

UNIWERSYTET PRZYRODNICZY w LUBLINIE

Wydział Agrobiotechnologii

Dyscyplina naukowa Rolnictwo i Ogrodnictwo

mgr inż. Urszula Zimnoch

Rozprawa doktorska

**Ocena możliwości zastosowania popiołów z biomasy
w mieszankach nawozowych oraz ich wpływ na plonowanie
i parametry jakościowe roślin paszowych**

**Assessment of the possibility of using biomass ashes in fertilizer
mixtures and their impact on the yield and quality parameters
of feed plants**

Rozprawa doktorska wykonana

w Katedrze Chemii Rolnej i Środowiskowej

Promotor: dr hab. Marzena S. Brodowska, prof. uczelni

Lublin, 2024

Promotorowi,
Pani dr hab., prof. uczelni Marzenie Sylwii Brodowskiej,
Opiekunowi pomocniczemu
Panu dr Jackowi Michalakowi,
zespółowi Pracowników Katedry Chemii Rolnej i Środowiskowej
oraz Okręgowych Stacji Chemiczno-Rolniczych w Łodzi i Białymstoku,
a także moim najbliższym
składam serdeczne podziękowania za wszelką pomoc przy realizacji tej pracy.

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data 28.10.2024

Podpis promotora *Marcina S. Brodowska*

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadom/a odpowiedzialności prawnej oświadczam, że:

- niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana przez mnie samodzielnie pod kierunkiem Promotora/Promotorów/Promotora pomocniczego* i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.
- przedstawiona rozprawa doktorska nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego.
- niniejsza wersja rozprawy doktorskiej jest tożsama z załączoną na płycie CD wersją elektroniczną.

Data 28.10.2024

Podpis autora *Limnoch Alubna*

Spis treści

1. Streszczenie	6
2. Wprowadzenie	8
3. Przegląd literatury	10
3.1. Popiół z biomasy – definicja, pochodzenie i właściwości	10
3.2. Popioły z biomasy w nawozach wieloskładnikowych	37
3.3. Kukurydza – charakterystyka gatunku	43
3.4. Kiszonki z kukurydzy – sposób wytwarzania i znaczenie w żywieniu zwierząt....	50
4. Hipoteza badawcza i cel badań	57
5. Materiały i metody	59
5.1. Charakterystyka materiału badawczego	59
5.2. Opracowanie mieszanek nawozowych	60
5.3. Charakterystyka doświadczenia polowego	60
5.4. Warunki meteorologiczne w czasie doświadczenia polowego	62
5.5. Opis roślin paszowych wybranych do badań	65
5.6. Zakres badań nawozów, gleby, rośliny i kiszonek	66
5.7. Metody statystyczne	67
6. Wyniki badań	68
6.1. Plonowanie i parametry biometryczne kukurydzy	68
6.1.1. Plon suchej masy kukurydzy	68
6.1.2. Wysokość kukurydzy	70
6.1.3. Ilość kolb kukurydzy	70
6.1.4. Stosunek masy zielonej do masy kolb kukurydzy	71
6.1.5. Ilość rzędów ziarników w kukurydzy	71
6.2. Zawartość makroelementów w kukurydzy	72
6.2.1. Zawartość azotu ogółem w kukurydzy	72
6.2.2. Zawartość fosforu w kukurydzy	74
6.2.3. Zawartość potasu w kukurydzy	74
6.2.4. Zawartość magnezu w kukurydzy	75
6.2.5. Zawartość wapnia w kukurydzy	76
6.2.6. Zawartość siarki w kukurydzy	77
6.2.7. Zawartość sodu w kukurydzy	77
6.3. Zawartość mikroelementów w kukurydzy i innych metali	78
6.3.1. Zawartość cynku w kukurydzy	78
6.3.2. Zawartość manganu w kukurydzy	79
6.3.3. Zawartość miedzi w kukurydzy	80
6.3.4. Zawartość żelaza w kukurydzy	81

6.3.5. Zawartość kadmu w kukurydzy	82
6.3.6. Zawartość arsenu w kukurydzy	83
6.3.7. Zawartość rtęci w kukurydzy	84
6.3.8. Zawartość ołowiu w kukurydzy	84
6.4. Zawartość suchej masy w kiszonce z kukurydzy	85
6.5. Zawartość włókna w kiszonce z kukurydzy	86
6.6. Zawartość makroelementów w kiszonce z kukurydzy	87
6.6.1. Zawartość azotu ogółem w kiszonce z kukurydzy	87
6.6.2. Zawartość fosforu w kiszonce z kukurydzy	88
6.6.3. Zawartość potasu w kiszonce z kukurydzy	88
6.6.4. Zawartość magnezu w kiszonce z kukurydzy	89
6.6.5. Zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy	90
6.7. Zawartość makroelementów w glebie	91
6.7.1. Zawartość azotu ogólnego w glebie	91
6.7.2. Zawartość azotu mineralnego w glebie	91
6.7.3. Zawartość fosforu w glebie	92
6.7.4. Zawartość potasu w glebie	93
6.7.5. Zawartość wapnia w glebie	94
6.7.6. Zawartość magnezu w glebie	95
6.7.7. Zawartość siarki w glebie	95
6.8. Zawartość mikroelementów i innych metali w glebie	96
6.8.1. Zawartość cynku w glebie	96
6.8.2. Zawartość manganu w glebie	97
6.8.3. Zawartość miedzi w glebie	98
6.8.4. Zawartość żelaza w glebie	98
6.8.5. Zawartość chromu w glebie	99
6.8.6. Zawartość kadmu w glebie	100
6.8.7. Zawartość ołowiu w glebie	100
6.8.8. Zawartość arsenu w glebie	101
6.8.9. Zawartość rtęci w glebie	102
6.8.10. Zawartość niklu w glebie	102
7. Dyskusja wyników	104
7.1. Ocena efektywności nawozów na bazie popiołu	104
7.2. Analiza ryzyka związanego z zawartością metali ciężkich	111
7.3. Wnioski praktyczne dla rolnictwa	112
8. Wnioski	104
9. Bibliografia	121
10. Załączniki	147

1. Streszczenie

Celem niniejszej pracy jest dokonanie oceny możliwości zastosowania popiołów z biomasy w mieszankach nawozowych oraz ich wpływu na plonowanie i parametry jakościowe roślin paszowych.

W pierwszej kolejności zaprezentowano hipotezę badawczą, następnie przedstawiono cel główny. Kolejnym elementem pracy jest wprowadzenie teoretyczne, na które składa się przegląd literatury. Przedstawiono definicję, pochodzenie i właściwości popiołu z biomasy. Zaprezentowano zastosowanie popiołów z biomasy w nawozach wieloskładnikowych. Następnie omówiono skład kukurydzy i wpływ nawożenia na tę roślinę. Ostatnim elementem części teoretycznej jest omówienie sposobu wytwarzania kiszonki z kukurydzy i jej rola w żywieniu zwierząt.

W dalszej części zaprezentowano metodologiczne aspekty prowadzonych badań własnych. Scharakteryzowano materiał badawczy, opracowanie mieszanek nawozowych. Opisano pola doświadczalne i warunki meteorologiczne. Przedstawiono zakres badań nawozów, gleby, roślin i kiszzonek oraz metody statystyczne.

Wyniki badań zawierają informacje o charakterze mieszanek, ich wpływie na glebę i na rośliny paszowe. Wyniki badań podsumowano i skonfrontowano z wynikami innych autorów w dyskusji. W pracy ustalono, że popiół ze spalania biomasy wykazuje duży potencjał jako surowiec do produkcji nawozów wieloskładnikowych, co może prowadzić do poprawy efektywności nawożenia oraz wzrostu plonów roślin paszowych. Analiza metali ciężkich w glebie i roślinach potwierdza, że nawozy te są bezpieczne dla środowiska, a w niektórych przypadkach mogą być nawet bardziej bezpieczne niż tradycyjne nawozy.

