sowing dates and nitrogen scheduling. *Indian J. Agric. Sci.* **2010**, *80*, 781–785.
112. Meena, R.K.; Parihar, S.S.; Singh, M.; Khanna, M. Effects of sowing dates and irrigation regimes on grain quality of wheat grown under semi-arid condition of India. *J. Appl. Nat. Sci.* **2016**, *8*, 960–966. [\[CrossRef\]](#)
113. Shalaby, N.E.; Abdelkhalik, S.A.; Gad, K.I.; Elsamahy, B.E. Effect of sowing date on grain yield and quality of some Egyptian bread wheat genotypes. *Egypt. J. Agric. Res.* **2023**, *101*, 643–652. [\[CrossRef\]](#)
114. Singh, N.; Viridi, A.S.; Katyal, M.; Kaur, A.; Kaur, D.; Ahlawat, A.K.; Singh, A.M.; Sharma, R.K. Evaluation of heat stress through delayed sowing on physicochemical and functional characteristics of grains, whole meals and flours of India wheat. *Food Chem.* **2021**, *344*, 128725. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
115. Gooding, M.J.; Elli, R.H.; Shewr, P.R.; Schofield, J.D. Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *J. Cereal Sci.* **2003**, *37*, 295–309. [\[CrossRef\]](#)
116. Motzo, R.; Fois, S.; Giunta, F. Protein content and gluten quality of durum wheat as affected sowing date. *J. Sci. Food Agric.* **2007**, *87*, 1480–1488. [\[CrossRef\]](#)
117. Farooq, M.; Bramley, H.; Palta, J.A.; Siddique, K.H.M. Heat stress in wheat during reproductive and grain filling phases. *Crit. Rev. Plant Sci.* **2011**, *30*, 491–507. [\[CrossRef\]](#)
118. Singh, S.; Gupta, A.K.; Kaur, N. Influence of drought and sowing time on protein composition, antinutrients, and mineral contents of wheat. *Sci. World J.* **2012**, *2012*, 485751. [\[CrossRef\]](#)
119. Mahdavi, S.; Arzani, A.; Maibody, S.M.; Kadivar, M. Grain and flour quality of wheat genotypes grown under heat stress. *Saudi J. Biol. Sci.* **2022**, *29*, 103417. [\[CrossRef\]](#)
120. Zahra, N.; Hafeez, M.B.; Wahid, A.; Al Masruri, M.H.; Ullah, A.; Siddique, K.H.; Farooq, M. Impact of climate change on wheat grain composition and quality. *J. Sci. Food Agric.* **2023**, *103*, 2745–2751. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
121. Geleta, B.; Atak, M.; Baenziger, P.S.; Nelson, L.A.; Baltenesperger, D.D.; Eskridge, K.M.; Shipman, M.J.; Shelton, D.R. Seeding rate and genotype effect on agronomic performance and end use quality of winter wheat. *Crop Sci.* **2002**, *42*, 827–832.
122. Soofizada, Q.; Pescatore, A.; Guerrini, L.; Fabbri, C.; Mancini, M.; Orlandini, S.; Napoli, M. Effects of nitrogen plus sulfur fertilization and seeding density on yield, rheological parameters, and asparagine content in old varieties of common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy* **2022**, *12*, 351. [\[CrossRef\]](#)
123. Sun, Y.; Yang, W.; Wu, Y.; Cui, Y.; Dong, Y.; Dong, Z.; Hai, J. The effects of different sowing density and nitrogen topdressing on wheat were investigated under the cultivation mode of hole sowing. *Agronomy* **2023**, *13*, 1733. [\[CrossRef\]](#)
124. Lachutta, K.; Jankowski, K.J. An agronomic efficiency analysis of winter wheat at different sowing strategies and nitrogen fertilizer rates. A case study in north-eastern Poland. *Agriculture* **2024**, *14*, 442. [\[CrossRef\]](#)
125. PN R-74110:1998; Barley—Test Methods. Polish Committee for Standardization: Warszawa, Poland, 1998. (In Polish)
126. PN-EN ISO 7971-3:2019-03; Cereals. Determination of Bulk Density, Called Mass per Hectolitre. Part 3: Routine Method. Polish Committee for Standardization: Warszawa, Poland, 2019. (In Polish)
127. PN R-74008:1970; Cereal Grain. Determination of Glassiness of Grains. Polish Committee for Standardization: Warszawa, Poland, 1970. (In Polish)
128. PN-EN ISO 21415-2:2015-12E; Wheat and Wheat Flour. Gluten Content. Part 2: Determination of Wet Gluten and Gluten Index by Mechanical Means. Polish Committee for Standardization: Warszawa, Poland, 2015. (In Polish)
129. PN-EN ISO 5529:2010; Wheat—Determination of the Sedimentation Index—Zeleny Test. Polish Committee for Standardization: Warszawa, Poland, 2010. (In Polish)
130. Hagberg, S. A rapid method for determining alpha-amylase activity. *Cereal Chem.* **1961**, *37*, 218–222.
131. Hagberg, S. Note on a simplified rapid method for determining alpha-amylase activity. *Cereal Chem.* **1960**, *38*, 202–203.
132. PN-EN ISO 3093:2010; Wheat, Rye and Respective Flours, Durum Wheat and Durum Wheat Semolina—Determination of the Falling Number According to Hagberg-Perten. Polish Committee for Standardization: Warszawa, Poland, 2010. (In Polish)
133. Molga, M. *Agricultural Meteorology*; PWRiL: Warszawa, Poland, 1958; pp. 550–556. (In Polish)
134. Bojanowski, J.S.; Sikora, S.; Musiał, J.P.; Woźniak, E.; Dąbrowska-Zielińska, K.; Slesiński, P.; Milewski, T.; Łączyński, A. Integration of Sentinel-3 and MODIS vegetation indices with ERA-5 agro-meteorological indicators for operational crop yield forecasting. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 1238. [\[CrossRef\]](#)
135. *Statistica (Data Analysis Software System)*, version 13; TIBCO Software Inc.: Palo Alto, CA, USA, 2017.
136. Buczek, J.; Bobrecka-Jamro, D. Assessment of qualitative parameters of population and hybrid wheat grain depending on the production technology. *Acta Agrophys.* **2015**, *22*, 247–259.
137. Hughes, N.; Askew, K.; Scotson, C.P.; Williams, K.; Sauze, C.; Corke, F.; Doonan, J.H.; Nibau, C. Non-destructive, high-content analysis of wheat grain traits using X-ray micro computed tomography. *Plant Methods* **2017**, *13*, 76. [\[CrossRef\]](#)
138. Panazzo, J.F.; Eagles, H.A. Cultivar and environmental effects on quality characters in wheat. II. Protein. *Aust. J. Agric. Res.* **2000**, *51*, 629–636. [\[CrossRef\]](#)
139. McKenzie, R.H.; Middleton, A.B.; Bremer, E. Fertilization, seeding date, and seeding rate for malting barley yield and quality in southern Alberta. *Can. J. Plant Sci.* **2005**, *85*, 603–614. [\[CrossRef\]](#)
140. Waraich, E.A.; Ahmad, R.; Saifullah, S.A.; Ahmad, A. Impact of water and nutrient management on nutritional quality of wheat. *Plant Nutr.* **2010**, *33*, 640–653. [\[CrossRef\]](#)

141. Coventry, D.R.; Yadav, A.; Poswal, R.S.; Sharma, R.K.; Gupta, R.K.; Chhokar, R.S.; Gill, S.C.; Kumar, V.; Kumar, A.; Mehta, A.; et al. Irrigation and nitrogen scheduling as a requirement for optimising wheat yield and quality in Haryana, India. *Field Crops Res.* **2011**, *123*, 80–88. [\[CrossRef\]](#)
142. Forster, S.M.; Ransom, J.K.; Manthey, F.A.; Rickertsen, J.R.; Mehring, G.H. Planting date, seeding rate, and cultivar impact agronomic traits and semolina of durum wheat. *Am. J. Plant Sci.* **2017**, *8*, 2040. [\[CrossRef\]](#)
143. Sadowska, J.; Blaszczyk, W.; Jelinski, T.; Fornal, J.; Borkowska, H.; Styk, B. Fertilization and technological quality of wheat grain. *Int. Agrophys.* **2001**, *15*, 279–285.
144. Varga, B.; Svečnjak, Z.; Jurković, Z.; Kovačević, J.; Jukić, Ž. Wheat grain and flour quality as affected by cropping intensity. *Food Technol. Biotechnol.* **2003**, *41*, 321–329.
145. Kozlovsky, O.; Balij, J.; Cerny, J.; Kulhanek, M.; Prasilova, M.; Kos, M. Influence of nitrogen fertilizer injection (CULTAN) on yield, yield components formation and quality of winter wheat grain. *Plant Soil Environ.* **2009**, *55*, 536–543. [\[CrossRef\]](#)
146. Carr, P.M.; Horsley, R.D.; Poland, W.W. Tillage and seeding rate effects on wheat cultivars: I. Grain production. *Crop Sci.* **2003**, *43*, 202–209. [\[CrossRef\]](#)
147. Otteson, B.N.; Mergoum, M.; Ransom, J.K. Seeding rate and nitrogen management on milling and baking quality of hard red spring wheat genotypes. *Crop Sci.* **2008**, *48*, 749–755. [\[CrossRef\]](#)
148. Harasim, E.; Wesołowski, M. The effect of retardant Moddus 250 EC and nitrogen fertilization on yielding and grain quality of winter wheat. *Fragm. Agron.* **2013**, *30*, 70–77. (In Polish)
149. Jańczak-Pieniążek, M.; Buczek, J.; Kaszuba, J.; Szpunar-Krok, E.; Bobrecka-Jamro, D.; Jaworska, G. A comparative assessment of the baking quality of hybrid and population wheat cultivars. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 7104. [\[CrossRef\]](#)
150. Pasha, I.; Anjum, F.M.; Morris, C.F. Grain hardness: A major determinant of wheat quality. *Food Sci. Technol. Int.* **2010**, *16*, 511–522. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
151. Coventry, D.R.; Gupta, R.K.; Yadav, A.; Poswal, R.S.; Chhokar, R.S.; Sharma, R.K.; Yadav, V.K.; Gill, S.C.; Kumar, A.; Mehta, A.; et al. Wheat quality and productivity as affected by varieties and sowing time in Haryana, India. *Field Crops Res.* **2011**, *123*, 214–225. [\[CrossRef\]](#)
152. McKenzie, R.H.; Middleton, A.B.; Dunn, R.; Sadasivaiah, R.S.; Beres, B.; Bremer, E. Response of irrigated soft white spring wheat to seeding date, seeding rate and fertilization. *Can. J. Plant Sci.* **2008**, *88*, 291–298. [\[CrossRef\]](#)
153. Twizerimana, A.; Niyigaba, E.; Mugenzi, I.; Ngnadong, W.A.; Li, C.; Hao, T.Q.; Shio, B.J.; Hai, J.B. The combined effect of different sowing methods and seed rates on the quality features and yield of winter wheat. *Agriculture* **2020**, *10*, 153. [\[CrossRef\]](#)
154. Souza, E.J.; Martin, J.M.; Guttieri, M.J.; O'Brien, K.M.; Habernicht, D.K.; Lanning, S.P.; McLean, R.; Carlson, G.R.; Talbert, L.E. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality. *Crop Sci.* **2004**, *44*, 425–432. [\[CrossRef\]](#)
155. Zhong, Y.; Wang, W.; Huang, X.; Liu, M.; Hebelstrup, K.H.; Yang, D.; Cai, J.; Wang, X.; Zhou, Q.; Cao, W.; et al. Nitrogen topdressing timing modifies the gluten quality and grain hardness related protein levels as revealed by iTRAQ. *Food Chem.* **2019**, *277*, 135–144. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
156. Hao, T.; Chen, R.; Jia, J.; Zhao, C.; Du, Y.; Li, W.; Zhao, L.; Duan, H. Enhancing wheat gluten content and processing quality: An analysis of drip irrigation nitrogen frequency. *Plants* **2023**, *12*, 3974. [\[CrossRef\]](#)
157. Blandino, M.; Marinaccio, F.; Vaccino, P.; Reyneri, A. Nitrogen fertilization strategies suitable to achieve the quality requirements of wheat for biscuit production. *Agron. J.* **2015**, *107*, 1584–1594. [\[CrossRef\]](#)
158. Valdés-Valdés, C.; Estrada-Campuzano, G.; Martínez Rueda, C.G.; Domínguez López, A.; Solis-Moya, E.; Villanueva Carvajal, A. Grain and flour wheat quality modified by genotype, availability of nitrogen, and growing season. *Int. J. Agron.* **2020**, *2020*, 1974083. [\[CrossRef\]](#)
159. Mor, V.B.; Patel, A.M.; Chaudhary, A.N. Performance of bread wheat (*Triticum aestivum*) under different nitrogen levels and its split application under north Gujarat condition. *Indian J. Agron.* **2019**, *64*, 482–488.
160. Dżiki, D.; Cacak-Pietrzak, G.; Miś, A.; Jończyk, K.; Gawlik-Dżiki, U. Influence of wheat kernel physical properties on the pulverizing process. *J. Food Sci. Technol.* **2014**, *54*, 2648–2655. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
161. Božek, K.S.; Żuk-Gołaszewska, K.; Bojarczuk, J.; Gołaszewski, J. The Effect of different nitrogen fertilizer rates, sowing density, and plant growth regulator application on the quality and milling value of *Triticum durum* Desf. grain. *Agronomy* **2022**, *12*, 1622. [\[CrossRef\]](#)
162. Karabínová, M.; Mečiar, L.; Procházková, M. The influence of fertilization and sowing rate winter wheat baking quality. *Acta Fytotech. Zootech.* **2001**, *4*, 77–80.
163. Gaire, R.; Huang, M.; Sneller, C.; Griffey, C.; Brown-Guedira, G.; Mohammadi, M. Association analysis of baking and milling quality traits in an elite soft red winter wheat population. *Crop Sci.* **2019**, *59*, 1085–1094. [\[CrossRef\]](#)
164. Zheng, J.C.; Zhang, H.; Yu, J.; Liu, T.; Li, W.; Xu, F.; Wang, G.; Liu, T.; Li, J. Late sowing and nitrogen application to optimize canopy structure and grain yield of bread wheat in a fluctuating climate. *Turk. J. Field Crops* **2021**, *26*, 170–179. [\[CrossRef\]](#)
165. Seleiman, M.; Ibrahim, M.; Abdel-Aal, S.; Zahran, G. Effect of sowing dates on productivity, technological and rheological characteristics of bread wheat. *J. Agro Crop Sci.* **2011**, *2*, 1–6.
166. Wu, H.; Wang, Z.; Zhang, X.; Wang, J.; Hu, W.; Wang, H.; Derong, G.; Souza, E.; Cheng, S. Effects of different fertilizer treatments, environment and varieties on the yield-, grain-, flour-, and dough-related traits and cookie quality of weak-gluten wheat. *Plants* **2022**, *11*, 3370. [\[CrossRef\]](#)