W obliczu negatywnych skutków nadmiernego stosowania nawozów azotowych zaleca się ich dostosowanie do rzeczywistych potrzeb roślin, co zwiększy efektywność ich wykorzystania i pozwoli zredukować zanieczyszczenie. Badania dowodzą, że pola doświadczalne stosujące popiół osiągają lepsze wyniki w porównaniu do pól kontrolnych, co potwierdza skuteczność nawozów opartych na popiele. Wnioski sugerują, że popiół ze spalania biomasy może być wartościowym i bezpiecznym składnikiem nawozów, wspierającym zrównoważony rozwój w produkcji rolniczej.

Słowa kluczowe: popiół, biomasa, nawóz, kukurydza, kiszonka

Summary

This work aims to assess the potential application of biomass ash in fertilizer mixtures and its impact on the yield and quality parameters of forage crops.

Firstly, the research hypothesis is presented, followed by the main objective. The next section provides a theoretical introduction, which includes a literature review. It presents the definition, origin, and properties of biomass ash, as well as its application in multi-component fertilizers. The composition of corn and the impact of fertilization on this plant are discussed. The final part of the theoretical section covers the method of producing corn silage and its role in animal nutrition.

Subsequently, the methodological aspects of the conducted research are presented. The research material, development of fertilizer mixtures, experimental fields, and meteorological conditions are characterized. The scope of research on fertilizers, soil, plants, and silages, as well as statistical methods, is outlined.

The research results contain information on the nature of the mixtures and their impact on the soil and forage crops. The results are summarized and compared with findings from other authors in the discussion. The study concludes that biomass ash exhibits significant potential as a raw material for the production of multi-component fertilizers, which can lead to improved fertilization efficiency and increased yields of forage crops. The analysis of heavy metals in soil and plants confirms that these fertilizers are environmentally safe and, in some cases, may even be safer than traditional fertilizers. In light of the negative effects of excessive nitrogen fertilizer use, it is recommended to adjust their application to the actual needs of plants, which can enhance their utilization efficiency and reduce pollution. Research demonstrates that experimental fields utilizing ash achieve better results compared to control fields, confirming the effectiveness of ash-based fertilizers. These findings suggest that biomass ash can be a valuable and safe component of fertilizers, supporting sustainable development in agricultural production.

Keywords: ash, biomass, fertilizer, corn, silage

2. Wprowadzenie

Wielu sektorom przemysłu towarzyszy problem odpadów, które często prowadzą do zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Niektóre z tych odpadów mogą jednak stanowić cenny surowiec, który po odpowiednim połączeniu z innymi składnikami można wykorzystać w rolnictwie, na przykład do produkcji nawozów (Antonkiewicz 2009; Kalembasa i in. 2008). Od wielu lat odnawialne źródła energii odgrywają ważną rolę w przemyśle. Wśród nich bardzo duże znaczenie zajmuje biomasa. Zgodnie z definicją zawartą w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 19 grudnia 2005 r., biomasa to stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, z przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także z części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji (Dz. U. 2005 r. nr 261, poz. 2187).

Wykorzystanie biomasy pozwala na uzyskanie substytutów paliw, takich jak np. biogaz, bioetanol, biometanol, biooleje, biobenzyny i inne pochodne, np. wodór. Biomase można również przetwarzać na biopaliwa stałe, możliwe do wykorzystania w kotłowniach i elektrociepłowniach (Haustein, Grabarczyk 2012). Surowcem odpadowym w wyniku spalania biomasy jest popiół, którego ilość uzależniona jest od jakości i składu spalanych roślin. Utylizacja popiołów jest częścią zrównoważonej produkcji energii i ma ogromny wpływ na środowisko, natomiast składowanie popiołów z biomasy może okazać się marnowaniem cennych składników odżywczych (Pels i in. 2020).

Wykorzystanie popiołów ze spalania biomasy w rolnictwie podlega różnorodnym regulacjom prawnym na poziomie Unii Europejskiej oraz Polski, które mają na celu zapewnienie bezpieczeństwa środowiskowego, ochronę zdrowia oraz zgodność z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym. Dotychczasowe opracowania pozwalają przypuszczać, że materiał ten ma ogromny potencjał (Kalembasa i in.; 2003; Grzybek 2006; Haustein, Grabarczyk 2012; Meller, Bilenda 2012). Wyniki badań nad wpływem popiołów z biomasy na właściwości fizykochemiczne gleb lekkich wskazują, że ich działanie jest porównywalne z działaniem nawozów mineralnych, a w niektórych przypadkach nawet korzystniejsze (Stankowski, Bielińska, 2009). Niezwykle ważne jest przeanalizowanie bezpieczeństwa wykorzystania popiołów do celów nawozowych, w szczególności w aspekcie możliwości kumulacji w roślinach lub glebach substancji szkodliwych, w tym między innymi metali ciężkich. Wykorzystanie tego rodzaju odpadów reguluje

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie odzysku R10 (Dz.U. 2011 r. nr 86. Poz. 476). Zgodnie z załącznikiem tegoż Rozporządzenia (poz. 132), popiół ze spalania biomasy zakwalifikowano jako odpad mineralny o kodzie 10 01 03 (popioły lotne z torfu i drewna nie poddanego obróbce chemicznej). W związku z tym, należy je stosować na glebach, w których nie są przekroczone wartości dopuszczalne stężenia substancji określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi (Dz. U. 2002 r. nr 165 poz. 1395).

Dodanie popiołu do gleby wspomaga przepływ wody, ogranicza wypłukiwanie nawozów, zwiększa zdolności sorpcyjne gleb (przyczyniając się do lepszego wiązania jonów z roztworu glebowego), obniża gęstość gleby i pomaga neutralizować kwaśne gleby (Yao i in. 2016). Warto podkreślić, że popioły z biomasy są jednym z najstarszych rodzajów nawozów mineralnych. Dzięki wysokiej zawartości wapnia i magnezu, popioły powstające ze spalania biomasy stanowią skuteczny zamiennik nawozów wapniowych, wykazując zdolność do odkwaszania gleby (Wójcik i in. 2020). Dodatkowo, popioły te zawierają wiele innych składników odżywczych, takich jak potas, fosfor, siarka, krzem oraz mikroelementy, co czyni je odpowiednim materiałem do rekultywacji gleby lub jako nawóz wspierający wzrost roślin. Nadal jednak istnieje pilna potrzeba badań oceniających wpływ stosowania popiołu oraz mieszanek zawierających popiół z biomasy na parametry jakościowe roślin i właściwości gleb.

3. Przegląd literatury

3.1. Popiół z biomasy – definicja, pochodzenie i właściwości

Odnawialne źródła energii odgrywają kluczową rolę w globalnych strategiach ograniczania emisji gazów cieplarnianych i częściowo w działaniach mających na celu zastąpienie paliw kopalnych (Burg i in. 2016; Stolarczyk i in. 2015). Biomasa jest jednym z najważniejszych źródeł energii odnawialnej. Budowa inteligentnych systemów energetycznych opartych na biomase jako źródle energii pierwotnej umożliwia wzmocnienie korzyści ekonomicznych, środowiskowych i społecznych (Viktarovich, Czechowska-Kosacka 2016).

Biomasa to połączenie słów „bio + mass”, które sugerują pochodzenie zwierzęce i roślinne, w tym algi, drzewa i uprawy. Biomasa to materia organiczna pozyskiwana z roślin w procesie fotosyntezy. Konwersja światła słonecznego w materię organiczną przez roślinę poprzez fotosyntezę obejmuje różnorodną roślinność zarówno nad poziomem gruntu, jak i pod lądową roślinnością wodną, a także odpady naturalne. Gdy te odpady są spalane w piecach energia przekształca się z energii chemicznej w energię elektryczną (Parmar 2015).

Uprawy rolne, resztki poźniwne i produkty leśne to podstawowe rodzaje biomasy stałej (Jenkins i in. 1998), które wykorzystują CO₂ z atmosfery do asymilacji węgla przy użyciu energii ze światła słonecznego. Organizmy, które zjadają rośliny, mogą w ten sposób przekształcać biomasę w odchody, ale podstawowa absorpcja odbywa się przez rośliny. Roślina zostanie albo rozłożona przez naturalne mikroorganizmy, albo spalona w procesie spalania, jeśli nie zostanie zjedzona przez roślinożerców, ale w przypadku, gdy ulegnie naturalnemu zniszczeniu, uwolni z powrotem węgiel w postaci gazu (CO₂) lub metanu (CH₄) do atmosfery, w zależności od warunków i zachodzących procesów. Procesy te będą trwać do momentu przerwania cyklu na Ziemi, znanego jako emisja dwutlenku węgla netto.

W tabeli 1 przedstawiono ogólną charakterystykę źródeł biomasy.

Tabela 1. Źródła biomasy

Źródło biomasy	Rodzaj biomasy	Składniki	Zastosowanie	Zalety	Wady
Drewno i odpady drzewne	Resztki po wyrębie lasów, drewno odpadowe	Celuloza, lignina	Spalanie w kotłach, produkcja brykietów, pelletów	Duża dostępność, odnawialność	Zubożenie lasów, emisja CO ₂ podczas spalania

Źródło biomasy	Rodzaj biomasy	Składniki	Zastosowanie	Zalety	Wady
Słoma	Odpady z produkcji rolnej	Celuloza, hemiceluloza	Produkcja energii cieplnej, biopaliwa	Wysoka dostępność na terenach rolniczych	Niska wartość energetyczna w porównaniu do innych źródeł
Trawa	Roślinność łąkowa	Celuloza, białko, lignina	Produkcja biogazu, kompostowanie	Odtwarzalność, niskie koszty	Sezonowość, niska wydajność energetyczna
Rośliny energetyczne	Specjalnie uprawiane rośliny (np. wierzba, miskant)	Celuloza, lignina, węglowodany	Produkcja biopaliw, biogazu, biopaliw stałych	Wysoka wydajność biomasy, małe wymagania glebowe	Konkurencja o ziemię z uprawami spożywczymi
Resztki roślinne	Odpady z produkcji rolniczej (np. liście, łodygi)	Celuloza, lignina, węglowodany	Biopaliwa, kompostowanie	Odtwarzalność, ograniczenie odpadów	Niska wartość energetyczna
Obornik i gnojowica	Odpady zwierzęce	Azot, węglowodany, białko	Produkcja biogazu, nawóz organiczny	Ograniczenie emisji metanu, recykling odpadów	Emisje zapachowe, potrzeba dużych instalacji biogazowych
Odpady komunalne	Odpady organiczne z gospodarstw domowych	Materia organiczna	Biogaz, energia cieplna, nawóz organiczny	Recykling odpadów, ograniczenie składowania odpadów	Wysokie koszty technologiczne
Ścieki komunalne	Odpady organiczne z oczyszczalni ścieków	Materia organiczna, tłuszcze	Produkcja biogazu	Wykorzystanie odpadów, ograniczenie emisji metanu	Zanieczyszczenia, potrzeba zaawansowanych technologii
Olej roślinny	Olej z nasion roślin oleistych	Kwasy tłuszczowe, węglowodany	Produkcja biodiesla	Odnawialność, niskie emisje spalin	Wysokie koszty produkcji, konkurencja z przemysłem spożywczym
Algi	Mikroorganizmy wodne	Tłuszcze, białka, węglowodany	Produkcja biopaliw, żywność	Bardzo szybki przyrost, możliwość upraw na wodach	Wysokie koszty technologiczne, skomplikowana hodowla

Opracowanie własne

Skład chemiczny biomasy roślinnej różni się w zależności od gatunku (tab. 2). Na ogół rośliny składają się w około 25% z ligniny i w 75% z węglowodanów lub cukrów. Frakcja węglowodanowa składa się z wielu cząsteczek cukru połączonych ze sobą w długie łańcuchy lub polimery. Wyróżnia się dwie kategorie: celulozę i półcelulozę. Frakcja ligniny składa się z cząsteczek typu niecukrowego, które działają jak klej utrzymujący włókna celulozy.

Tabela 2. Typowe wartości składu słomy, drewna iglastego i liściastego:

	Celuloza	Hemiceluloza	Lignina
Drewno iglaste	45	25	30
Drewno liściaste	42	38	20
Łodygi słomy	40	45	15

Opracowanie własne

Wartość opałowa paliwa jest zwykle wyrażana jako wyższa wartość opałowa (HHV) i/lub niższa wartość opałowa (LHV). Różnica wynika z ciepła parowania wody utworzonej z wodoru w materiale i wilgoci. Należy zauważyć, że różnica między tymi dwiema wartościami opału zależy od składu chemicznego paliwa. HHV odpowiada maksymalnej potencjalnej energii uwalnianej podczas całkowitego utleniania jednostki paliwa. Obejmuje energię cieplną odzyskaną przez skraplanie i chłodzenie wszystkich produktów spalania. LHV znana jest od końca XIX wieku, gdy stało się oczywiste, że skraplanie pary wodnej lub tlenku siarki w kominach prowadzi do korozji i zniszczenia układów wydechowych. Ponieważ technicznie niemożliwe było skraplanie gazów spalinowych z węgla bogatego w siarkę, ciepło poniżej 150 °C uznano za niepraktyczne i dlatego wyłączono je z rozważań energetycznych. Najważniejszą właściwością surowców biomasowych w odniesieniu do spalania i innych procesów termochemicznych jest zawartość wody, która wpływa na zawartość energii w paliwie.

Tabela 3 przedstawia możliwe zakresy zawartości wody dla wybranych źródeł biomasy.

Tabela 3. Możliwe zakresy zawartości wilgoci dla wybranych źródeł biomasy

Zasób biomasy	Zawartość wody
Przemysłowe świeże zrębki drzewne i trociny	40-60% wag. (wb)
Przemysłowe suche wióry drzewne i trociny	10-20% wag. (wb)
Świeże wióry leśne	40-60% wag. (wb)
Zrębki drzewne przechowywane i suszone na powietrzu przez kilka miesięcy	30-40% wag. (wb)
Odpadowe drewno	10-30% wag. (wb)
Słoma sucha	15% wag. (wb)

Opracowanie własne

Tabela 4. Niektóre typowe cechy paliw z biomasy w porównaniu z ropą naftową i węglem

Typowe cechy	GJ/t	kg/m ³	GJ/m ³	Objętość ekwiwalentu oleju (m ³)
Paliwo				
Olej opałowy	41,9	950	39,8	1,0
Węgiel	25,0	1000	25,0	1,6
Pellet o wilgotności 8%	17,5	650	11,4	3,5
Drewno stosowe (ułożone w stosy, 50%)	9,5	600	5,7	7,0
Zrębki przemysłowe z drewna iglastego o wilgotności 50%	9,5	320	3,0	13,1
Zrębki przemysłowe z drewna iglastego o wilgotności 20%	15,2	210	3,2	12,5
Zrębki z drewna leśnego iglastego o wilgotności 30%	13,3	250	3,3	12,0
Zrębki z drewna liściastego leśnego o wilgotności 30%	13,3	320	4,3	9,3
Słoma siekana, wilgotna w 15%	14,5	60	0,9	45,9
Duże baloty słomy o wilgotności 15%	14,5	140	2,0	19,7

Opracowanie własne

Wykorzystanie potencjału biomasy do celów grzewczych w sektorze komunalno-mieszkaniowym powinno obejmować nie tylko zagęszczone paliwo z biomasy, ale także paliwa z biomasy o niskiej wartości opałowej i gęstości usypowej, a także biomasę odpadową powstającą podczas produkcji żywności o wysokiej wartości kalorycznej (Maj 2018; Szyszlak-Bargłowicz i in. 2018; Dołżyńska, Obidziński 2017; Mirowski 2016; Chocyk i in. 2015), w oparciu o efektywne i niskoemisyjne jednostki energetyczne zasilane paliwem nadające się do zastosowań na małą skalę (gospodarstwa rolne indywidualne i sieci ciepłownicze) (Sornek i in. 2017).