167. Grote, U.; Fasse, A.; Nguyen, T.T.; Erenstein, O. Food security and the dynamics of wheat and maize value chains in Africa and Asia. *Front. Sustain. Food Syst.* **2021**, *4*, 617009. [\[CrossRef\]](#)
168. Wieser, H.; Koehler, P.; Scherf, K.A. The two faces of wheat. *Front. Nutri.* **2020**, *7*, 517313. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
169. Hellemans, T.; Landschoot, S.; Dewitte, K.; Van Bockstaele, F.; Vermeir, P.; Eeckhout, M.; Haesaert, G. Impact of crop husbandry practices and environmental conditions on wheat composition and quality: A review. *J. Agric. Food Chem.* **2018**, *66*, 2491–2509. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
170. El-Hawary, M.N.A.; Darwish, M.A.H.; Mohamed, M.M. Evaluation of some bread wheat genotypes under different abiotic stresses. *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.* **2022**, *23*, 20–32. [\[CrossRef\]](#)
171. Li, Y.F.; Wu, Y.; Hernandez-Espinosa, N.; Peña, R.J. Heat and drought stress on durum wheat: Responses of genotypes, yield, and quality parameters. *J. Cereal Sci.* **2013**, *57*, 398–404. [\[CrossRef\]](#)
172. Ahmed, M.; Fayyaz-ul-Hassan. Response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) quality traits and yield to sowing date. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0126097. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
173. Thapa, S.; Ghimire, A.; Adhikari, J.; Thapa, A.; Thapa, B. Impacts of sowing and climatic conditions on wheat yield in Nepal. *Malays. J. Halal Res.* **2020**, *3*, 38–40. [\[CrossRef\]](#)
174. Ozturk, A.; Caglar, O.; Bulut, S. Growth and yield response of facultative wheat to winter sowing, freezing sowing and spring sowing at different seeding rates. *J. Agron. Crop Sci.* **2006**, *192*, 10–16. [\[CrossRef\]](#)
175. Altenbach, S.B.; Dupont, F.M.; Kothari, K.M.; Chan, R.; Johnson, E.; Lieu, D. Temperature, water, and fertilizer influence the timing of key events during grain development in a US spring wheat. *J. Cereal Sci.* **2003**, *37*, 9–20. [\[CrossRef\]](#)
176. Sattar, A.; Cheema, M.A.; Farooq, M.; Wahid, W.; Babar, H.B. Evaluating the performance of wheat cultivars under late sown conditions. *Int. J. Agric. Biol.* **2010**, *12*, 561–565.
177. Shah, F.; Coulter, J.A.; Ye, C.; Wu, W. Yield penalty due to delayed sowing of winter wheat and the mitigatory role of increased seeding rate. *Eur. J. Agron.* **2020**, *119*, 126120. [\[CrossRef\]](#)
178. Gooding, M.J.; Pinyosinwat, A.; Ellis, R.H. Responses of wheat grain yield and quality to seed rate. *J. Agric. Sci.* **2002**, *138*, 317–331. [\[CrossRef\]](#)
179. Han, H.; Yang, W. Influence of uniconazole and plant density on nitrogen content and grain quality in winter wheat in South China. *Plant Soil Environ.* **2009**, *55*, 159–166. [\[CrossRef\]](#)
180. Nakano, H.; Morita, S. Effects of seeding rate and nitrogen application rate on grain yield and protein content of the bread wheat cultivar ‘Minaminokaori’ in Southwestern Japan. *Plant Prod. Sci.* **2009**, *12*, 109–115. [\[CrossRef\]](#)
181. Dragoş, M.; Pirşan, P. Research concerning the influence of sowing period and sowing density on the protein, gluten and starch content of autumn wheat in western Romania. *Res. J. Agric. Sci.* **2010**, *42*, 57–62.
182. Jemal, A.; Tamado, T.; Firdissa, E. Response of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties to seeding rates at Kulumsa, south eastern Ethiopia. *Asian J. Plant Sci.* **2015**, *14*, 50–58.
183. Zhang, J.; Khan, S.; Sun, M.; Gao, Z.Q.; Liang, Y.F.; Yang, Q.S.; Zhang, H.Y.; Li, N. Coordinated improvement of grain yield and protein content in dryland wheat by subsoiling and optimum planting density. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **2018**, *16*, 7847–7866. [\[CrossRef\]](#)
184. Hao, R.; Noor, H.; Wang, P.; Sun, M.; Noor, F.; Ullah, S.; Gao, Z. Combined effects of starch sucrose content and planting density on grain protein content of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Food Nutr. Res.* **2022**, *10*, 321–331. [\[CrossRef\]](#)
185. Landolfi, V.; D’Auria, G.; Nicolai, M.A.; Nitride, C.; Blandino, M.; Ferranti, P. The effect of nitrogen fertilization on the expression of protein in wheat and tritordeum varieties using a proteomic approach. *Food Res. Int.* **2021**, *148*, 110617. [\[CrossRef\]](#)
186. Bogard, M.; Allard, V.; Brancourt-Hulmel, M.; Heumez, E.; Machet, J.M.; Jeuffroy, M.H.; Gate, P.; Martre, P.; Le Gouis, J. Deviation from the grain protein concentration-grain yield negative relationship is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat. *J. Exp. Bot.* **2010**, *61*, 4303–4312. [\[CrossRef\]](#)
187. Zörb, C.; Ludewig, U.; Hawkesford, M.J. Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply. *Trends Plant Sci.* **2018**, *23*, 1029–1037. [\[CrossRef\]](#)
188. Landolfi, V.; Visioli, G.; Blandino, M. Effect of nitrogen fertilization and fungicide application at heading on the gluten protein composition and rheological quality of wheat. *Agronomy* **2021**, *11*, 1687. [\[CrossRef\]](#)
189. Xue, C.; Schulte auf’m Erley, G.; Rossmann, A.; Schuster, R.; Koehler, P.; Muehling, K.H. Split nitrogen application improves wheat baking quality by influencing protein composition rather than concentration. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*, 738. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
190. Hu, C.L.; Sadras, V.O.; Lu, G.Y.; Zhang, P.X.; Han, Y.; Liu, L.; Xie, J.Y.; Yang, X.Y.; Zhang, S.L. A global meta-analysis of split nitrogen application for improved wheat yield and grain protein content. *Soil Tillage Res.* **2021**, *213*, 105111. [\[CrossRef\]](#)
191. Schulz, R.; Makary, T.; Hubert, S.; Hartung, K.; Gruber, S.; Donath, S.; Döhler, J.; Weiss, K.; Ehrhart, E.; Claupein, W.; et al. Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? On-farm research on Luvisols in South-West Germany. *J. Agric. Sci.* **2015**, *153*, 575–587. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
192. Ma, W.; Yu, Z.; She, M.; Zhao, Y.; Islam, S. Wheat gluten protein and its impacts on wheat processing quality. *Front. Agric. Sci. Eng.* **2019**, *6*, 279–287. [\[CrossRef\]](#)
193. Šip, V.; Vavera, R.; Chrpova, J.; Kusa, P. Winter wheat yield and quality related to tillage practice, input level, and environmental condition. *Soil Tillage Res.* **2013**, *132*, 77–85. [\[CrossRef\]](#)

194. Wojtkowiak, K.; Stępień, A.; Orzech, K. Effect of nitrogen fertilisation on the yield components, macronutrient content and technological quality parameters of four winter wheat (*Triticum aestivum* ssp. *vulgare*) varieties. *Fragm. Agron.* **2018**, *35*, 146–155.
195. Al-Khayri, J.; Alshegaihi, R.; Mahgoub, E.I.; Mansour, E.; Atallah, O.; Sattar, M.; Al-Mssallem, M.; Alessa, F.; Aldaej, M.; Hassanin, A. Association of high and low molecular weight glutenin subunits with gluten strength in tetraploid durum wheat (*Triticum turgidum* spp. *durum* L.). *Plants* **2023**, *12*, 1416. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
196. Sharma, N.; Kumar, A.; Sharma, B.; Chand, L.; Sharma, V.; Kumar, M. Effects of sowing dates and weed management on productivity of irrigated wheat (*Triticum aestivum*). *Indian J. Agric. Sci.* **2020**, *90*, 556–559. [[CrossRef](#)]
197. Piekarczyk, M. Effect of fertilisation dose, plant protection input, and seeding density on the yield and grain technological quality of winter wheat grown in short-time monoculture on light soil. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2010**, *9*, 15–23.
198. Mikos-Szymańska, M.; Podolska, G. The effects of sowing date and seeding rate on spelt and common wheat protein composition and characteristics. *Qual. Assur. Saf. Crops Foods* **2016**, *8*, 289–300. [[CrossRef](#)]
199. Litke, L.; Gaile, Z.; Ruža, A. Effect of nitrogen fertilization on winter wheat yield and yield quality. *Agron. Res.* **2018**, *16*, 500–509.
200. Rossini, F.; Provenzano, M.E.; Sestili, F.; Ruggeri, R. Synergistic effect of sulfur and nitrogen in the organic and mineral fertilization of durum wheat: Grain yield and quality traits in the Mediterranean environment. *Agronomy* **2018**, *8*, 189. [[CrossRef](#)]
201. Kizilgeci, F.; Yildirim, M.; Islam, M.S.; Ratnasekera, D.; Iqbal, M.A.; Sabagh, A.E. Normalized difference vegetation index and chlorophyll content for precision nitrogen management in durum wheat cultivars under semi-arid conditions. *Sustainability* **2021**, *13*, 3725. [[CrossRef](#)]
202. Ma, D.; Guo, T.; Wang, Z.; Wang, C.; Zhu, Y.; Wang, Y. Influence of nitrogen fertilizer application rate on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) flour quality and Chinese noodle quality. *J. Sci. Food Agric.* **2009**, *89*, 1213–1220. [[CrossRef](#)]
203. Bueno, M.M.; Thys, R.C.S.; Rodrigues, R.C. Microbial enzymes as substitutes for chemical additives in baking wheat flour. Part I: Individual effects of nine enzymes on flour dough rheology. *Food Bioproc. Tech.* **2016**, *9*, 2012–2023. [[CrossRef](#)]
204. Grausgruber, H.; Oberforster, M.; Werteker, M.; Ruckebauer, P.; Vollmann, J. Stability of quality traits in Austrian-grown winter wheats. *Field Crop Res.* **2000**, *66*, 257–267. [[CrossRef](#)]
205. Korres, N.E.; Froud-Williams, R.J. The effects of varietal selection, seed rate and weed competition on quantitative and qualitative traits of grain yield in winter wheat. *Asp. Appl. Biol.* **2001**, *64*, 147–156.
206. Linina, A.; Ruza, A. Impact of agroecological conditions on the Hagberg falling number of winter wheat grain. *Res. Rural. Dev.* **2015**, *1*, 19–26.
207. Szentpétery, Z.; Jolánkai, M.; Kleinheincs, C.; Szöllösi, G. Effect of nitrogen top-dressing on winter wheat. *Cereal Res. Commun.* **2005**, *33*, 619–626. [[CrossRef](#)]
208. Ereku, O.; Götz, K.-P.; Koca, Y.O. Effect of sulphur and nitrogen fertilization on breadmaking quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties under Mediterranean climate conditions. *J. Appl. Bot. Food Qual.* **2012**, *85*, 17–22.
209. Corassa, G.M.; Hansel, F.D.; Lollato, R.; Pires, J.L.; Schwalbert, R.; Amado, T.J.; Guarienti, E.M.; Gaviraghi, R.; Bisognin, M.B.; Reimche, G.B.; et al. Nitrogen management strategies to improve yield and dough properties in hard red spring wheat. *Agron. J.* **2018**, *110*, 2417–2429. [[CrossRef](#)]
210. Eser, A.; Kassai, K.M.; Kato, H.; Kunos, V.; Tarnava, A.; Jolánkai, M. Impact of nitrogen topdressing on the quality parameters of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield. *Acta Aliment.* **2020**, *49*, 244–253. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Article

Quality of Winter Wheat Flour from Different Sowing and Nitrogen Management Strategies: A Case Study in Northeastern Poland

Krzysztof Lachutta and Krzysztof Józef Jankowski * 

Department of Agrotechnology and Agribusiness, Faculty of Agriculture and Forestry, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Oczapowskiego 8, 10-719 Olsztyn, Poland; krzysztof.lachutta@ampol-merol.pl

* Correspondence: krzysztof.jankowski@uwm.edu.pl

Abstract: The study analyzed the effect of nitrogen (N) management and different sowing parameters of winter wheat on the flour quality, rheological properties of flour, and bread quality. Flour was obtained from winter wheat grain produced during a field experiment conducted in 2018–2021. The experiment involved three factors: (i) the sowing date (early (3–6 September), delayed by 14 days, and delayed by 28 days), (ii) sowing density (200, 300, and 400 live grains m^{-2}), and (iii) split application of N fertilizer in spring (40 + 100, 70 + 70, and 100 + 40 kg ha^{-1} in the full tillering stage and the first node stage, respectively). A 28-day delay in sowing increased the total protein content of the flour, water absorption capacity of the flour, dough development time and stability, and degree of softening. When sowing was delayed by 14 or 28 days, the crumb density decreased without affecting the loaf volume. A sowing density of 400 grains m^{-2} had a positive impact on the flour color, dough stability, and loaf volume. The flour color and dough stability were enhanced when N was applied at 100 + 40 kg ha^{-1} , respectively. In turn, the total protein content of flour peaked when it was applied at 40 + 100 kg N ha^{-1} . The quality of flour improved when winter wheat was sown at a density of 400 live grains m^{-2} with a delay of 14 or 28 days and supplied with 100 kg N ha^{-1} in the full tillering stage and 40 kg N ha^{-1} in the first node stage.

Keywords: *Triticum aestivum* L.; sowing date; sowing density; N fertilization; flour; protein and ash content; rheological properties; bread quality



Citation: Lachutta, K.; Jankowski, K.J. Quality of Winter Wheat Flour from Different Sowing and Nitrogen Management Strategies: A Case Study in Northeastern Poland. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 5167. <https://doi.org/10.3390/app14125167>

Academic Editors: Linchuan Fang and Xunfeng Chen

Received: 15 May 2024

Revised: 6 June 2024

Accepted: 12 June 2024

Published: 14 June 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The global population continues to increase, which generates a higher demand for food, mainly plant-based food [1–4]. The global cereal-equivalent food demand is projected to increase by around 10% in 2030 and around 62% in 2050 due to growing social, economic, and demographic pressures [5]. Wheat is one of the most important cereal crops around the world [3,6,7]. The aim of modern crop breeding practices and wheat production technologies is not only to increase grain yields but also to improve grain quality [8–10]. The technological quality of grain produced for baking purposes is determined based on the chemical composition and physicochemical properties of flour [11–15]. The main quality attributes of wheat flour include its color, total protein content, and crude ash content. Wheat flour with desirable quality parameters is obtained by milling high-quality grain or by blending grains from batches with different technological qualities to achieve an end product with specific properties [16]. Color is a very important quality attribute of wheat flour, in particular in flour intended for the production of bread and pasta, because it affects consumer acceptability and the market value of cereal products [17]. The color of flour is influenced mainly by lutein, xanthophyll, β -carotene, and crude ash minerals (phosphorus, potassium, magnesium, and calcium) [18,19]. The processing suitability of flour is partly determined by its crude ash content [20–23]. The crude ash content could be low in flour for baking light cakes and higher in bread flour [24]. In Poland, flours are classified into

types based on their crude ash content (for example, type 450 is light cake flour, type 750 is bread flour, and 2000 is whole-wheat flour) [16]. The color of flour is influenced by the coarseness of the grind and ash content (the lower the ash content, the lighter the flour). White flour is produced mainly from the endosperm, the central part of the kernel, where ash content does not exceed 5 g kg^{-1} dry matter (DM). The bran layer (seed coat) surrounding the endosperm is also partly ground during milling. The crude ash content of the seed coat ranges from 60 to 100 g kg^{-1} DM. Therefore, the finer the grind, the more ash is transferred to flour, resulting in its darker color [16]. Protein content is one of the key factors for classifying wheat grain [25]. Flours intended for various purposes differ in their protein content. Flours with a higher protein content ($>125 \text{ g kg}^{-1}$ DM) are used in bread production, whereas flours with a lower protein content ($<95 \text{ g kg}^{-1}$ DM) are best suited for baking cakes and biscuits [26]. The rheological properties of flour determine its suitability for the production of various types of baked goods, and these properties are measured with the use of a farinograph [27,28]. A farinograph supports the dynamic measurements of the consistency of dough made from wheat flour and water, as well as changes in the dough properties during mixing. The following rheological properties are measured with a farinograph: the water absorption capacity of flour, dough development time, dough stability, and degree of softening. The water absorption capacity of flour is defined as the amount of water needed to bring the dough to maximum consistency [29,30]. Flours with a high water absorption capacity are used in the production of light and puffy cakes or breads, and they enhance the end products' taste, increase crumb softness, and delay bread staling [30,31]. In turn, flours with a lower water absorption capacity are used in the production of cakes and biscuits [32]. Elastic dough with a low viscosity absorbs more water during mixing than weak dough [30]. Based on flour's water absorption capacity, changes in the dough consistency during development and the degree of dough softening during mixing are registered by the farinograph [28]. The dough development time is influenced by gluten stability [25,33]. A long dough development time is undesirable in the baking industry, because it increases energy consumption during dough mixing. In turn, a very short dough development time is indicative of flour with low gluten quality [34,35]. Dough stability is defined as the time during which dough retains its shape during proofing. A high dough stability is indicative of a high dough strength and tolerance to mixing [33,34]. The degree of dough softening is also an important technological parameter in the baking industry. A high water absorption capacity and low degree of dough softening testify to the high quality of flour. In turn, a high degree of dough softening is indicative of low-quality flour [36], and it inhibits dough fermentation [37]. The baking quality of wheat flour can be comprehensively assessed based on the crumb density and bread loaf volume in a laboratory baking test [38]. These parameters determine the quality and sensory attributes of bread [38,39]. A dense crumb and low bread loaf volume are undesirable from the consumers' point of view [40].

The technological quality of wheat grain is a complex trait that is determined by genetic factors, agroecological conditions, and agronomic practices, including the level of agricultural inputs [41–44]. Nitrogen fertilization is regarded as the key determinant of the technological quality of wheat grain [13,43–46]. Grain quality is affected not only by the N rate but also by the N application method [47]. In Poland, the optimal rate of N fertilizer in winter wheat for achieving grain yields of 8 Mg ha^{-1} is $160\text{--}180 \text{ kg ha}^{-1}$, and 40–50% of that rate should be applied in the full tillering stage (FT), 30–40% in the first node stage (FN), and 20–25% in the “flag leaf just visible, but still rolled” stage [13]. Rapid synthesis of gluten proteins begins around 12 days after wheat flowering and ends 35 days after flowering despite the fact that the substrate (amino acids) is still present. For this reason, the total N rate has to be skillfully split into several applications to promote optimal wheat growth [13]. Nitrogen affects mainly the grain yield when applied in the early stages of wheat development, but it improves the quality of grain and flour when applied in successive growth stages [48–50]. The ash content of flour is determined mainly by weather conditions and cultivar, and it is less influenced by the N rate, N splitting,

and date of N application [8,18,51,52]. The color of flour is negatively correlated with the ash content, and it is also weakly influenced by N fertilization [8,18,53–59]. An increase in the N rate increases the protein content of flour [60–62]. In turn, the water absorption capacity of flour, rheological properties of dough (development time, stability, and degree of softening), and bread quality (mainly loaf volume) tend to improve when N is applied in the later growth stages of wheat [18,52,56,60,62–68].

The technological quality of wheat grain is also affected by the sowing date [69] and sowing density [66,70–73]. Global climate change has prompted researchers to redefine the agronomic requirements in wheat production, including the optimal sowing dates [74–78]. However, most studies have examined the effects of delayed sowing mainly in the context of winter wheat yields, whereas the impact of delayed sowing on the quality of grain and flour remains insufficiently investigated [79–83]. According to the limited number of studies on the subject, delayed sowing increases the ash content of wheat grain [84,85]. In late-sown stands, grain ripening occurs at higher temperatures, which promotes crude ash accumulation [84]. The ash content is negatively correlated with the color of flour [18], which suggests that delayed sowing could also affect this attribute [86]. The grain of late-sown wheat (and the resulting flour) had a higher protein content [87,88], probably because wheat plants were exposed to higher temperatures during grain ripening, which promoted protein accumulation [89–92]. There is also limited evidence to indicate that the sowing date is associated with the water absorption capacity of flour, dough stability, and bread loaf volume. Delayed sowing decreases the water absorption capacity of flour and dough stability and increases the bread loaf volume [92,93]. The optimal sowing density in wheat production also needs to be redefined due to global climate change. The sowing density is a product of the sowing date and agricultural inputs in the production technology [13]. In Poland, 250–350 grains m^{-2} should be sown between 15 and 20 September [13]. The influence of N management under different sowing strategies on the quality of wheat flour and bread has not been examined in the literature to date. The present study was undertaken to fill in this knowledge gap.

The objective of this study was to evaluate the effect of the sowing date, sowing density, and split application of N fertilizer in the spring on the flour quality (crude ash content, flour color, and total protein content), rheological properties of flour (water absorption capacity, dough development time, dough stability, and degree of softening), and bread quality (loaf volume and crumb density). The present study can contribute to the development of climate-resilient sowing and N management strategies for the production of high-quality winter wheat flour in northeastern Poland.

2. Materials and Methods

2.1. Field Experiment

Flour was obtained from winter wheat cv. ‘Julius’ in a field experiment conducted during three growing seasons (2018–2021) at the Agricultural Experiment Station (AES) in Bałcyny (53°35′46.4″ N, 19°51′19.5″ E, northeastern Poland) owned by the University of Warmia and Mazury in Olsztyn. The experiment involved three factors. The first factor was the sowing date: early (6 September 2018, 5 September 2019, and 3 September 2020), delayed by 14 days (17–20 September), and delayed by 28 days (1–4 October). The second factor was the sowing density: 200, 300, and 400 live grains m^{-2} . The third factor was the split application of N fertilizer in the spring in the full tillering stage (FT; BBCH 22–25) and in the first node stage (FN; BBCH 30–31) at 40 + 100, 70 + 70, and 100 + 40 kg ha^{-1} (Pulan, Grupa Azoty SA, Puławy, Poland; ammonium nitrate, 34% N). The third split of N fertilizer (40 kg ha^{-1}) was applied in the “flag leaf just visible, but still rolled” stage (BBCH 37) (Pulan, Grupa Azoty SA, Puławy, Poland; ammonium nitrate, 34% N). In the spring, N was applied on 6–12 March (FT), 7–10 May (FN), and 21–30 May (flag leaf just visible, but still rolled).

The experiment had a split-split-plot design (sowing date was assigned to whole plot treatments, sowing density was assigned to subplot treatments, and the split spring

application of N fertilizer was assigned to sub-subplot treatments) with three replications. The plot size was 15 m² (10 m by 1.5 m). The preceding crop was winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). All field treatments that did not constitute the experimental variables were consistent with the agronomic requirements of winter wheat and good agricultural practices. The experimental conditions (soil type and content of plant-available nutrients) and the production technology of winter wheat were described in detail by Lachutta and Jankowski [94] (Tables S1 and S2).

2.2. Flour Quality

Flour was obtained by grinding wheat grain in a laboratory mill (Brabender, Quadrumat Junior, Duisburg, Germany) according to the procedure described by Lachutta and Jankowski [95]. The crude ash content was determined with an NIR System InfratecTM 1241 grain analyzer (FOSS, Hillerød, Denmark) by measuring near-infrared transmittance in the wavelength range of 570–1050 nm. The flour color was evaluated with the use of a MB-3M whiteness meter (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland) that measured illuminance, i.e., the density of a luminous flux reflected from the flour surface at a wavelength of 565 nm. The total protein content of flour was determined with an AgriCheck instrument (Bruins Instruments, Puchheim, Bayern, Germany) by measuring near-infrared transmittance in the wavelength range of 730–1100 nm.

2.3. Rheological Properties of Dough and Bread Quality

The water absorption capacity and rheological properties of flour (dough development time, dough stability, and degree of softening) were measured with a Brabender farinograph with head type 50 according to Polish Standard PN-EN ISO 5530-1:2015-01 [96]. The bread quality was assessed in a laboratory baking test according to the method described by Klockiewicz-Kamińska and Brzeziński [97]. The dough was prepared in the Teddy Varimixer (Brøndby, Denmark) by mixing 500 g of flour with a moisture content of 15%, water (the amount of water was determined based on the water absorption capacity of flour at 27–28 °C), yeast (3% relative to the amount of water), and salt (1.5% relative to the amount of flour). Water was added in the amount required to achieve a dough temperature of 30 °C. The dough was fermented at a temperature of 30 °C and a relative humidity of 75–80% for 1 h in a proofing cabinet of the DC 32E electric oven (Sveba-Dahlen, Glimek AB, Fristad, Sweden). Dough portions were placed in baking tins and kept in the proofing cabinet at 35 °C for 20–40 min, i.e., the time required for optimal dough development. Bread was baked in the DC 32E electric oven (Sveba-Dahlen, Glimek AB, Fristad, Sweden) at 230 °C for 35 min. The bread loaf volume and crumb density were determined 24 h after baking. The bread loaf volume was determined by the seed displacement method with the use of millet (*Panicum miliaceum* L.) seeds and a 1200 cm³ Sa-Wy general-purpose volume scanner (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland). The amount of millet seeds displaced by the bread sample was equal to its volume. The crumb density was determined with the use of a crumb cutter (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o., Bydgoszcz, Poland). A crumb sample with a volume of 27 cm³ was cut from the center of a bread loaf, at a distance of minimum 1 cm from the crust. The crumb density was calculated using Equation (1).

$$D_c = \frac{W_c}{V_w} \quad (1)$$

where the following is true:

D_c —crumb density (g cm⁻³);

W_c —crumb weight (g);

V_w —volume of the cylinder (27 cm³).

The flour quality, rheological properties of dough, and bread quality were assessed by Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego sp. z o. o. in Bydgoszcz, Poland.

2.4. Weather Conditions

Weather conditions in the growing seasons of winter wheat (2018/2019, 2019/2020, and 2020/2021), with special emphasis on the grain ripening stage (mean daily temperature, precipitation, growing degree days, and the Selyaninov hydrothermal index), were described by Lachutta and Jankowski [94] and Lachutta and Jankowski [95] (Tables S3 and S4). In all growing seasons, the mean daily temperature exceeded the long-term average by 1.6–2.3 °C. In each year of the study, the mean daily temperatures exceeded the long-term averages in June, July, and August (by 2.1–5.3, 0.5–4.2, and 0.1–1.6 °C, respectively). In the first (2018/2019) and second (2019/2020) growing season, the total rainfall approximated the long-term average (595.8 mm) (Table S3). The highest grain yields (10.57–10.90 Mg ha⁻¹) were noted in these growing seasons [94]. In the growing season of 2020/2021, the precipitation exceeded the long-term average by 13% (Table S3), and grain yields were 15–18% lower relative to the remaining years of the study [94].

The quality of winter wheat grain is influenced mainly by weather conditions between the milk stage to the fully ripe stage [13]. During the entire field experiment (2018–2021), the temperature and precipitation during grain ripening (BBCH 73–89) differed across years (Table S4). During grain ripening in 2019, 2020, and 2021, the growing degree days (GDDs) were determined at 251–273, 260–299, and 305–354 °C, respectively. In the 2018/2019 season, delayed sowing increased the GDDs by 22 °C during grain ripening (a particularly high increase of 25–94 °C in the GDDs was observed between the dough stage and the fully ripe stage). In turn, in the 2020/2021 season, delayed sowing decreased the GDDs by 31–49 °C during grain ripening. The precipitation levels during grain ripening were determined at 62.3–79.6 mm (2018/2019), 16.2–33.0 mm (2019/2020), and 75.5–97.9 mm (2020/2021). In the 2018/2019 season, winter wheat plants were exposed to higher precipitation (62.3 vs. 76.3–79.6 mm) during grain ripening. In turn, in the 2019/2020 season, precipitation was lower (33 vs. 19.1–16.2 mm) during grain ripening in late-sown stands. In the third year of the study (2020/2021), late-sown stands were exposed to higher precipitation in the milk stage (BBCH 73–83) but lower precipitation during grain ripening (BBCH 83–89). In general, the first and third growing seasons were characterized by the most favorable values of the Selyaninov hydrothermal index during grain ripening (humid spell). In the second growing season, grain ripening occurred during a dry spell ($K = 0.40$ – 0.79) (Table S4).

2.5. Statistical Analysis

The results of the conducted measurements (crude ash content, flour color, total protein content, water absorption capacity, dough development time, dough stability, degree of softening, bread loaf volume, and crumb density) were analyzed using the ANOVA with Statistica software, ver. 13 [98]. Post hoc multiple comparisons were performed with the use of Tukey's HSD test at $p \leq 0.05$. The results of the F -test for fixed effects in the ANOVA are presented in Table S5. The relationship between meteorological variables and the studied agronomic parameters was evaluated using the linear regression method. The values of Pearson's correlation coefficient (R) were considered significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$ (Table S6).

3. Results

3.1. Flour Quality

The flour color was negatively correlated with the crude ash content (Table S6). The crude ash content of flour was positively correlated with weather conditions during grain ripening (Selyaninov index in BBCH 73–89) (Figure 1a). In turn, a negative correlation was noted between the flour color and the Selyaninov hydrothermal index during grain ripening (Figure 1b). A dry spell during grain ripening decreased the crude ash content of flour, which had a positive impact on the flour color. As a result, significantly lighter flour (79.9% of the whiteness standard) with a lower crude ash content (6.3 g kg⁻¹ DM) was obtained from winter wheat grain produced in a growing season with the least favorable weather conditions during grain ripening (2019/2020) (Tables 1 and S4).