Popiół jest jednym z produktów ubocznych powstających podczas spalania biomasy. Odpady paleniskowe powstające w wyniku spalania biomasy w gospodarstwach domowych są gromadzone w sposób nieselektywny i wywożone na składowisko, stanowiąc tym samym dodatkowe i zbędne obciążenie dla środowiska (Sornek i in. 2017).

Spośród wszystkich odnawialnych źródeł energii biomasa stanowi najbardziej obiecujący produkt na rynku. W różnych krajach termin biomasa odnosi się również do odpadów komunalnych, które obejmują odpady wytwarzane przez budynki mieszkalne i komercyjne, a także usługi publiczne (International Energy Agency 2022). Według Belviso (2018) roczna produkcja biomasy waha się od 112 do 220 miliardów ton: biomasa

o potencjale energetycznym od 1,2 do 3,1 miliarda ton, 1,1 miliarda ton z odpadów komunalnych stałych i około 3 miliardów ton z pozostałości leśnych. Vassilev i in. (2013) stwierdzili, że wraz ze wzrostem produkcji biomasy zakłada się, że do 2050 r. od 33 do 50% światowych zasobów energii mogłoby zostać pokryte przez spalanie biomasy. Jednak w miarę wzrostu spalania biomasy każdego roku wytwarza się coraz więcej popiołu odpadowego. Szacuje się, że obecnie ze spalania biomasy rocznie powstaje około 476 milionów ton popiołu (Vassilev i in. 2013).

Skład chemiczny popiołu ze spalania biomasy zależy od jej charakterystyki i warunków spalania (Vassilev i in. 2013). Takie odpady są zazwyczaj składowane na składowiskach lub hałdach. Mogą być również składowane i w nieodpowiednich warunkach mogą stracić swoją jakość. Według Jacobsona i in. (2004), jest to błąd środowiskowy, podczas gdy cenne składniki mogłyby zostać zwrócone środowisku i wykorzystane do nawożenia roślin i poprawy właściwości gleby. Dlatego wydaje się rozsądne wykorzystanie popiołu ze spalania biomasy między innymi w rolnictwie, rekultywacji zdegradowanych gruntów, ochronie środowiska, syntezie zeolitów, odzyskiwaniu metali ziem rzadkich lub produkcji tworzyw sztucznych. Jednak jego wykorzystanie zależy od właściwości fizykochemicznych samego popiołu. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania szczegółowych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu dopuszczalna zawartość metali w nawozach mineralnych, w tym w popiołach ze spalania biomasy (Regulation of the Minister of Agriculture and Rural Development on 18 June 2008 on the Implementation of Certain Provisions of the Act on Fertilizers and Fertilization), nie może przekraczać zawartości: kadmu (Cd) – $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, arsenu (As) – $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ołowiu (Pb) – $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ i rtęci (Hg) – $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Kompleksowe recenzje przedstawione przez Hupa (2012) i Wasiliewa i in. (2013) omawiają i podkreślają charakterystykę i chemię popiołów z biomasy. Popioły z biomasy są złożonymi, głównie nieorganicznymi mieszkankami o niejednorodnym i zmiennym składzie. Tabela 5 przedstawia typowy skład pierwiastkowy materii tworzącej popiół w ośmiu różnych biomasach (Åbo Akademi University, Chemical Fractionation Database 2021). Ponadto w Tabeli 5 wymieniono skład popiołu typowego osadu ściekowego, torfu i węgla. Należy zauważyć, że Tabela 5 wymienia tylko wybrane popioły paliwowe z biomasy. Inne ważne popioły z biomasy obejmują na przykład popioły z odpadów drzewnych (Martínez-García i in. 2022), czasami bogate w cynk i ołów (Enestam i in. 2011). Składy podano jako najbardziej powszechny tlenek każdego pierwiastka. Jednak niektóre

pierwiastki, takie jak Ca i P, są często obecne w popiele jako bardziej złożone związki, np. $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Niemniej jednak wyrażenie składu popiołu jako tlenków umożliwia łatwe porównanie różnych popiołów biomasy i rozsądne oszacowanie zawartości tlenu w popiele. Jeśli uwzględniono wszystkie istotne pierwiastki, suma tlenków często zbliża się do 100%.

Tabela 5. Typowe składy tlenkowe (% wag.) biomasy, osadu ściekowego, torfu i popiołu węglowego. Skład określono metodą spektroskopii emisyjnej ze wzbudzeniem plazmą wzbudzoną indukcyjnie (ICP-OES). Åbo Akademi University, Chemical Fractionation Database. Available online: <https://web.abo.fi/fak/tkf/ook/bransle> (accessed on 12 April 2021)

Popiół z biomasy	SiO ₂	Al ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	Suma
Łupiny migdałów	6,22	0,98	0,66	0,06	0,05	36,32	3,01	1,60	0,38	30,66	79,95
Bagassa	72,96	4,97	2,53	0,29	0,19	11,0	2,06	0,96	0,34	3,86	99,15
Kora	10,74	3,20	4,96	0,14	1,77	60,16	5,82	5,24	0,67	8,69	101,38
Kora eukaliptusa	0,01	0,14	0,07	0,00	4,21	77,43	3,12	1,95	0,36	16,07	103,38
Pozostałości leśne	36,75	5,81	1,91	0,22	1,46	37,14	2,93	3,17	0,20	7,72	97,32
Pestki winogron	3,44	0,57	0,56	0,03	0,05	52,97	3,12	11,81	0,18	17,52	90,24
Łuska ryżowa	95,41	0,1	0,05	0,00	0,12	0,74	0,28	0,53	0,01	1,84	99,09
Słoma ryżowa	69,88	0,28	0,24	0,01	0,57	6,16	1,55	1,53	0,40	15,26	95,88
Słoma	58,49	0,39	0,33	0,03	0,00	21,10	2,13	3,53	0,25	13,59	99,84
Osad ściekowy	17,86	9,89	36,65	0,75	0,08	13,28	1,12	19,61	0,53	0,82	100,59
Torf	20,2	23,09	26,21	0,44	0,22	19,42	2,07	4,10	0,15	0,64	96,56
Węgiel	46,48	24,60	8,43	0,98	0,16	6,83	2,62	0,48	1,36	2,34	94,28

Obecnie spalanie biomasy jest powszechną technologią utylizacji odpadów i wytwarzania energii. Produktem ubocznym tego procesu są popioły, które wymagają dalszego zagospodarowania. Nowym podejściem niniejszego przeglądu jest przedstawienie różnych możliwości wykorzystania popiołów, a nie skupianie się tylko na jednym obszarze, jakim jest ich utylizacja (Kanhari i in. 2020; Uliasz-Bocheńczyk i in. 2015).