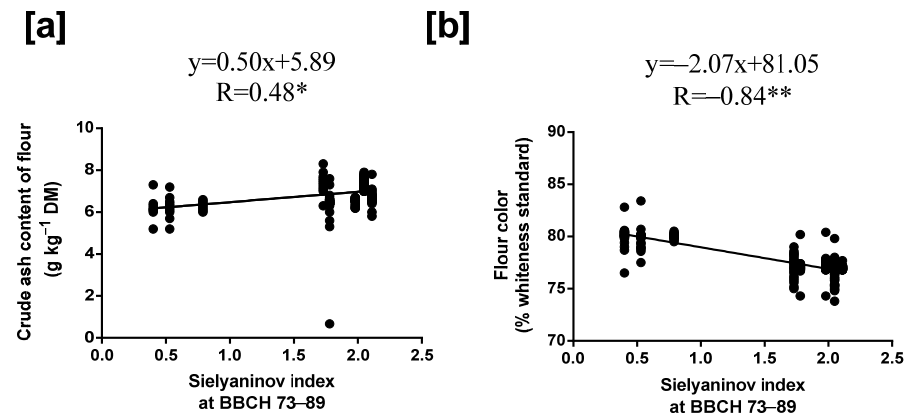


Figure 1. Linear regression between the crude ash content (a) and color of flour (b) vs. the Selyaninov hydrothermal index during winter wheat grain ripening. * significant at $p \leq 0.05$; ** significant $p \leq 0.01$.

Table 1. Quality parameters of winter wheat flour.

Parameter	Crude Ash Content (g kg ⁻¹ DM)	Color (% Whiteness Standard)	Total Protein Content (g kg ⁻¹ DM)	Water Absorption Capacity (%)
Growing season				
2018/2019	7.4 ^a	76.9 ^b	135 ^a	62.2 ^a
2019/2020	6.3 ^c	79.9 ^a	127 ^c	57.7 ^c
2020/2021	6.6 ^b	77.1 ^b	129 ^b	59.2 ^b
Sowing date, mean for 2018–2021				
Early	6.8	78.0	129 ^b	59.2 ^b
Delayed (+14 days)	6.7	77.9	130 ^b	59.5 ^{ab}
Delayed (+28 days)	6.7	77.9	132 ^a	60.3 ^a
Sowing density (live grains m ⁻²), mean for 2018–2021				
200	6.8	77.9 ^b	132 ^a	59.6
300	6.8	77.8 ^b	130 ^{ab}	59.4
400	6.7	78.2 ^a	129 ^b	60.0
Split spring N rate (kg ha ⁻¹), mean for 2018–2021				
40 + 100	6.8	77.8 ^b	132 ^a	59.7
70 + 70	6.7	78.0 ^{ab}	130 ^{ab}	60.0
100 + 40	6.7	78.1 ^a	129 ^b	59.3

Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test. Means without letters indicate that the main effect is not significant.

The total protein content and water absorption capacity of flour were positively correlated with the crude ash content (Table S6). Therefore, the total protein content and water absorption capacity of flour were higher in years when weather conditions promoted crude ash accumulation (humid and wet spells during grain ripening). The highest total protein content (135 g kg⁻¹ DM), the highest crude ash content (7.4 g kg⁻¹ DM), and the highest water absorption capacity (62.2%) were noted in flour obtained from grain harvested in the first growing season (2018/2029) (Table 1).

The color of flour was significantly influenced by the sowing density and split spring N rate (Table S5). Lighter flour (78.2%) was obtained from grain grown in plots with the highest sowing density (400 grains m⁻²) (Table 1). Dense sowing exerted the most beneficial effect on the flour color in the first growing season (Figure 2). A lighter color was also obtained in 70 + 70 and 100 + 40 kg N ha⁻¹ (Table 1).

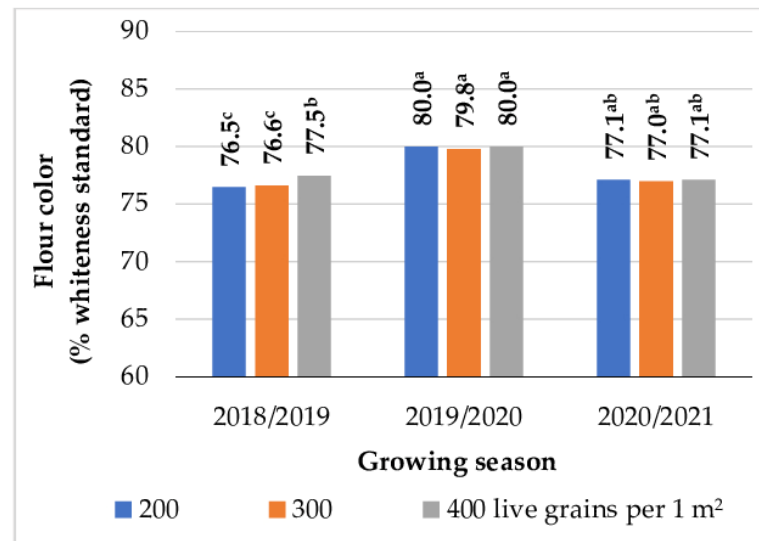


Figure 2. The effect of the sowing density on the color of wheat flour. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

The effect of the sowing date on the total protein content of flour varied depending on weather conditions in the years of the study. Delayed sowing had a particularly positive effect on the total protein content of flour in the first growing season (Figure 3), which was characterized by the most favorable weather conditions during grain ripening (highest values of the Selyaninov index, Table S4). In this year, grain ripening in late-sown stands took place under more supportive weather conditions (humid spell to wet spell, Table S4), which increased the total protein content of flour by 3.8–8.5% (Figure 3). In the remaining growing seasons (year 2 and 3), the sowing date had no effect on the total protein content of flour. An increase in the N rate at FT with a simultaneous decrease in the N rate at FN ($100 + 40 \text{ kg ha}^{-1}$) decreased the total protein content of wheat flour by 2.3% (Table 1).

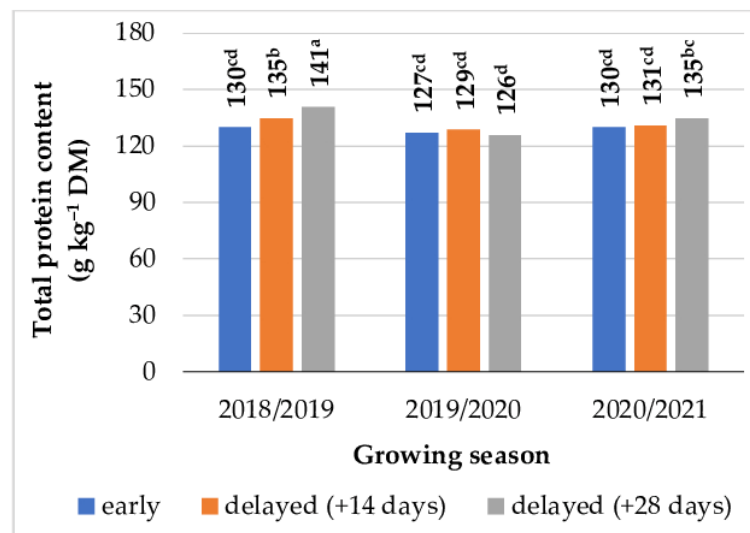


Figure 3. The effect of the sowing date on the total protein content of wheat flour. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

3.2. Rheological Properties of Dough and Bread Quality

The dough stability was negatively correlated with the crude ash content of flour (Table S6) and weather conditions during grain ripening (Figure 4a). In turn, the degree of dough softening was positively correlated with the crude ash content and weather conditions from the milk stage to the fully ripe stage (Figure 4b).

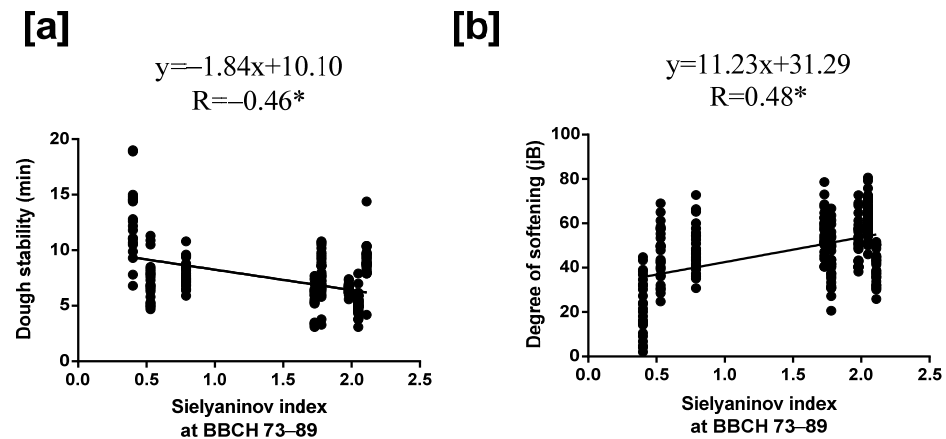


Figure 4. Linear regression between dough stability (a) and the degree of softening (b) vs. the Selyaninov hydrothermal index during winter wheat grain ripening. * significant at $p \leq 0.05$.

Flour in the second growing season was characterized by more desirable rheological properties, including the longest dough development time (3.7 min), the highest dough stability (9.0 min), and the lowest dough mixing tolerance index (38.4 jB). In this growing season, a dry spell during grain ripening ($K = 0.40$ – 0.79) improved the rheological properties of flour (Table S4). The values of dough development time (3.5 min), dough stability (6.3–7.4 min), and degree of softening (48.2–53.5 jB) were least desirable when winter wheat was sown in August (sown early and sown with a delay of 14 days). Delayed sowing (+28 days) had a positive impact on the dough development time and stability (increase of 6% and 14–33%, respectively) and the degree of softening (the dough mixing tolerance index decreased by 12–21%), regardless of weather conditions (Table 2). Delayed sowing improved the rheological properties of flour, because grain ripening took place under less favorable weather conditions (Table S4), which increased the dough stability (negative correlation) and decreased the degree of dough softening during mixing (positive correlation) (Figure 4). The sowing density and split spring N rate exerted a significant effect only on the dough stability (Table S5). The dough stability was highest when winter wheat was sown at a density of 400 grains m^{-2} (7.8 min) and when N fertilizer was applied at 100 and 40 kg ha^{-1} (7.7 min). A decrease in the sowing density to 200–300 grains m^{-2} and the application of 40 + 100 kg N ha^{-1} decreased the dough stability by 8–10% and 8%, respectively (Table 2). An increase in the sowing density to 400 grains m^{-2} had a particularly beneficial influence on the dough stability when sowing was delayed +28 days (Figure 5). The effect of the sowing density and split spring N rate on dough stability did not vary depending on weather conditions in the years of the study (Table S5).

Table 2. Rheological properties of dough and bread quality.

Parameter	Development Time (min)	Stability (min)	Degree of Softening (jB)	Bread Loaf Volume (cm^3)	Crumb Density ($g\ cm^{-3}$)
Growing season					
2018/2019	3.5 ^b	5.2 ^c	60.5 ^a	333 ^b	0.27 ^a
2019/2020	3.7 ^a	9.0 ^a	38.4 ^c	350 ^a	0.24 ^b
2020/2021	3.5 ^b	7.8 ^b	45.2 ^b	347 ^a	0.23 ^c
Sowing date, mean for 2018–2021					
Early	3.5 ^b	7.4 ^b	48.2 ^a	343	0.25 ^a
Delayed (+14 days)	3.5 ^b	6.3 ^c	53.5 ^a	343	0.24 ^b
Delayed (+28 days)	3.7 ^a	8.4 ^a	42.4 ^b	344	0.24 ^b

Table 2. Cont.

Parameter	Development Time (min)	Stability (min)	Degree of Softening (jB)	Bread Loaf Volume (cm ³)	Crumb Density (g cm ⁻³)
Sowing density (live grains m ⁻²), mean for 2018–2021					
200	3.6	7.2 ^b	49.5	342 ^b	0.25
300	3.5	7.0 ^b	47.9	342 ^b	0.25
400	3.5	7.8 ^a	46.7	347 ^a	0.24
Split spring N rate (kg ha ⁻¹), mean for 2018–2021					
40 + 100	3.6	7.1 ^b	48.9	345	0.24
70 + 70	3.5	7.3 ^{ab}	48.7	343	0.25
100 + 40	3.5	7.7 ^a	46.5	343	0.25

Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test. Means without letters indicate that the main effect is not significant.

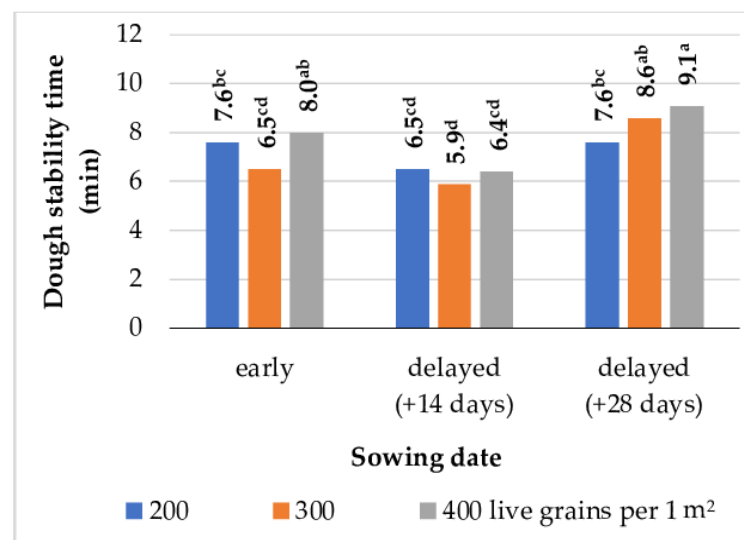


Figure 5. The effect of the sowing date and sowing density on dough stability. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

The analysis of the flour quality also involved a direct assessment of the baking quality in a laboratory baking test. It was assumed that the baking test would reveal specific quality traits that could not be determined with the use of indirect measurement methods. The bread loaf volume and crumb density were influenced by the ash content of the flour. An increase in the ash content decreased the bread loaf volume and increased the crumb density (Table S6). The bread loaf volume was negatively correlated with precipitation in the dough stage (BBCH 83–89). In turn, the crumb density was negatively correlated with the mean daily temperature during grain ripening (BBCH 73–89) (Figure 6). Bread baked from grain harvested in the second and third growing seasons was characterized by the largest loaf volume (347–350 cm³) and a low crumb density (0.23–0.24 g cm⁻³). These growing seasons were characterized by the lowest precipitation in the dough stage and the highest mean daily temperatures during grain ripening (Table S4).

A sowing delay of 14 and 28 days decreased the crumb density by 4% (to 0.24 g cm⁻³) but had no effect on loaf volume (Table 2). The crumb density was not affected by the sowing date only in the second growing season (Figure 7). Delayed sowing decreased the crumb density due to higher mean daily temperatures during grain ripening (Table S4). A high sowing density (400 grains m⁻²) increased the loaf volume by 1.5% (Table 2). A higher sowing density in the second and third growing seasons induced the greatest improvement in the flour quality (loaf volume increased by 2%) (Figure 8). The loaf volume and crumb density were not affected by the split spring N rate (Table S5).

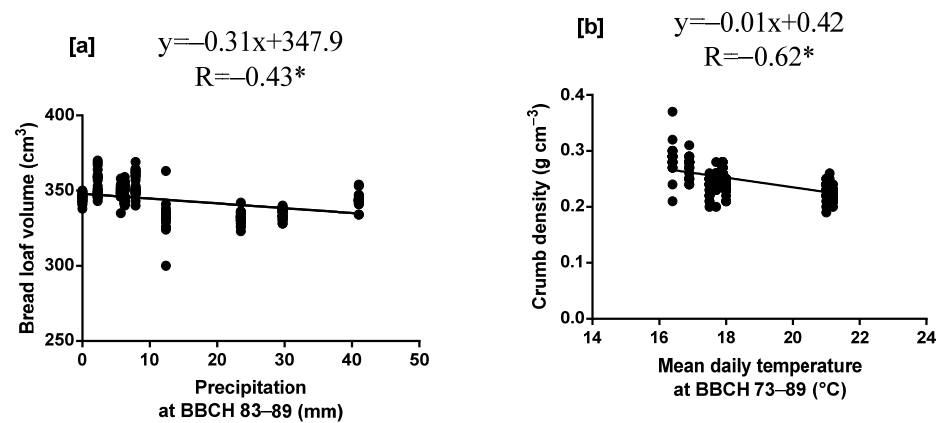


Figure 6. Linear regression between (a) bread loaf volume and total precipitation in the dough stage; (b) crumb density and mean daily temperature during winter wheat grain ripening. * significant at $p \leq 0.05$.

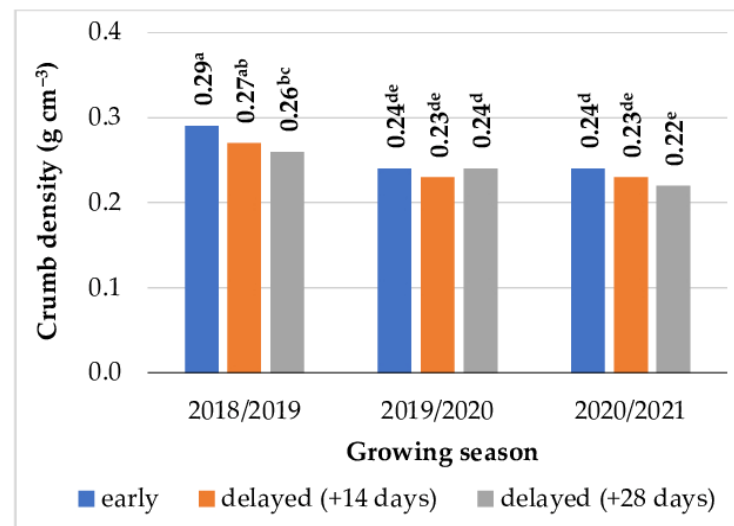


Figure 7. The effect of the sowing date on crumb density. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

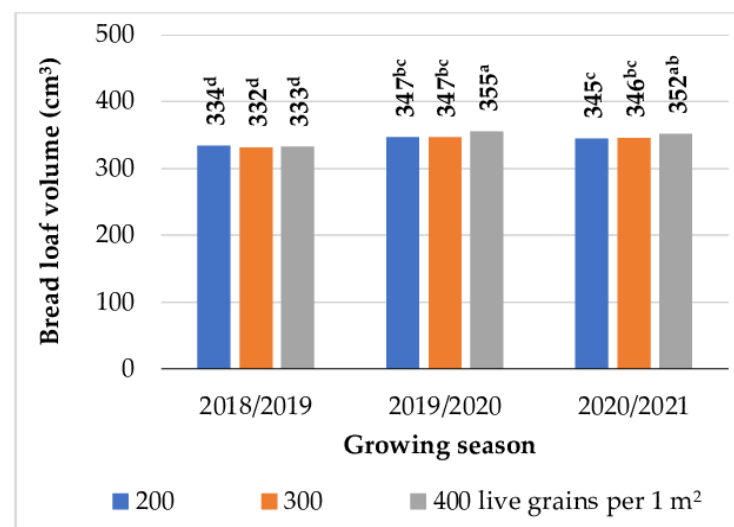


Figure 8. The effect of the sowing density on bread loaf volume. Means with the same letters do not differ significantly at $p \leq 0.05$ in Tukey's test.

4. Discussion

4.1. Flour Quality

The ash content denotes the concentration of minerals in flour [20–23]. The ash content not only affects the nutritional value of flour, but it also determines its technological quality and suitability for the production of various baked goods (for example, ash content does not exceed 5 g kg⁻¹ DM in cake flour, ranges from 7.0 to 7.8 g kg⁻¹ DM in bread flour, and exceeds 20 g kg⁻¹ DM in graham flour) [16]. The ash content of wheat grain is determined mainly by weather conditions, including temperature and precipitation [71,99–101]. This observation was corroborated by the present study, which revealed a positive correlation between the crude ash content of flour and weather conditions during grain ripening. Unfavorable weather conditions during grain ripening decreased the accumulation of crude ash in the flour. The ash content of wheat flour was not influenced by the sowing date, sowing density, or split spring N rate, which is consistent with the findings of other authors [8,18,43,51,52,102–104]. In turn, Adeel et al. [101] and Caglar et al. [71] found that the ash content of flour decreased when sowing was delayed and when the sowing density was increased by 20% and 15%, respectively. According to Caglar et al. [71], Alignan et al. [84], and Adeel et al. [101], delayed sowing decreased the crude ash content of flour because winter wheat was exposed to high temperatures during grain ripening. In the current study, the flour color was very light (77–80%) due a low crude ash content (6.3–7.4 g kg⁻¹ DM). Significantly lighter flour was obtained from the grain sown at the highest density of 400 grains m⁻². The flour color was also correlated with the sowing density in the work of Caglar et al. [105]. In the present study, the split spring N rate affected the color of flour. Higher N rates applied in FT (100 + 40 kg ha⁻¹) increased flour lightness (78.1%). The application of a portion of the split spring N rate in the FN stage with a simultaneous decrease in the N rate applied in the FT stage (70 + 70 and 40 + 100 kg ha⁻¹) decreased flour lightness by 0.3 percent points (%p). In a study by Jankowski et al. [43], an increase in the N rate combined with systemic fungicide treatment decreased flour lightness by 0.5%p. In turn, the N rate had no effect on the color of wheat flour in the works of Jaskulska et al. [8] and Rodrihero et al. [18].

The protein content of flour determines its baking quality by improving the dough viscosity, extensibility, strength, and elasticity [65,106]. In this study, the total protein content was highest (132 g kg⁻¹ DM) in flour obtained from the grain of late-sown winter wheat (+28 days). A similar relationship between the sowing date and protein content of flour was reported by Bagulho et al. [107], Knapowski et al. [92], and Adeel et al. [101]. The observed increase in the protein content of flour can be attributed to the fact that late-sown wheat is exposed to higher temperatures in the ripening stage, which promotes protein accumulation [90,91,108]. In the works of Geleta et al. [109], Mikos-Szymańska and Podolska [110], and Hao et al. [111], and in the present study (Table 1), an increase in sowing density decreased the protein content of flour by 12%, 2%, 6%, and 2%, respectively. In contrast, in a study by Madan and Munjal [112], the protein content of flour was not affected by the sowing density. Xue et al. [65] demonstrated that an increase in the N rate applied at the beginning of stem elongation decreased the protein concentration in flour by 6%. A reverse relationship was noted in this study, where the protein content of flour increased by 2% in response to a higher N rate at the beginning of stem elongation. These differences could be attributed to nutrient dissolution with an increase in grain yields [13]. In the work of Xue et al. [65], an increase in the N rate at the beginning of stem elongation increased the wheat grain yields by 2% and decreased the total protein content of flour. In turn, in our previous study [94], an increase in the N rate applied in the FN stage decreased the grain yield and increased the total protein content of flour. Johansson et al. [113] and Rossmann et al. [114] also found that late N application increased the protein content of wheat grain by 11% and 10%, respectively. In turn, Luo et al. [115], Madan and Munjal [112], and Haile et al. [116] found that the protein content of flour was influenced by the N rate but not by N splitting.

The water absorption capacity of flour is an important parameter that affects the quality of baked goods [117,118]. In the present study, delayed sowing increased the water absorption capacity of flour (by 1.1%p), and similar results were reported by Zhang et al. [119] (increase of 3.4%p). The observed increase in the water absorption capacity of flour could be due to the fact that late-sown wheat plants were exposed to high temperatures during grain ripening, which contributed to protein accumulation at the expense of the synthesis and storage of carbohydrates [99,120]. According to Huang et al. [121], delayed sowing modifies the starch quality by affecting its crystallinity and improving its pasting characteristics, but this effect may be reversed by an excessive delay in sowing [122]. In the works of Knapowski et al. [92] and Caglar et al. [105], delayed sowing decreased the water absorption of flour by 1.1 and 3.9%p, respectively. The sowing density has a weak influence on the water absorption capacity of flour [[123–126] and present study, Table 1], most likely due to the minor effect of this agronomic practice on the protein and starch contents of grain [127–129]. The only study where a higher sowing density increased the water absorption capacity of flour (by 2%) was conducted in northeastern China by Hao et al. [111]. The increase in the water absorption capacity observed by the cited authors [111] could be due to a beneficial influence of a higher seeding rate on the starch content of wheat grain. The higher the starch content of wheat flour, the greater its ability to absorb water during dough mixing [130,131]. Therefore, more water may be required to achieve the optimum dough consistency when using wheat flours with a higher starch content [120]. Split and late N applications can increase the water absorption capacity of flour [64,65,123]. Xue et al. [65] found that the water absorption capacity of flour increased by 3%p when the total N rate was applied in three splits (BBCH 00, BBCH 30, and BBCH 45) rather than two splits (BBCH 00 and BBCH 30). In turn, Blandino et al. [64] reported that foliar N application during flowering (5 kg ha^{-1}) and soil N application at the beginning of heading (40 kg ha^{-1}) increased the water absorption capacity of flour by 2% and 4%, respectively. In the current study and in the work of Warechowska et al. [52], split N application had no effect on the water absorption capacity of flour. In the work of Warechowska et al. [52] and in the present study, the absence of correlations between N splitting and the water absorption capacity of flour could be attributed to the relatively low total protein content of winter wheat grain (128–139 and 129–132 g kg^{-1} DM, respectively) as well as the weak effect of N fertilization on the protein content of grain (± 3 –5 and 2%, respectively). In a study by Blandino et al. [64], the total protein content of wheat grain was 4–9% higher, and N fertilization induced much greater differences in this parameter ($\pm 8\%$) than in the work of Warechowska et al. [52] and the present study.

4.2. Rheological Properties of Dough and Bread Quality

In the present study, delayed sowing (+28 days) increased the dough development time by 6%. A similar relationship between the sowing date and dough development time was reported by Zhang et al. [119] in China. The influence of sowing density on the dough development time appears to be more ambiguous. Gawęda et al. [126] did not observe changes in the dough development time in response to an increase in the sowing density. In the current study, conducted in northeastern Poland, the sowing density of winter wheat did not induce significant differences in the time of dough development. In turn, Han and Yang [124] and Hao et al. [111] found that a higher sowing density shortened the dough development time. In the work of Zhang et al. [119], the dough development time was influenced by the interaction between the sowing density and N rate. In their study, an increase in the sowing density shortened the dough development time in the absence of N fertilization, but the N rate of 240 kg ha^{-1} prolonged dough development. Jankowski et al. [43] also found that an increase in the spring N rate prolonged dough development by 38%. Blandino et al. [64] demonstrated that late N application had a positive impact on dough development. In their study, a supplemental N rate of 40 kg ha^{-1} applied at the beginning of heading prolonged dough development by 49%, whereas foliar N applied during full flowering prolonged dough development by 32%. In the present

study, splitting the N fertilizer rate had no significant influence on the dough development time. According to Jankowski et al. [43] and Blandino et al. [64], N fertilization prolonged the dough development time mainly due to an increase in the total N rate. In the present study, the spring N rate was constant (140 kg ha^{-1}), but N was applied in different splits, which could explain the absence of variations in the dough development time.

In the current experiment, the dough stability was strongly influenced by the sowing date, sowing density, and split spring N rate. The dough stability was highest when winter wheat was sown late (+28 days) at the highest density ($400 \text{ grains m}^{-2}$) and supplied with $100 + 40 \text{ kg N ha}^{-1}$. In the work of Zhang et al. [119], the dough stability increased by 17% when sowing was delayed by 50 days. In turn, Dong et al. [93] reported that early sowing, a high sowing density, and a high N rate applied in FN had a positive impact on dough stability. Contrary to Zhang et al. [119] and the present study, Hao et al. [111] and Soofizada et al. [73] found that an increase in the sowing density had a negative effect on the dough stability. In the work of Zhang et al. [132], the effect of the sowing density on dough stability was determined by the N rate. The cited authors found that the dough stability increased with a rise in the sowing density only in response to a high N rate (240 kg ha^{-1}). The dough stability was also affected by the sowing density in the experiment performed by Han and Yang [124], where an increase in the sowing density from 90 to $270 \text{ grains m}^{-2}$ decreased the dough stability time by 16%. Zhang et al. [119] reported that the dough stability time was prolonged by 42% in response to an N rate of 240 kg ha^{-1} relative to the treatment without N fertilization. Jankowski et al. [43] also demonstrated that the dough stability was nearly three times higher in a high-input production technology of winter wheat. In contrast, Rodrihero [18], Blandino et al. [64], Souza et al. [56], Xue et al. [65], Keres et al. [62], and Cesevičienė et al. [68] did not report any correlations between N fertilization and dough stability.

Zhang et al. [119] found that the degree of dough softening decreased with a delay in sowing, which was also observed in the present study. A relationship between the sowing density and degree of dough softening was not noted in this experiment. The degree of dough softening was not affected by the sowing density in the work of Biel et al. [104] either. Gawęda et al. [123] observed that the degree of dough softening was strongly influenced by the interaction between the sowing density and weather conditions. In their study, a higher sowing density increased the degree of dough softening only in a year characterized by low total precipitation in June. The effect of N fertilization on the degree of dough softening is ambiguous [[62,133,134]; present study, Table 2]. In the work of Keres et al. [62] and in this study, N fertilization did not affect the degree of dough softening. In turn, Kunkulberga et al. [134] reported an increase in the degree of dough softening with an increase in the N rate, whereas Fleitas et al. [133] found that the degree of dough softening decreased in response to higher N rates. In a study by Jankowski et al. [43], the degree of dough softening decreased by 27% in a high-input production technology of winter wheat grain.