Odnawialne źródła energii, takie jak biomasa, są coraz częściej wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej i ciepłej. W procesie termicznego przekształcania materii organicznej tych surowców, oprócz gazów, powstają tlenki nieorganiczne, zwane także ubocznymi produktami spalania (UPS) (Kozłowski i in. 2020). Odpady paleniskowe

powstające po spalaniu biopaliw stałych, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. z 2020 r. poz. 10) klasyfikowane są jako odpady grupy 10 „Odpady z procesów termicznych”, podgrupy 01 „Odpady z elektrowni i innych źródeł zakładów energetycznego spalania paliw (z wyłączeniem grupy 19)”, kod 10 01 03 „Popioły lotne z torfu i drewna niepoddanego obróbce chemicznej”.

Właściwości popiołów lotnych ze spalania biopaliw zależą nie tylko od rodzaju biomasy wykorzystanej do uzyskania energii elektrycznej i ciepła, ale także od udziału organów roślinnych w spalanej biomase, np. ilości kory drzewnej, gałęzi i procesu spalania biopaliwa, a także parametrów, wielkości ziarna, stopnia utlenienia lub rodzaju gleby, na której rosła roślina energetyczna (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016). Skład chemiczny odpadów drzewnych jest zróżnicowany, jednak wartość opałowa suchej masy drewna ma tendencję do zawierania się między $18,5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ a $19,5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, podczas gdy zawartość popiołu powstała w wyniku obróbki cieplnej drewna wynosi około 0,4–0,8% suchej masy paliwa. W przypadku spalania topoli i wierzb zaobserwowano wysoki udział popiołu, który wynosił odpowiednio 1,9% i 2,0%, a dla kory drzew iglastych 3,9% suchej masy paliwa (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016). Skład tlenkowy popiołu lotnego przedstawia się następująco: dwutlenek krzemu (SiO_2) > tlenek wapnia (CaO) > tlenek potasu (K_2O) > pięciotlenek fosforu (P_2O_5) > tlenek glinu (Al_2O_3) > tlenek magnezu (MgO) > tlenek żelaza (Fe_2O_3) > tlenek siarki (SO_3) > tlenek sodu (Na_2O) > tlenek manganu (MnO) > dwutlenek tytanu (TiO_2). Zawarte w popiele składniki nieorganiczne wpływają na ich skład chemiczny. Popiół lotny zawiera największą zawartość: wapnia (Ca), potasu (K), krzemu (Si), magnezu (Mg), glinu (Al), żelaza (Fe), fosforu (P), sodu (Na), siarki (S), manganu (Mn) oraz w śladowych ilościach: chloru (Cl), węgla (C), wodoru (H) i azotu (N) (Mirowski i in. 2018).

Oprócz pierwiastków dostępnych dla roślin, popioły zawierają metale ciężkie, w tym: Pb, Cd, Cr, Cu, As, Hg, Ni i Zn. Niektóre pierwiastki mogą być obecne w fazie rozpuszczalnej w wodzie, np. Al, Ca, Cl, C, Fe, K, Mg, Mn, N, Na, S, Si, P, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni (Ciesielczuk i in 2014). Popioły ze spalania biomasy zawierają inne związki niż popioły pochodzące ze spalania węgla kamiennego. Związkami tymi są: krzemiany wapniowo-potasowo-manganowe, węglany potasowo-wapniowo-magnezowo-sodowe oraz chlorki i chlorki potasowo-sodowe. Różnica w składzie chemicznym ww. popiołów wynika z mniejszej zawartości glinu, krzemu, żelaza i siarki w popiołach lotnych z biomasy, a zwiększonej zawartości wapnia, chloru, potasu, magnezu, sodu, tlenu i fosforu (Shi i in. 2017). Najwięcej CaO występuje w popiołach dębowych 50,9%,

natomiast najmniej w popiołach świerkowych 14,9% (Shao i in. 2012; Supancic i in. 2014). Popiół ze spalania świerka zawiera najwięcej K_2O , 69,3%. Odnosząc się do MgO , Na_2O i P_2O_5 , we wszystkich wymienionych popiołach wartości te wahają się od wartości 0,4% do wartości 10,6% (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016; Shao i in. 2012).

Do roślin energetycznych uprawianych na większą skalę należą, na przykład: topola, wierzba energetyczna, wierzba ostrokrzewowa, wierzba wiciowa, miskant olbrzymi, róża wielokwiatowa, rdest sachaliński, słonecznik bulwiasty czy ślaz. Rośliny te charakteryzują się wspólnymi cechami; osiągają szybki przyrost masy w krótkim czasie i mają wysoką wartość kaloryczną od 15 do 19 $MJ \cdot kg^{-1}$ suchej masy paliwa. Zawartość popiołów wierzbowych i topolowych nie przekracza 1% suchej masy. Najwyższą wartość popiołu uzyskuje się po spaleniu miskantu - około 7% i słonecznika - 5,4%.

W popiołach uzyskanych z biomasy zawartość pierwiastków śladowych, a przede wszystkim metali ciężkich waha się w szerokich granicach (Lanzerstorfer 2015).

Porównując zawartość tlenu wapnia i tlenu sodu w popiołach z wiórów brzoźowych i świerkowych oraz roślin energetycznych, można wyciągnąć wniosek, że w obu przypadkach tlenek wapnia osiąga najwyższą wartość, a tlenek sodu najniższą. Zawartość metali ciężkich również charakteryzuje się podobnymi relacjami dla ilości Pb, Zn i Hg. W jesionie topolowym cynk i ołów występują w największej ilości: 2274 $mg \cdot kg^{-1}$ Zn i 177 $mg \cdot kg^{-1}$ Pb, przy najniższej wartości Hg na poziomie 0,2 $mg \cdot kg^{-1}$ (Wierzbowska i in. 2020; Lanzerstorfer 2015).

Końcowy skład popiołów ze spalania biomasy w dużej mierze zależy od temperatury spalania i zdolności pieca do tworzenia oddzielnego popiołu lotnego i popiołu dennego. Popiół lotny jest najlżejszym składnikiem powstającym w wyniku spalania osadów wewnątrz kotła i systemów wentylacyjnych. Ma wyższą zawartość dioksyn i metali ciężkich w porównaniu z popiołem dennym (Pitman 2006).

Po procesie spalania każde biopaliwo pozostawia produkt uboczny – popiół lotny, który może zawierać tzw. trwale zanieczyszczenia organiczne (TZO), do których zalicza się wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) (Poluszyńska 2013). Jak wskazano w literaturze (Wołejko i in. 2018; Zhou i in. 2015), WWA mogą zakłócać prawidłowe funkcjonowanie organizmów, ze względu na swoje toksyczne, rakotwórcze i mutagenne właściwości. Związki z grupy WWA zaliczane są do związków niepolarnych i rozpuszczają się w wodzie w nieznacznym stopniu. Obecność innych zanieczyszczeń organicznych, np. związków próchnicznych, zwiększa stopień rozpuszczalności. WWA adsorbują się na powierzchni ciał stałych ze względu na swoje duże powinowactwo

do cząstek, co pozwala im na przemieszczanie się na duże odległości. Wraz z wodą deszczową lub roztopową mogą wnikać głęboko w profil glebowy i w ten sposób docierać do zbiorników wód gruntowych lub powierzchniowych (Poluszyńska 2013). WWA i lotne związki organiczne (LZO), a także tlenek węgla i tlenki azotu powstają głównie w procesach niepełnego spalania węgla i drewna. Wymienione zanieczyszczenia emitowane są podczas spalania biomasy w kotłach małej mocy, przy niestabilnych warunkach pracy (Orasche i in. 2012).