The crumb density and bread loaf volume are largely responsible for the taste of bread [38,39]. Consumers have a preference for bread with a large loaf volume and low crumb density [40]. Crumb density is a parameter that describes bread porosity, and it is associated with the properties of gluten [135]. In the present study, bread quality evaluated based on the crumb density and loaf volume was influenced significantly only by the sowing date and sowing density. The crumb density was lower (0.24 g cm^{-3}) when winter wheat was sown in mid-September (+14 days). Delayed sowing decreased the crumb density, because wheat plants were exposed to higher mean daily temperatures during grain ripening. In turn, the loaf volume peaked (347 cm^3) when winter wheat was sown at $400 \text{ grains m}^{-2}$. Knapowski et al. [136] found no relationship between the bread loaf volume and the sowing date of wheat. In contrast, Dong et al. [93] demonstrated that bread made from flour obtained from the grain of early-sown wheat was characterized by the largest loaf volume (808 cm^3). The loaf volume decreased by 11% when sowing was delayed by 21 days. In a study by Zhang et al. [132], the bread loaf volume increased by 7% when the sowing density was increased from 120 to $240 \text{ grains m}^{-2}$. The wheat sowing

density had a beneficial influence on the bread loaf volume in the work of Dong et al. [93], whereas no correlation between these parameters was noted by Guerrini et al. [66]. Nitrogen fertilization of wheat increases the bread loaf volume [93,137] but has an undesirable effect on the crumb density (by decreasing porosity) [66]. In the present study, split spring N application had no effect on the bread quality. The study demonstrated that the ash content of flour influences the bread quality. An increase in the ash content decreased the bread loaf volume and increased the crumb density. Nitrogen splitting did not induce differences in the ash content of flour, which could explain why this parameter had no effect on the bread quality.

5. Conclusions

The baking quality of flour was determined mainly by the sowing date, which influenced the highest number of the analyzed quality parameters. The quality attributes of wheat flour were less affected by the sowing density and split spring N rate. Flour of a higher baking quality was obtained from the grain of winter wheat sown between mid-September and early October (with a delay of 14 and 28 days). Delayed sowing increased the total protein content and water absorption capacity of flour and improved the dough development time, dough stability, and degree of softening. Delayed sowing decreased the crumb density (a desirable trait) without compromising the bread loaf volume. The highest sowing density of 400 grains m^{-2} improved the color of flour (without decreasing the crude ash content), dough stability, and bread loaf volume. The total protein content of flour peaked when a portion of the split spring N rate was 40 + 100 kg ha^{-1} . In turn, an increase in the N rate in FT (100 + 40 kg ha^{-1}) had the most beneficial influence on the color of flour and dough stability. The flour quality, rheological properties of dough, and bread quality were determined mainly by the crude ash content of the flour. A low ash content was accompanied by a decrease in the total protein content and water absorption capacity of flour. However, a low crude ash content had a positive effect on the flour color, dough stability, degree of dough softening, bread loaf volume, and crumb density. Therefore, agronomic treatments that decrease the ash content of flour may contribute to improving bread quality by exerting a beneficial influence on the rheological properties of dough. Sowing winter wheat at 400 grains m^{-2} with a delay of 14 or 28 days and the application of 100 + 40 kg N ha^{-1} in the FT stage and in the FN stage, respectively, decreased the crude ash content of flour.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/app14125167/s1>, Table S1. Chemical properties of the analyzed soil; Table S2. Production technology of winter wheat; Table S3. Weather conditions during the growing seasons of winter wheat in 2018–2021 and the long-term average (1981–2015) at the experimental site in the AES in Bałcyny (PM Ecology automatic weather station; PM Ecology Ltd., Gdynia, Poland); Table S4. Phenological development of winter wheat and weather conditions (2018/2019, 2019/2020, and 2020/2021); Table S5. *F*-test statistics in ANOVA; Table S6. Pearson's correlation coefficients denoting the relationships between wheat flour parameters.

Author Contributions: Conceptualization, K.L. and K.J.J.; methodology, K.L. and K.J.J.; software, K.L.; validation, K.L.; formal analysis, K.L.; investigation, K.L.; resources, K.L.; data curation, K.L.; writing—original draft preparation, K.L.; writing—review and editing, K.L. and K.J.J.; visualization, K.L.; supervision, K.J.J.; project administration, K.L. and K.J.J.; funding acquisition, K.J.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The results presented in this paper were obtained as part of a comprehensive study financed by the University of Warmia and Mazury in Olsztyn (grant No. 30.610.013–110), funded by the Minister of Science under “the Regional Initiative of Excellence Program”.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The original contributions presented in the study are included in the article, further inquiries can be directed to the corresponding author.

Acknowledgments: We would like to thank the staff of the AES in Balcyny for their technical support during the experiment.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

- Godfray, H.C.J.; Beddington, J.R.; Crute, I.R.; Haddad, L.; Lawrence, D.; Muir, J.F.; Pretty, J.; Robinson, S.; Thomas, S.M.; Toulmin, C. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science* **2010**, *327*, 812–818. [\[CrossRef\]](#)
- Foley, J.A.; Ramankutty, N.; Brauman, K.A.; Cassidy, E.S.; Gerber, J.S.; Johnston, M.; Mueller, N.D.; O'Connell, C.; Ray, D.K.; West, P.C.; et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature* **2011**, *478*, 337–342. [\[CrossRef\]](#)
- Ray, D.K.; Mueller, N.D.; West, P.C.; Foley, J.A. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS ONE* **2013**, *8*, e66428. [\[CrossRef\]](#)
- Fischer, E.M.; Sedláček, J.; Hawkins, E.; Knutti, R. Models agree on forced response pattern of precipitation and temperature extremes. *Geophys. Res. Lett.* **2014**, *41*, 8554–8562. [\[CrossRef\]](#)
- Islam, S.M.F.; Karim, Z. World's demand for food and water: The consequences of climate change. In *Desalination-Challenges and Opportunities*; Farahani, M.H.D.A., Vatanpour, V., Taheri, A., Eds.; IntechOpen: London, UK, 2019; pp. 225–240.
- Shiferaw, B.; Smale, M.; Braun, H.J.; Duveiller, E.; Reynolds, M.; Muricho, G. Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Secur.* **2013**, *5*, 291–317. [\[CrossRef\]](#)
- Bernas, J.; Koppensteiner, L.J.; Tichá, M.; Kaul, H.P.; Klimek-Kopyra, A.; Euteneuer, P.; Moitzi, G.; Neugschwandtner, R.W. Optimal environmental design of nitrogen application rate for facultative wheat using life cycle assessment. *Eur. J. Agron.* **2023**, *146*, 126813. [\[CrossRef\]](#)
- Jaskulska, I.; Jaskulski, D.; Gałęzewski, L.; Knapowski, T.; Kozera, W.; Waclawowicz, R. Mineral composition and baking value of winter wheat grain under varied environmental and agronomic conditions. *J. Chem.* **2018**, *2018*, 5013825. [\[CrossRef\]](#)
- Jarecki, W.; Czernicka, M. Yield and quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) depending on multi-component foliar fertilization. *J. Elem.* **2022**, *27*, 559–567. [\[CrossRef\]](#)
- Jarecki, W. Effects of sowing date variation on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) quality and grain yield. *J. Elem.* **2023**, *28*, 1089–1100. [\[CrossRef\]](#)
- Šramková, Z.; Gregova, E.; Šturdik, E. Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. *Acta Chim. Slovaca* **2009**, *2*, 115–138.
- Al-Saleh, A.; Brennan, C.S. Bread wheat quality: Some physical, chemical and rheological characteristics of Syrian and English bread wheat samples. *Foods* **2012**, *1*, 3–17. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Budzyński, W. Common wheat. In *Wheats—Common, Spelt, Durum. Cultivation and Uses*; Budzyński, W., Ed.; PWRiL: Poznań, Poland, 2012; 328p. (In Polish)
- Barak, S.; Mudgil, D.; Khatkar, B.S. Biochemical and functional properties of wheat gliadins: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2015**, *55*, 357–368. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Podolska, G.; Aleksandrowicz, E.; Szafrńska, A. Bread making potential of *Triticum aestivum* and *Triticum spelta* species. *Open Life Sci.* **2020**, *15*, 30–40. [\[CrossRef\]](#)
- Rothkaehl, J. Wheat grain for human consumption—Marketing and processing. In *Wheats—Common, Spelt, Durum. Cultivation and Uses*; Budzyński, W., Ed.; PWRiL: Poznań, Poland, 2012; pp. 235–264. (In Polish)
- Zhai, S.; Liu, J.; Xu, D.; Wen, W.; Yan, J.; Zhang, P.; Wan, Y.; Cao, S.; Hao, Y.; Xia, X. A Genome-wide association study reveals a rich genetic architecture of flour color-related traits in bread wheat. *Front. Plant Sci.* **2018**, *9*, 1136. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Rodrighero, M.B.; Caires, E.F.; Lopes, R.B.; Zielinski, A.A.; Granato, D.; Demiate, I.M. Wheat technological quality as affected by nitrogen fertilization under a no-till system. *Acta Sci. Technol.* **2015**, *37*, 175–181. [\[CrossRef\]](#)
- Yildirim, A.; Atasoy, A. Quality characteristics of some durum wheat varieties grown in the Southeastern Anatolia Region of Turkey (GAP). *Harran J. Agric. Food Sci.* **2020**, *24*, 420–431. [\[CrossRef\]](#)
- Wei, Y. *Cereal and Food Quality*; Shanxi People Press: Taiyuan, China, 2002.
- Kulkarni, S.D.; Acharya, R.; Nair, A.G.C.; Rajurkar, N.S.; Reddy, A.V.R. Determination of elemental concentration profiles in tender wheatgrass (*Triticum aestivum* L.) using instrumental neutron activation analysis. *Food Chem.* **2006**, *95*, 699–707. [\[CrossRef\]](#)
- Piironen, V.; Salmenkallio-Marttila, M. Micronutrients and phytochemicals in wheat grain. In *Wheat: Chemistry and Technology*; American Association of Cereal Chemists: St Paul, MN, USA, 2009; pp. 179–222.
- Czaja, T.; Sobota, A.; Szostak, R. Quantification of ash and moisture in wheat flour by Raman spectroscopy. *Foods* **2020**, *9*, 280. [\[CrossRef\]](#)
- Zhygunov, D.; Barkovska, Y.; Yehorshyn, Y.; Zhyhunova, H.; Barikian, K. Type 600 wheat-spelt, flour with improved bakery properties. *Food Sci. Technol.* **2020**, *14*, 53–62. [\[CrossRef\]](#)
- Li, Y.Q.; Zhu, R.J.; Tian, J.C. Influence of wheat protein contents and fractions on dough rheological properties as determined by using a reconstitution method. *Agric. Sci. China* **2008**, *7*, 395–404. [\[CrossRef\]](#)

26. Trevisan, S.; Khorshidi, A.S.; Scanlon, M.G. Relationship between nitrogen functionality and wheat flour dough rheology: Extensional and shear approaches. *Food Res. Int.* **2022**, *162*, 112049. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
27. Cichoń, Z.; Ptak, M. Analysis of the quality of selected wheat flour types. *Zesz. Nauk. Akad. Ekon. Krakowie* **2005**, *678*, 89–102. (In Polish)
28. Simón, M.R.; Fleitas, M.C.; Castro, A.C.; Schierenbeck, M. How foliar fungal diseases affect nitrogen dynamics, milling, and end-use quality of wheat. *Front. Plant Sci.* **2020**, *11*, 569401. [[CrossRef](#)]
29. Ellmann, T. Effect of plant protection, nitrogen fertilization and date of harvest on yield of winter wheat. *Fragm. Agron.* **2011**, *28*, 15–25.
30. Fu, B.X.; Wang, K.; Dupuis, B. Predicting water absorption of wheat flour using high shear-based GlutoPeak test. *J. Cereal Sci.* **2017**, *76*, 116–121. [[CrossRef](#)]
31. Pühr, D.P.; D'apponia, B.L. Effect of baking absorption on bread yield, crumb moisture, and crumb water activity. *Cereal Chem.* **1992**, *69*, 582.
32. Guttieri, M.J.; Bowen, D.; Gannon, D.; O'Brien, K.; Souza, E. Solvent retention capacities of irrigated soft white spring wheat flours. *Crop Sci.* **2001**, *41*, 1054–1061. [[CrossRef](#)]
33. Li, J.; Zhu, Y.; Yadav, M.P.; Li, J. Effect of various hydrocolloids on the physical and fermentation properties of dough. *Food Chem.* **2019**, *271*, 165–173. [[CrossRef](#)]
34. Marchetti, L.; Cardós, M.; Campaña, L.; Ferrero, C. Effect of glutens of different quality on dough characteristics and breadmaking performance. *LWT-Food Sci. Technol.* **2012**, *46*, 224–231. [[CrossRef](#)]
35. Amjid, M.R.; Shehzad, A.; Hussain, S.; Shabbir, M.A.; Khan, M.R.; Shoaib, M. A comprehensive review on wheat flour dough rheology. *Pak. J. Food Sci.* **2013**, *23*, 105–123.
36. Aydoğan, S.; Şahin, M.; Akçacık, A. Relationships between farinograph parameters and bread volume, physicochemical traits in bread wheat flours. *Crop Sci.* **2015**, *3*, 14–18.
37. Menkinoska, M.; Blazhevskaja, T.; Stamatovsk, V. Determination of rheological properties with farinograf and extensigraf of bio-fortified flour. *Proc. Univ. Ruse* **2018**, *57*, 22–25.
38. Różyło, R.; Laskowski, J.; Dziński, D. Physical properties of wheat bread baked from dough with different parameters. *Acta Agrophys.* **2011**, *18*, 421–430. (In Polish)
39. Dziński, D.; Siastala, M.; Laskowski, J. Changes in physical properties of wheat bread as a result of soy flour addition. *Acta Agrophys.* **2010**, *15*, 91–100. (In Polish)
40. Sahi, S.S.; Little, K.; Ananingsih, V.K. Quality control. In *Bakery Products Science and Technology*; John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, UK, 2014; pp. 489–509.
41. Švec, I.; Hrušková, M. Modelling of wheat, flour, and bread quality parameters. *Sci. Agric. Bohem.* **2009**, *40*, 58–66.
42. Muste, S.; Modoran, C.; Man, S.; Mureşan, V.; Birou, A. The influence of wheat genotype on its quality. *J. Agroaliment. Process. Technol.* **2010**, *16*, 99–103.
43. Jankowski, K.J.; Budzyński, W.S.; Kijewski, Ł.; Dubis, D.; Lemański, M. Flour quality, the rheological properties of dough and the quality of bread made from the grain of winter wheat grown in a continuous cropping system. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2014**, *13*, 3–18.
44. Jankowski, K.J.; Kijewski, L.; Dubis, B. Milling quality and flour strength of the grain of winter wheat grown in monoculture. *Rom. Agric. Res.* **2015**, *32*, 191–200.
45. Szafrńska, A.; Cacak-Pietrzak, G.; Sułek, A. Influence of nitrogen fertilization and retardants on the baking value of winter wheat. *Electron. J. Pol. Agric. Univ. EJPAU Agron.* **2008**, *11*, 28.
46. Sułek, A.; Cacak-Pietrzak, G.; Wyzinska, M.; Nieróbca, A. influence of nitrogen fertilization on the yields and grain quality of winter wheat under different environmental conditions. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* **2019**, *13*, 127–133.
47. Geisslitz, S.; Longin, C.F.H.; Scherf, K.A.; Koehler, P. Comparative study on gluten protein composition of ancient (einkorn, emmer and spelt) and modern wheat species (durum and common wheat). *Foods* **2019**, *8*, 409. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
48. Andersson, A.; Johansson, E.; Oscarson, P. Nitrogen redistribution from the roots in post-anthesis plants of spring wheat. *Plant Soil* **2005**, *269*, 321–332. [[CrossRef](#)]
49. Andersson, A.; Johansson, E. Nitrogen partitioning in entire plants of different spring wheat cultivars. *J. Agron. Crop Sci.* **2006**, *192*, 121–131. [[CrossRef](#)]
50. Stankowski, S.; Rutkowska, A. Winter wheat grain and flour quality traits as affected by the nitrogen fertilization dose and date. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2006**, *5*, 53–61. (In Polish)
51. Rozbicki, J.; Ceglińska, A.; Gozdowski, D.; Jakubczak, M.; Cacak-Pietrzak, G.; Mądry, W.; Golba, J.; Piechociński, M.; Sobczyński, M.; Studnicki, M.; et al. Influence of the cultivar, environment and management on the grain yield and bread-making quality in winter wheat. *J. Cereal Sci.* **2015**, *61*, 126–132. [[CrossRef](#)]
52. Warechowska, M.; Stępień, A.; Wojtkowiak, K.; Nawrocka, A. The impact of nitrogen fertilization strategies on selected qualitative parameters of spring wheat grain and flour. *Pol. J. Nat. Sci.* **2019**, *34*, 199–212.
53. Souza, E.J.; Martin, J.M.; Guttieri, M.J.; O'Brien, K.M.; Habernicht, D.K.; Lanning, S.P.; McLean, R.; Carlson, G.R.; Talbert, L.E. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality. *Crop Sci.* **2004**, *44*, 425–432. [[CrossRef](#)]
54. Dennett, A.L.; Trethowan, R.M. Milling efficiency of triticale grain for commercial flour production. *J. Cereal Sci.* **2013**, *57*, 527–530. [[CrossRef](#)]

55. Joubert, M.; Lullien-Pellerin, V.; Morel, M.H. Impact of durum wheat grain composition on semolina yield and pasta quality. In Proceedings of the 15th European Young Cereal Scientists and Technologists Workshop (EYCSTW), Milan/Bergamo, Italy, 26 April 2016.
56. Souza, T.M.; Prando, A.M.; de Miranda, M.Z.; Hirooka, E.Y.; Zucareli, C. Kernel chemical composition and flour quality of wheat in response to nitrogen sources and doses. *Rev. Agrar.* **2019**, *12*, 528–541. [\[CrossRef\]](#)
57. Siddiqi, R.A.; Singh, T.P.; Rani, M.; Sogi, D.S.; Bhat, M.A. Diversity in grain, flour, amino acid composition, protein profiling, and proportion of total flour proteins of different wheat cultivars of North India. *Front. Nutr.* **2020**, *7*, 141. [\[CrossRef\]](#)
58. Banach, J.K.; Majewska, K.; Żuk-Golaszewska, K. Effect of cultivation system on quality changes in durum wheat grain and flour produced in North-Eastern Europe. *PLoS ONE* **2021**, *16*, e0236617. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
59. Hong, S.; Park, J.; Lee, G.E.; Yoon, Y.M.; Kang, C.S.; Park, C.S. Effects of nitrogen fertilization on α -free, Korean wheat cultivar reduced ω -5 gliadin, on agronomic traits and noodle properties. *Korean Soc. Breed. Sci.* **2023**, *55*, 126–136. [\[CrossRef\]](#)
60. Saint Pierre, C.; Peterson, C.J.; Ross, A.S.; Ohm, J.B.; Verhoeven, M.C.; Larson, M.; Hoefer, B. White wheat grain quality changes with genotype, nitrogen fertilization, and water stress. *Agron. J.* **2008**, *100*, 414–420. [\[CrossRef\]](#)
61. Valdés Valdés, C.; Estrada-Campuzano, G.; Martínez Rueda, C.G.; Domínguez López, A.; Solís-Moya, E.; Villanueva Carvajal, A. Grain and flour wheat quality modified by genotype, availability of nitrogen, and growing season. *Int. J. Agron.* **2020**, *2020*, 1974083. [\[CrossRef\]](#)
62. Keres, I.; Alarú, M.; Koppel, R.; Altosaar, I.; Tosens, T.; Loit, E. The combined effect of nitrogen treatment and weather conditions on wheat protein-starch interaction and dough quality. *Agriculture* **2021**, *11*, 1232. [\[CrossRef\]](#)
63. Majewska, K. Classification and synthesis of wheat grain gluten proteins. *Żyw. Nauk. Technol. Jakość* **1999**, *6*, 15–25. (In Polish)
64. Blandino, M.; Marinaccio, F.; Reyneri, A. Effect of late-season nitrogen fertilization on grain yield and on flour rheological quality and stability in common wheat, under different production situations. *Ital. J. Agron.* **2016**, *11*, 107–113. [\[CrossRef\]](#)
65. Xue, C.; Matros, A.; Mock, H.P.; Mühling, K.H. Protein composition and baking quality of wheat flour as affected by split nitrogen application. *Front. Plant Sci.* **2019**, *10*, 642. [\[CrossRef\]](#)
66. Guerrini, L.; Napoli, M.; Mancini, M.; Masella, P.; Cappelli, A.; Parenti, A.; Orlandini, S. Wheat grain composition, dough rheology, and bread quality as affected by nitrogen and sulfur fertilization and seeding density. *Agronomy* **2020**, *10*, 233. [\[CrossRef\]](#)
67. Jańczak-Pieniążek, M.; Buczek, J.; Jarecki, W.; Bobrecka-Jamro, D. Effect of high nitrogen doses on yield, quality, and chemical composition of grain of winter wheat cultivars. *J. Elem.* **2020**, *25*, 1005–1017.
68. Cesevičienė, J.; Gorash, A.; Liatukas, Ž.; Armonienė, R.; Ruzgas, V.; Statkevičiūtė, G.; Jaškūnė, K.; Brazauskas, G. Grain yield performance and quality characteristics of waxy and non-waxy winter wheat cultivars under high and low-input farming systems. *Plants* **2022**, *11*, 882. [\[CrossRef\]](#)
69. Zende, N.B.; Sethi, H.N.; Karunakar, A.P.; Jiotode, D.J. Effect of sowing time and fertility levels on yield and quality of durum wheat genotypes. *Res. Crops* **2005**, *6*, 194–196.
70. Otteson, B.N.; Mergoum, M.; Ransom, J.K. Seeding rate and nitrogen management on milling and baking quality of hard red spring wheat genotypes. *Crop Sci.* **2008**, *48*, 749–755. [\[CrossRef\]](#)
71. Caglar, O.; Bulut, S.; Karaoglu, M.M.; Kotancilar, H.G.; Ozturk, A. Quality response of facultative wheat to winter sowing, freezing sowing and spring sowing at different seeding rates. *J. Anim. Vet. Adv.* **2011**, *10*, 3368–3374. [\[CrossRef\]](#)
72. Zecevic, V.; Boskovic, J.; Knezevic, D.; Micanovic, D. Effect of seeding rate on grain quality of winter wheat. *Chil. J. Agric. Res.* **2014**, *74*, 23–28. [\[CrossRef\]](#)
73. Soofizada, Q.; Pescatore, A.; Guerrini, L.; Fabbri, C.; Mancini, M.; Orlandini, S.; Napoli, M. Effects of nitrogen plus sulfur fertilization and seeding density on yield, rheological parameters, and asparagine content in old varieties of common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy* **2022**, *12*, 351. [\[CrossRef\]](#)
74. Wilcox, J.; Makowski, D. A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies. *Field Crops Res.* **2014**, *156*, 180–190. [\[CrossRef\]](#)
75. Pakrooh, P.; Kamal, M.A. Modeling the potential impacts of climate change on wheat yield in Iran: Evidence from national and provincial data analysis. *Ecol. Model.* **2023**, *486*, 110513. [\[CrossRef\]](#)
76. Farooq, A.; Farooq, N.; Akbar, H.; Hassan, Z.U.; Gheewala, S.H. A critical review of climate change impact at a global scale on cereal crop production. *Agronomy* **2023**, *13*, 162. [\[CrossRef\]](#)
77. Zahra, N.; Hafeez, M.B.; Wahid, A.; Al Masruri, M.H.; Ullah, A.; Siddique, K.H.; Farooq, M. Impact of climate change on wheat grain composition and quality. *J. Sci. Food Agric.* **2023**, *103*, 2745–2751. [\[CrossRef\]](#)
78. Nória Júnior, R.d.S.; Deswarte, J.-C.; Cohan, J.-P.; Martre, P.; van Der Velde, M.; Lecerf, R.; Webber, H.; Ewert, F.; Ruane, A.C.; Slafer, G.A.; et al. The extreme 2016 wheat yield failure in France. *Glob. Chang. Biol.* **2023**, *29*, 3130–3146. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
79. Ainsworth, E.A.; Ort, D.R. How do we improve crop production in a warming world? *Plant Physiol.* **2010**, *154*, 526–530. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
80. Xiao, D.; Tao, F.; Liu, Y.; Shi, W.; Wang, M.; Liu, F.; Shuai, Z.; Zhu, Z. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981–2009. *Int. J. Biometeorol.* **2013**, *57*, 275–285. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
81. Xiao, D.; Moiwu, J.P.; Tao, F.; Yang, Y.; Shen, Y.; Xu, Q.; Liu, J.; Liu, F. Spatiotemporal variability of winter wheat phenology in response to weather and climate variability in China. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* **2015**, *20*, 1191–1202. [\[CrossRef\]](#)

82. Kusunose, Y.; Rossi, J.J.; van Sanford, D.A.; Alderman, F.D.; Anderson, J.A.; Chai, Y.; Gerullis, M.K.; Jagadish, S.V.K.; Paul, P.A.; Tack, S.B.; et al. Sustaining productivity gains in the face of climate change: A research agenda for US wheat. *Glob. Chang. Biol.* **2023**, *29*, 926–934. [\[CrossRef\]](#)
83. Qiao, S.; Harrison, S.P.; Prentice, I.C.; Wang, H. Optimality-based modelling of wheat sowing dates globally. *Agric. Syst.* **2023**, *206*, 103608. [\[CrossRef\]](#)
84. Alignan, M.; Roche, J.; Bouniols, A.; Cerny, M.; Mouloungui, Z.; Merah, O. Effects of genotype and sowing date on phytostanol-phytosterol content and agronomic traits in wheat under organic agriculture. *Food Chem.* **2009**, *117*, 219–225. [\[CrossRef\]](#)
85. Ahmed, M.; Hassan, F. Response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) quality traits and yield to sowing date. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0126097. [\[PubMed\]](#)
86. Guzmán, C.; Autrique, J.E.; Mondal, S.; Singh, R.P.; Govindan, V.; Morales-Dorantes, A.; Posadas-Romano, G.; Crossa, J.; Ammar, K.; Peña, R.J. Response to drought and heat stress on wheat quality, with special emphasis on bread-making quality, in durum wheat. *Field Crops Res.* **2016**, *186*, 157–165. [\[CrossRef\]](#)
87. Tahir, I.S.; Nakata, N.; Ali, A.M.; Mustafa, H.M.; Saad, A.S.I.; Takata, K.; Ishikawa, N.; Abdalla, O.S. Genotypic and temperature effects on wheat grain yield and quality in a hot irrigated environment. *Plant Breed.* **2006**, *125*, 323–330. [\[CrossRef\]](#)
88. Li, Y.F.; Wu, Y.; Hernandez-Espinosa, N.; Peña, R.J. Heat and drought stress on durum wheat: Responses of genotypes, yield, and quality parameters. *J. Cereal Sci.* **2013**, *57*, 398–404. [\[CrossRef\]](#)
89. Johansson, E.; Kuktaite, R.; Andersson, A.; Prieto-Linde, M.L. Protein polymer build-up during wheat grain development: Influences of temperature and nitrogen timing. *J. Sci. Food Agric.* **2005**, *85*, 473–479. [\[CrossRef\]](#)
90. Labuschagne, M.T.; Elago, O.; Koen, E. The influence of temperature extremes on some quality and starch characteristics in bread, biscuit and durum wheat. *J. Cereal Sci.* **2009**, *9*, 84–189. [\[CrossRef\]](#)
91. Hrušková, M.; Švec, I. Wheat hardness in relation to other quality factors. *Czech J. Food Sci.* **2009**, *27*, 240–248. [\[CrossRef\]](#)
92. Knapowski, T.; Ropińska, P.; Kazek, M.; Wenda-Piesik, A. Flour and bread quality of spring wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) sown at facultative and spring sowing dates. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2018**, *17*, 133–142.
93. Dong, S.; Zhang, X.; Chu, J.; Zheng, F.; Fei, L.; Dai, X.; He, M. Optimized seeding rate and nitrogen topdressing ratio for simultaneous improvement of grain yield and bread-making quality in bread wheat sown on different dates. *J. Sci. Food Agric.* **2021**, *102*, 360–369. [\[CrossRef\]](#)
94. Lachutta, K.; Jankowski, K.J. An agronomic efficiency analysis of winter wheat at different sowing strategies and nitrogen fertilizer rates: A case study in northeastern Poland. *Agriculture* **2024**, *14*, 442. [\[CrossRef\]](#)
95. Lachutta, K.; Jankowski, K.J. The quality of winter wheat grain at different sowing strategies and nitrogen fertilizer rates: A case study in northeastern Poland. *Agriculture* **2024**, *14*, 552. [\[CrossRef\]](#)
96. PN-EN ISO 5530-1:2015-01; Wheat Flour—Physical Characteristics of Doughs. Part 1. Determination of Water Absorption and Rheological Properties Using a Farinograph. Polish Committee for Standardization: Warszawa, Poland, 2015. (In Polish)
97. Klockiewicz-Kamińska, E.; Brzeziński, W.J. Method of evaluation and quality-based classification of cultivars. *Wiadomości Odmianozn.* **1997**, *67*, 3–18. (In Polish)
98. TIBCO Software Inc. *Statistica (Data Analysis Software System), Version 13*; TIBCO Software Inc.: Palo Alto, CA, USA, 2017.
99. Ozturk, A.; Aydin, F. Effect of water stress at various growth stages on some quality characteristics of winter wheat. *J. Agron. Crop Sci.* **2004**, *190*, 93–99. [\[CrossRef\]](#)
100. Egesel, C.O.; Kahriman, F.S.T.L.; Baytekin, H. Interrelationships of flour quality traits with grain yield in bread wheat and choosing suitable cultivars. *Anadolu J. Agric. Sci.* **2009**, *24*, 76–83.
101. Adeel, M.; Nazir, A.; Aziz, H. Impact of sowing dates and terminal heat stress on wheat grain flour physical and chemical properties. *Jammu Kashmir J. Agric.* **2022**, *2*, 25–34. [\[CrossRef\]](#)
102. Garrido-Lestache, E.; López-Bellido, R.J.; López-Bellido, L. Effect of N rate, timing, and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crops Res.* **2004**, *85*, 213–236. [\[CrossRef\]](#)
103. Munsif, F.; Arif, M.; Ali, K.; Jan, M.T.; Khan, M.J. Influence of planting dates on grain quality of different wheat cultivars in dual-purpose system. *Int. J. Agric. Biol.* **2015**, *17*, 945–952. [\[CrossRef\]](#)
104. Biel, W.; Stankowski, S.; Sobolewska, M.; Sadkiewicz, J.; Jaroszewska, A.; Puzyński, S. Effect of selected agronomic factors on the baking quality of winter spelt strains and cultivars (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L.) in comparison with common wheat (*Triticum aestivum* ssp. *vulgare*). *Rom. Agric. Res.* **2016**, *33*, 251–258.
105. Caglar, O.; Yildiz, G.; Karaoglu, M.M.; Ozturk, A.; Bulut, S. The effects of sowing times and seeding rates on the farinograph parameters and color of facultative kirik wheat. *Fresenius Environ. Bull.* **2023**, *32*, 2918–2924.
106. Wieser, H. Chemistry of gluten proteins. *Food Microbiol.* **2007**, *24*, 15–119. [\[CrossRef\]](#)
107. Bagulho, A.S.; Costa, R.; Almeida, A.S.; Pinheiro, N.; Moreira, J.; Gomes, C.; Coco, J.; Costa, A.; Coutinho, J.; Maças, B. Influence of year and sowing date on bread wheat quality under Mediterranean conditions. *Emir. J. Food Agric.* **2015**, *27*, 186–199. [\[CrossRef\]](#)
108. Balla, K.; Veisz, O. Changes in the quality of cereals in response to heat and drought stress. *Acta Agron. Óvar.* **2007**, *49*, 451–455.
109. Geleta, B.; Atak, M.; Baenziger, P.S.; Nelson, L.A.; Baltenesperger, D.D.; Eskridge, K.M.; Shipman, M.J.; Shelton, D.R. Seeding rate and genotype effect on agronomic performance and end-use quality of winter wheat. *Crop Sci.* **2002**, *42*, 827–832.