Niewłaściwe warunki podczas procesu spalania biomasy prowadzą do powstawania WWA i ich akumulacji w popiele lotnym (Kośnář i in. 2019). Zawartość WWA w popiele ze spalania biomasy zależy bardziej od kotła i warunków jego pracy niż od rodzaju biomasy. Przykładowo w popiołach z kotła na pelet drzewny obecne były głównie związki o dużej masie cząsteczkowej (Atkins i in. 2010). Z drugiej strony całkowita zawartość WWA w słomie i popiele drzewnym mieściła się w szerokim zakresie od 15 do 733 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Straka, Havelcová 2012). Z kolei w popiele lotnym z komercyjnej elektrowni biomasowej w Czechach zawartość 16 pojedynczych WWA wynosiła 160 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DM, z czego najwyższą zawartość stwierdzono w związkach o małej masie cząsteczkowej (75 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DM) (Kośnář i in. 2019). Mastro i in. (2015) podają, że popioły pochodzące z biomasy spalanej w temperaturze 850 °C mają stosunkowo wysoką zawartość WWA (193 $\text{mg WWA} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. popiołu).

Temperatura jest czynnikiem determinującym powstawanie WWA podczas procesu spalania, który odbywa się w temperaturach od 500 °C do 1000 °C lub wyższych (Eriksson i in. 2014). Większość z nich powstaje podczas spalania w temperaturach od 500 °C do 700 °C. Ponadto w temperaturze 320–700 °C ich powstawaniu sprzyjają produkty spalania zawierające ligninę, celulozę, skrobię, cukry proste, aminokwasy, kwasy tłuszczowe, β -karoten, glicerydy cholesterolu (Reimann i in. 2008). WWA oznaczane są jako suma 16 związków: benzo(a)antracenu (BaA), benzo(b)fluorantenu (BbF), benzo(k)fluorantenu (BkF), benzo(a)pirenu (BaP), indeno(1,2,3-cd)pirenu (IP), dibenzo(a,h)antracenu (DahA), benzo(g,h,i)perylenu (BghiP), naftalenu (NA), acenaftylenu (ACY), acenaftenu (ACE), fluorenu (FL), fenantrenu (PH), antracenu (AN), fluorantenu (FLU), pirenu (PY) i chryzenu (CHR).

Podsumowując, większa ilość WWA ulatnia się z innymi gazami i lotnymi związkami organicznymi, a mniejsza część jest przenoszona do pozostałości spalania. Jednak zanim popiół lotny zostanie wykorzystany jako dodatek do materiałów budowlanych lub nawozów do upraw, należy przeprowadzić szereg analiz, aby umożliwić wykorzystanie produktu

ubocznego spalania. Ważne jest przeprowadzenie badań zawartości metali ciężkich, chlorków, siarczanów, mikroelementów i makroelementów, składu ziarnowego i fazowego oraz związków organicznych, np. BaA, BaP, BghiP, bowiem bezpieczeństwo gleby i wody zależy od stopnia wypłukiwania zanieczyszczeń zawartych w materiałach mających kontakt ze środowiskiem (Poluszyńska 2013).

Popioły powstałe w wyniku termicznego przetwarzania biomasy mogą wykazywać wysoką wymywalność zanieczyszczeń do środowiska. Popiół ma wysoką zawartość składników rozpuszczalnych, takich jak: chlorki (halit, sylwin), siarczany (syngenit, gips), tlenki (tlenek wapnia), wodorotlenki (portlandyt), azotany, węglany i wodorowęglany. Średnią zawartość pierwiastków, które mogą przenikać do środowiska poprzez swoją wymywalność, można uszeregować następująco: $Cl > S > Na > Sr > Ni > Mn > Cd > Cr > Zn > Co > Si > Mo > Li > Mg, Pb > Ca > Cu > Ba > P > Se > Sb > Al > Fe > Br, Hg > As, B, Sn, Ti, V$ (Kanhar i in. 2020; Uliasz-Bocheńczyk i in. 2015). Wymywalność poszczególnych pierwiastków zależy m.in. od ich pH. Przy odczynie alkalicznym wypłukiwalność pierwiastków, takich jak Al, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn jest niższa, natomiast wzrasta dla następujących pierwiastków: As, B, Cr, Mo (Yu i in. 2021). Produkty hydratacji, w tym glinokrzemian wapnia czy portlandyt, przy wysokim pH zmniejszają ruchliwość zanieczyszczeń drogą fizyczną, zmniejszając porowatość popiołu lub wiążąc chemicznie toksyczne pierwiastki. Proces naturalnej karbonatyzacji obniża odczyn i w konsekwencji uwalnia z popiołów do środowiska metale ciężkie, np. Cr (Mirowski i in. 2018; Supancic i in. 2014).

Według Wasiliewa in. (2013) wartość popiołu lotnego pH waha się w granicach od 4,5 do 13,4 i zależy od wysokiej zawartości składników bogatych w K, Cl, Ca i Mg. Proces spalania biomasy powoduje powstawanie rozpuszczalnych związków Ca, Mg, K i Na (tlenków, wodorotlenków, węglanów, wodorowęglanów), co z kolei powoduje wzrost pH. Zasadowy charakter popiołów zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury spalania i czasu przechowywania (Vassilev i in. 2014).

Skład granulometryczny popiołów z biomasy zależy od spalanego materiału, jak również rodzaju kotła, w którym spalano biopaliwo. Cuenca i in. (2013) przeprowadzili analizę sitową pozostałości po spalaniu biopaliwa, tj. wyłoków oliwnych, uzyskując następujące wyniki: frakcja przesiana przez sito o wielkości oczek 2 mm stanowiła 100% badanej próbki i 0,125 mm, około 96% i 0,063 mm oraz około 81%, podczas gdy Romero i in. (2017) stwierdzili, że pozostałości po spalaniu mokrych odpadów z oliwek i trzciny cukrowej w kotle fluidalnym zawierały 45% małych ziaren o wielkości poniżej 50 μm , co

stanowiło największy udział, a tylko 10% dużych cząstek miało wielkość powyżej 250 μm . Modrzycka i in. (2015) opublikowali wyniki badań nad rozkładem wielkości ziaren popiołów powstałych w wyniku spalania mieszaniny odpadów drzewnych i słomy oraz drewna i łupin orzechów kokosowych. Autorzy przeprowadzili analizę sitową popiołu lotnego, wykorzystując zestaw sit o wielkości oczek 0,2–0,02 mm. Rozkład wielkości cząstek obu próbek mieści się w zakresie 25–100 μm . Frakcja 50–56 μm (36,3%) była najwyższa dla próbki 1, a frakcja próbki 2 wynosiła 56–63 μm (48,6%). Ziarna o wielkości cząstek powyżej 2 μm i poniżej 50 μm stanowiły aż 76% (Doudart de la Grée i in. 2016).

Górnictwo i przetwarzanie minerałów wpływają na naturalne wody w miejscach wydobywania, co często powoduje drenaż kopalni. W zależności od pH drenaż kopalni jest klasyfikowany jako kwaśny, obojętny lub zasadowy. Spośród nich kwaśny drenaż kopalni (AMD) stanowi najpoważniejsze zagrożenie dla środowiska naturalnego (Silva 2017). AMD występuje, gdy materiał zawierający siarczki (na przykład piryt, FeS_2) ulega utlenieniu, tworząc kwas i uwalniając związki zawierające metale i siarczany do naturalnych wód. W związku z tym, że kilka metali jest rozpuszczalnych w kwaśnej wodzie, dodatkowe pierwiastki z podziemnych rud mogą zostać wypłukane. Tak więc proces AMD może prowadzić do pojawienia się znacznych ilości metali ciężkich (Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Co, Cr, Ni, Hg), półmetali (As, Sb) i innych pierwiastków (Al, Mn, Si, Ca, Na, K, Mg, Ba, F) w naturalnych wodach (Heviánková i in. 2014). Zanieczyszczony neutralny drenaż (CND), chociaż nie jest tak niebezpieczny jak AMD, może być również uważany za zagrożenie dla środowiska. CND odnosi się do ścieków o pH w zakresie od 6 do 9, zawierających metale (Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Se, U i Zn), metaloidy (As i Sb) i siarczany, które są rozpuszczalne w tym zakresie pH i występują w stężeniach przekraczających lokalne limity regulacyjne (Calugaru i in. 2018).