110. Mikos-Szymańska, M.; Podolska, G. The effects of sowing date and seeding rate on spelt and common wheat protein composition and characteristics. *Qual. Assur. Saf. Crops Foods* **2016**, *8*, 289–300. [\[CrossRef\]](#)
111. Hao, R.; Noor, H.; Wang, P.; Sun, M.; Noor, F.; Ullah, S.; Gao, Z. Combined effects of starch sucrose content and planting density on grain protein content of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Food Nutr. Res.* **2022**, *10*, 321–331.
112. Madan, H.S.; Munjal, R. Effect of split doses of nitrogen and seed rate on protein content, protein fractions and yield of wheat. *J. Agric. Biol. Sci.* **2009**, *4*, 26–31.
113. Johansson, E.; Prieto-Linde, M.L.; Svensson, G. Influence of nitrogen application rate and timing on grain protein composition and gluten strength in Swedish wheat cultivars. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **2004**, *167*, 345–350. [\[CrossRef\]](#)
114. Rossmann, A.; Pitann, B.; Mühling, K.H. Splitting nitrogen applications improves wheat storage protein composition under low N supply. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **2019**, *182*, 347–355. [\[CrossRef\]](#)
115. Luo, C.; Branlard, G.; Griffin, W.B.; McNeil, D.L. The effect of nitrogen and sulphur fertilisation and their interaction with genotype on wheat glutenins and quality parameters. *J. Cereal Sci.* **2000**, *31*, 185–194. [\[CrossRef\]](#)
116. Haile, D.; Nigussie, D.; Ayana, A. Nitrogen use efficiency of bread wheat: Effects of nitrogen rate and time of application. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* **2012**, *12*, 389–410.
117. Linlaud, N.E.; Puppo, M.C.; Ferrero, C. Effect of hydrocolloids on water absorption of wheat flour and farinograph and textural characteristics of dough. *Cereal Chem.* **2009**, *86*, 376–382. [\[CrossRef\]](#)
118. Sapirstein, H.; Wu, Y.; Koksel, F.; Graf, R. A study of factors influencing the water absorption capacity of Canadian hard red winter wheat flour. *J. Cereal Sci.* **2018**, *81*, 52–59. [\[CrossRef\]](#)
119. Zhang, Z.; Jia, D.; Wang, D.; Zhou, N.; Xing, Z.; Xu, K.; Wei, H.; Guo, B.; Zhang, H. Starch and dough-related properties of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to varying temperatures and radiances after anthesis. *Agronomy* **2023**, *13*, 1069. [\[CrossRef\]](#)
120. Maningat, C.C.; Seib, P.A.; Bassi, S.D.; Woo, K.S.; Lasater, G.D. Wheat starch: Production, properties, modification and uses. In *Starch*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2009; pp. 441–510.
121. Huang, X.; Zhou, X.; Liu, X.; Zhong, W.; Wang, X.; Ju, Z.; Yin, Y.; Xin, Q.; Liu, N.; Liu, X.; et al. Structural and physicochemical effects on the starch quality of the high-quality wheat genotype caused by delayed sowing. *Front. Nutr.* **2024**, *11*, 1389745. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
122. Zang, Y.; Yao, H.; Ran, L.; Zhang, R.; Duan, Y.; Yu, X.; Xiong, F. Physicochemical properties of wheat starch under different sowing dates. *Starch-Stärke* **2022**, *74*, 2100290. [\[CrossRef\]](#)
123. Chen, Y.; Yang, P.; Li, H. Simulation study on effects of planting density and sowing date on grain quality of winter wheat. *J. Agric. Sci. Technol.* **2023**, *24*, 143–153.
124. Han, H.; Yang, W. Influence of uniconazole and plant density on nitrogen content and grain quality in winter wheat in South China. *Plant Soil Environ.* **2009**, *55*, 159–166. [\[CrossRef\]](#)
125. de Pelegrin, A.J.; Carvalho, I.R.; Ferrari, M.; Nardino, M.; Szareski, V.J.; Meira, D.; Wartha, C.A.; Follman, D.N.; de Pelegrin, C.M.G.; Gutkoski, L.C.; et al. Evaluation of solvent retention capacity of wheat (*Triticum aestivum* L.) flour depending on genotype and different timing of nitrogenous fertilizer application. *Afr. J. Agric. Res.* **2016**, *11*, 4389–4394.
126. Gawęda, D.; Gawęda, M.; Chojnacka, S.; Sobolewska, M.; Łukasz, J.; Hury, G.; Wesołowska-Trojanowska, M. Evaluation of the technological quality of grain and flour of two spelt wheat (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L.) cultivars grown under different conditions of crop protection and seeding rate. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **2019**, *17*, 4377–4395. [\[CrossRef\]](#)
127. Nakano, H.; Morita, S. Effects of seeding rate and nitrogen application rate on grain yield and protein content of the bread wheat cultivar ‘Minaminokaori’ in southwestern Japan. *Plant Prod. Sci.* **2009**, *12*, 109–115. [\[CrossRef\]](#)
128. Gaile, Z.; Ruza, A.; Kreita, D.; Paura, L. Yield components and quality parameters of winter wheat depending on tillering coefficient. *Agron. Res.* **2017**, *15*, 79–93.
129. Mosanaei, H.; Ajamnoroz, H.; Dadashi, M.R.; Faraji, A.; Pessarakli, M. Improvement effect of nitrogen fertilizer and plant density on wheat (*Triticum aestivum* L.) seed deterioration and yield. *Emir. J. Food Agric.* **2017**, *29*, 899–910. [\[CrossRef\]](#)
130. Shevkani, K.; Singh, N.; Bajaj, R.; Kaur, A. Wheat starch production, structure, functionality and applications—A review. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2017**, *52*, 38–58. [\[CrossRef\]](#)
131. Zhang, Y.; Zhang, G. Starch content and physicochemical properties of green wheat starch. *Int. J. Food Prop.* **2019**, *22*, 1463–1474. [\[CrossRef\]](#)
132. Zhang, Y.; Dai, X.; Jia, D.; Li, H.; Wang, Y.; Li, C.; Xu, H.; He, M. Effects of plant density on grain yield, protein size distribution, and breadmaking quality of winter wheat grown under two nitrogen fertilisation rates. *Eur. J. Agron.* **2016**, *73*, 1–10. [\[CrossRef\]](#)
133. Fleitas, M.C.; Schierenbeck, M.; Gerard, G.S.; Dietz, J.I.; Golik, S.I.; Campos, P.E.; Simón, M.R. How leaf rust disease and its control with fungicides affect dough properties, gluten quality and loaf volume under different N rates in wheat. *J. Cereal Sci.* **2018**, *80*, 119–127. [\[CrossRef\]](#)
134. Kunkulberga, D.; Linina, A.; Ruza, A. Effect of nitrogen fertilization on protein content and rheological properties of winter wheat wholemeal. In Proceedings of the 3th Baltic Conference on Food Science and Technology “FOOD, NUTRITION, WELL-BEING”, Jelgava, Latvia, 2–3 May 2019; pp. 88–92.
135. Lagrain, B.; Wilderjans, E.; Glorieux, C.; Delcour, J.A. Importance of gluten and starch for structural and textural properties of crumb from fresh and stored bread. *Food Biophys.* **2012**, *7*, 173–181. [\[CrossRef\]](#)

136. Knapowski, T.; Ralcewicz, M. Evaluation of qualitative features of Mikon cultivar winter wheat grain and flour depending on selected agronomic factors. *Electron. J. Pol. Agric. Univ. EJPAU Agron.* **2004**, *7*, 1–12.
137. Knapowski, T.; Ralcewicz, M. Estimation of the quality parameters of winter wheat grain and flour in response to different nitrogen rates. *Ann. UMCS Sec. E* **2004**, *59*, 959–968. (In Polish)

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Olsztyn, 21.10.2024 r.
(miejscowość, data)

Krzysztof Michał Lachutta
(imię i nazwisko kandydata)

rolnictwo i ogrodnictwo
(dyscyplina naukowa)

Prof. dr hab. inż. Agnieszka Pszczółkowska
przewodnicząca Rady Naukowej
dyscypliny rolnictwo i ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie

OŚWIADCZENIE
autora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że w pracy pod tytułem:

P1. An agronomic efficiency analysis of winter wheat at different sowing strategies and nitrogen fertilizer rates: A case study in northeastern Poland (Lachutta K., Jankowski K.J., Agriculture, 2024, 14, 3: 442; <https://doi.org/10.3390/agriculture14030442>) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: opracowaniu koncepcji i metodyki badań; doborze oprogramowania; przeprowadzeniu walidacji i analiz formalnych; wykonaniu części badawczej; gromadzeniu, zastawieniu i opracowaniu statystycznym wyników badań; przygotowaniu i pisaniu publikacji; redagowaniu odpowiedzi na recenzje i edycji pracy; wizualizacji oraz administrowaniu projektem. Mój wkład w powstanie pracy szacuję na 70%.

P2. The quality of winter wheat grain by different sowing strategies and nitrogen fertilizer rates: A case study in northeastern Poland (Lachutta K., Jankowski K.J., Agriculture, 2024, 14, 4: 552; <https://doi.org/10.3390/agriculture14040552>) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: opracowaniu koncepcji i metodyki badań; doborze oprogramowania; przeprowadzeniu walidacji i analiz formalnych; wykonaniu części badawczej; gromadzeniu, zastawieniu i opracowaniu statystycznym wyników badań; przygotowaniu i pisaniu publikacji; redagowaniu odpowiedzi na recenzje i edycji pracy; wizualizacji oraz administrowaniu projektem. Mój wkład w powstanie pracy szacuję na 70%.

P3. Quality of winter wheat flour from different sowing and nitrogen management strategies: A case study in northeastern Poland (Lachutta K., Jankowski K.J., Applied Sciences, 2024, 14, 12: 5167; <https://doi.org/10.3390/app14125167>) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: opracowaniu koncepcji i metodyki badań; doborze oprogramowania; przeprowadzeniu walidacji i analiz formalnych; wykonaniu części badawczej; gromadzeniu, zastawieniu i opracowaniu statystycznym wyników badań; przygotowaniu i pisaniu publikacji; redagowaniu odpowiedzi na recenzje i edycji pracy; wizualizacji oraz administrowaniu projektem. Mój wkład w powstanie pracy szacuję na 70%.


(podpis kandydata)

Olsztyn, 21.10.2024 r.
(miejscowość, data)

prof. dr hab. inż. Krzysztof J. Jankowski
(tytuł zawodowy/stopień/tytuł naukowy,
imię i nazwisko)

Prof. dr hab. inż. Agnieszka Pszczółkowska
przewodnicząca Rady Naukowej
dyscypliny rolnictwo i ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie

OŚWIADCZENIE
współautora/współautorów

Oświadczam, że w pracy pod tytułem:

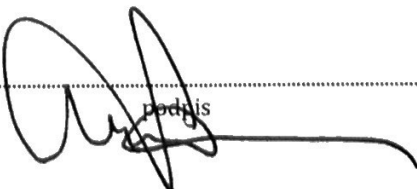
P1. An agronomic efficiency analysis of winter wheat at different sowing strategies and nitrogen fertilizer rates: A case study in northeastern Poland (Lachutta K., Jankowski K.J., Agriculture, 2024, 14, 3: 442; <https://doi.org/10.3390/agriculture14030442>) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: opracowaniu koncepcji i metodyki badań, redagowaniu odpowiedzi na recenzje oraz edycji pracy, nadzorze, administracji projektem oraz pozyskaniu finansowania. Mój wkład w powstanie pracy szacuję na 30%.

P2. The quality of winter wheat grain by different sowing strategies and nitrogen fertilizer rates: A case study in northeastern Poland (Lachutta K., Jankowski K.J., Agriculture, 2024, 14, 4: 552; <https://doi.org/10.3390/agriculture14040552>) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: opracowaniu koncepcji i metodyki badań, redagowaniu odpowiedzi na recenzje, edycji pracy, nadzorze, administracji projektem oraz pozyskaniu finansowania. Mój wkład w powstanie pracy szacuję na 30%.

P3. Quality of winter wheat flour from different sowing and nitrogen management strategies: A case study in northeastern Poland (Lachutta K., Jankowski K.J., Applied Sciences, 2024, 14, 12: 5167; <https://doi.org/10.3390/app14125167>) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na opracowaniu koncepcji i metodologii badań, redagowaniu odpowiedzi na recenzje oraz edycji pracy, nadzorze, administracji projektem, a także pozyskaniu finansowania. Mój wkład w powstanie pracy szacuję na 30%.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Krzysztofa Michała Lachuttę jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład kandydata mgr. inż. Krzysztofa Lachutty polegający na opracowaniu koncepcji i metodyki badań; doborze oprogramowania; przeprowadzeniu walidacji i analiz formalnych; wykonaniu części badawczej; gromadzeniu, zastawieniu i opracowaniu statystycznym wyników badań; przygotowaniu i pisaniu wersji wstępnej publikacji; redagowaniu odpowiedzi na recenzje i edycji pracy; wizualizacji oraz administrowaniu projektem.

.....

podpis