Chociaż aktywne metody oczyszczania, które wymagają systemu oczyszczania chemicznego w celu buforowania kwasowości i usuwania metali, są powszechne w trakcie eksploatacji kopalni, rzadko są stosowane w nieaktywnych lub opuszczonych miejscach. Pasywne systemy oczyszczania są preferowane w tych miejscach, ponieważ wykorzystują materiały naturalne lub odpadowe i mają niskie koszty operacyjne i konserwacyjne (Genty i in. 2021). Popiół na bazie biomasy może stanowić ekologiczne i ekonomiczne rozwiązanie do neutralizacji drenażu i usuwania zanieczyszczeń w takich zastosowaniach. Kluczowymi cechami stosowanego popiołu są: wysoka zawartość CaO w celu zwiększenia pH i wysoki poziom SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 (Alinnor 2017). Rolą tych tlenków jest usuwanie metali przez

adsorpcję na cząsteczkach popiołu lotnego, w wyniku przyciągania elektrostatycznego lub wytrącania/współstrącania metali w miarę wzrostu pH ścieków (Alinnor 2017).

Ze względu na wysoką zdolność neutralizacji kwasów, niektóre popioły mogą zastąpić droższe środki neutralizujące, takie jak wapień lub materiały na bazie wapna (Barbu i in. 2012). Wskazuje się także, że popiół drzewny skutecznie usuwa Ni (>97% usunięcia w ciągu 56 dni) (Richard i in. 2020), As (>96% usunięcia w ciągu 56 dni) (Braghiroli i in. 2020) i kilka innych zanieczyszczeń (Fe, Hg, Cr, Cd, Co, Cu, Pb, Al, Mn, Zn, Mg i SO_4^{2-}) (Heviánková i in. 2014). Ponadto popiół pochodzący ze słomy, mączki mięsno-kostnej i ściółki drobiowej (skutecznie) w badaniach regulował pH i usuwał zanieczyszczenia z wysoką wydajnością usuwania dla Al, Fe, Mn i Zn (Silva i in. 2017). Badanie to wykazało również, że możliwe jest dokładne przewidywanie przydatności nieprzetestowanych typów popiołu, poprzez porównanie ich składu chemicznego ze znanymi klasyfikacjami chemicznymi popiołów z biomasy. Efektywność usuwania zanieczyszczeń z popiołu można dodatkowo ulepszyć, na przykład poprzez modyfikację pH, pojemności wymiany kationów i stężeń potencjalnych zanieczyszczeń popiołu przed jego wykorzystaniem. W przypadku popiołu drzewnego modyfikowanego alkaliczną fuzją, w porównaniu z popiołem nieobrobionym, pojemność sorpcyjna dla Ni i Zn wzrosła, redukcja wydajności stała się niższa, a stabilność Zn została zwiększona (Calugaru i in. 2017). Zeolity, grupa glinokrzemianów, które można wytwarzać z popiołu biomasy, posiadają silne właściwości sorpcyjne, które mogą być przydatne w leczeniu AMD.

W doświadczeniu Penney i in. (2013) badano mieszaninę gleby, biomasy i popiołów lotnych węglowych pod kątem jej przydatności jako reaktywnej bariery przepływowej. Pomysł bariery polegał na umieszczeniu jej w glebie w pobliżu nieczynnego terenu kopalni, gdzie oczyszczała ona pasywnie zanieczyszczoną AMD wodę gruntową podczas przepływu wody przez barierę. Badana mieszanka buforowała pH ścieków, aby spełnić przepisy dotyczące ścieków kopalnianych przy minimalnej zmianie przewodności hydraulicznej. Ponadto regulowane stężenia metali zostały zmniejszone nawet o trzy rzędy wielkości. Jednak po przejściu mieszanki zmierzone stężenia Al w ściekach wzrosły powyżej limitów regulacyjnych, jako funkcja zawartości popiołu z powodu rozpuszczenia Al. Dlatego też możliwe rozpuszczenie niebezpiecznych pierwiastków z popiołu lub wzrost pH do zbyt wysokiego poziomu, muszą zostać zbadane i poznane przed wykorzystaniem popiołu. Ponadto powłoka/pasywacja (utrata reaktywności) i zatykanie (utrata przepuszczalności) spowodowane wytrącaniem się minerałów podczas oczyszczania mogą ograniczać przydatność popiołu z biomasy. Wytrącaniu się minerałów można zapobiec, stosując

jednostki wstępnego oczyszczania zawierające popiół z biomasy, które usuwają metale kwasotwórcze, takie jak Fe i Al, zanim ich reakcje z wodą obniżą wartość pH ścieków do poziomu, przy którym wytrącanie się innych metali będzie utrudnione (Rakotonimaro i in. 2016). Taka jednostka wstępnego oczyszczania zawierająca popiół drzewny usuwała Fe ze sprawnością bliską 100%, a w mniejszym stopniu inne zanieczyszczenia, takie jak Al, Zn, Pb, Mn i SO_4^{2-} (Rakotonimaro i in. 2016). Jeśli zatykanie nie stanowi problemu, jednostkę sorpcji Fe można również umieścić za jednostką biofiltra redukującego siarczany w systemie, w którym najpierw usuwana jest większość siarczanów, a następnie następuje skuteczne usuwanie Fe i dodatkowego siarczanu (Genty i in. 2021). Ponadto popiół z biomasy może stabilizować zanieczyszczenia nieorganiczne w biofiltrach, co umożliwia ich bezpieczniejszą utylizację (Lounate i in. 2020).

Popiół z biomasy może być stosowany w różnych procesach przemysłowych jako katalizator. Wysokie stężenia metali alkalicznych i ziem alkalicznych (AAEM) wraz z niską zawartością krzemionki sprawiają, że popiół z biomasy jest odpowiednim i ekonomicznym katalizatorem do zgazowania koksu naftowego, węgla niskostopowego i bitumicznego (He i in. 2020). Popioły biomasy bogate w Al_2O_3 i SiO_2 są obiecującymi alternatywnymi katalizatorami i adsorbentami w różnych procesach przemysłowych (Sayehi i in. 2020). Na przykład, popioły bogate w $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ sprzyjały degradacji metanolu podczas produkcji wodoru (Munawar i in. 2021). Właściwości katalityczne tych popiołów opierają się na grupie zeolitów: $\text{M}_{x/n}(\text{SiO}_2)(\text{AlO}_2)_x \cdot m\text{H}_2\text{O}$, gdzie M oznacza kation. W pracy przeglądowej Li i in. (2021) kompleksowo podsumowano różne rodzaje zeolitów i ich syntezę z popiołów biomasy. Bogate w SiO_2 popioły, takie jak popiół z łusek ryżowych, mogą być wykorzystywane ponadto jako nośnik katalizatorów, poprawiając właściwości fizykochemiczne bioolejów poprzez estryfikację po sulfonowaniu (Sutrisno, Hidayat 2017).

Ze względu na wysoką zasadowość popioły bogate w CaO mogą być stosowane jako katalizatory w produkcji biodiesla (Sharma i in. 2012; Ho i in. 2012). Ponadto popioły z biomasy zawierające CaO można stosować jako dodatki w spalaniu fluidalnym w celu obniżenia emisji przez katalityczne utlenianie szkodliwych związków, takich jak CH_4 , CO i HCN (Loffler i in. 2002). Co ciekawe, w beztlenowych atmosferach hydrogazyfikacji węgla drzewnego wykazano, że popioły bogate w CaO poprawiają wydajność reakcji CH_4
 $\text{C}(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CH}_4(\text{g})$ (Wang i in. 2019).

Doniesiono także, że popioły węglowe pochodzące ze spalania biomasy drzewnej katalizują kilka reakcji, takich jak reakcja sieciowania żywic epoksydowych z aminami (Stasi i in. 2019), utlenianie siarkowodoru (H_2S) i metanotolu (CH_3SH), lotnych związków

organicznych siarki i propanolu (Kastner i in. 2008), a także opary 2-metylobutanalu i heksanu (Kolar, Kastner 2010). Ze względu na znacznie większą powierzchnię właściwą w porównaniu z popiołami węglowymi, wykorzystanie popiołów drzewnych skutkuje lepszymi wskaźnikami konwersji. W konsekwencji, takie popioły mogą być uważane za ekologiczny substytut w przemyśle katalizatorów. Zupełnie inne źródło popiołu, mianowicie odpady przemysłowe, wytwarzają duże ilości hydroksyapatytu ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), który może być przekształcony w fosforan trójwapniowy ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) i stosowany jako katalizator w produkcji biodiesla (Chakraborty i in. 2015).

Inne zgłoszone procesy przemysłowe, w których rozważano możliwość wykorzystania popiołów pochodzących z biomasy jako katalizatorów, obejmują niskotemperaturową (600–800°C) gazyfikację biomasy (Nanou i in. 2013); reformowanie smoły podczas gazyfikacji biomasy (Buentello-Montoya i in. 2019) i redukcję NO_x w spalinach (Tran i in. 2009).

W przemyśle materiałów budowlanych popioły są stosowane na szeroką skalę, głównie do produkcji cementu. Zaletą popiołów jest ich zdolność do wiązania się ze związkami wapnia. Cechy te sprawiają, że są cennym składnikiem cementów, równoważnym kruszywom mineralnym. Popioły są stosowane jako aktywne dodatki zmieniające właściwości użytkowe spoiwa, co prowadzi do powstania cementu pucolanowego. Zwiększają również masę cementu i poprawiają jego mrozoodporność, a także są stosowane jako surowiec do produkcji klinkieru portlandzkiego (Xiao i in. 2011).

Popiół jest materiałem stosowanym w produkcji betonu w postaci mieszanek i elementów prefabrykowanych. Zmniejsza on zapotrzebowanie na wodę i poprawia urabialność mieszanki. W produkcji betonu komórkowego popioły pełnią rolę kruszywa i częściowo spoiwa. Produkty o dobrych właściwościach technicznych uzyskuje się przy obniżonych kosztach produkcji (Szcześniak i in. 2017; Xiao i in. 2011).

Zastosowanie popiołów jako surowca pozwala na obniżenie temperatury spiekania, niekiedy nawet o 200–300 °C i tym samym zmniejszenie zużycia paliwa procesowego nawet o 30%. W zależności od zawartości poszczególnych tlenków we wsadzie, popioły mogą być stosowane jako dodatek krzemionkowy, żelazonośny lub ilasty (Szcześniak i in. 2017).

Jak podają Szcześniak i in. (2017), badając wzrost wytrzymałości zapraw z udziałem popiołów ze współspalania stwierdzono, że zastąpienie 10% masy cementu popiołem nie powoduje innych zmian właściwości mechanicznych zapraw. Graniczna zawartość popiołu, przy której można osiągnąć wymaganą wytrzymałość na ścislenie i rozciąganie, wynosi 20% w stosunku do masy cementu. Ponadto beton zawierający popiół ze współspalania nie stanowi zagrożenia dla wód gruntowych i gleby, a tym samym dla ludzi i zwierząt (Alderete

i in 2021). Dodatek popiołu lotnego może również poprawić odporność betonu na wnikanie chlorków, co skutkuje obniżeniem wartości opałowej mieszanki betonowej, tym samym bezpośrednio ograniczając zjawisko skurczu betonu (Romero i in. 2017). Rutkowska i in. (2016) wskazali, że zastosowanie popiołu lotnego zwiększyło płynność mieszanki betonowej, zmniejszyło nasiąkliwość i zwiększyło wodoszczelność betonu w porównaniu ze zwykłym betonem.

Korzystny wpływ popiołów z biomasy na właściwości cementu zaobserwowali Rajamma i in. (2009). W badaniach tych stwierdzono wzrost wytrzymałości zarówno na początku (2 i 7 dni), jak i po dłuższym okresie utwardzania (28 i 90 dni). Ponadto, analizując właściwości fizyczne, należy podkreślić, że nie ma drastycznego wzrostu zapotrzebowania na wodę w przypadku cementu, co jest związane z dużą drobnoziarnistością popiołu z biomasy (Demis i in. 2014). Jak podano w literaturze, popiół z biomasy jest również brany pod uwagę jako dodatek w produkcji wyrobów ceramicznych, takich jak cegły gliniane (De La Casa, Castro 2014) i elektrotechniczna porcelana krzemionkowa (Coutinho i in. 2022).

Ze względu na wysoką zawartość wapna popioły nadają się do produkcji spoiw drogowych, umożliwiając stabilizację gruntu i obniżenie kosztu spoiwa, przy jednoczesnym osiągnięciu tych samych parametrów stabilizacji, co przy zastosowaniu czystego wapna lub cementu (Rosales i in. 2017). Jak wykazały badania Skels i in. (2021), dodatek popiołu lotnego drzewnego (w ilości od 10 do 30%) do tłucznia dolomitowego i żwiru zwiększył wytrzymałość i sztywność warstwy drogowej. Ponadto, jak zauważają Cabrera i in., popioły ze spalania biomasy są stosowane jako zamiennik cementu przy stabilizacji podbudowy dróg o małym natężeniu ruchu (Cabrera i n. 2018).

W zastosowaniach geotechnicznych popiół lotny pochodzący z biomasy może być stosowany jako materiał nadający się do nasypów na miękkich glebach, jako lekki materiał wypełniający za murem oporowym, do wypełniania podziemnych pustych przestrzeni, jako materiał opłaczalny (Porcino i in. 2020). Sarkkinen i in. (2018) przeprowadzili testy na dwóch rodzajach popiołów pochodzących z biomasy jako materiałach do stosowania jako spoiwa do stabilizacji dróg. Właściwości popiołów z biomasy zależały od technologii pieca. W związku z tym każde użycie popiołu z biomasy powinno być poprzedzone dokładnymi badaniami. W przypadku gleb o dużej ekspansywności (gleby gliniaste o dużym potencjale pęcznienia) dodawany w różnych porcjach popiół denny z biomasy zmniejszał ekspansywność (Galvín i in. 2021). Ustalono optymalną ilość popiołu dennego ze spalania winogron (16%), a dla popiołu dennego z odpadów oliwnych wynosiła ona 20%.

Od wielu dziesięcioleci popioły ze spalania węgla są również wykorzystywane w górnictwie podziemnym jako składnik materiałów do wypełniania wyrobisk górniczych. Przyczyniają się tym samym do zmniejszenia ilości piasku kwarcowego wykorzystywanego do podsadzek. Popioły te są wykorzystywane do likwidacji i wypełniania starych zrobów, czynnych ścian zrobów i zbędnych korytarzy, zapór przeciwwybuchowych i hamowania wybuchów, eliminacji zagrożeń pożarowych, wydobywania metanu w celu jego odzyskiwania, przeciwdziałania wyciekom powietrza przez zroby (Bhaskara Rao i in. 2019). Wydaje się, że popioły powstające w wyniku spalania biomasy również doskonale nadawałyby się do tego celu i powinny być wykorzystywane w górnictwie.

Do nowych i innowacyjnych kierunków zagospodarowania odpadów energetycznych zalicza się również wykorzystanie popiołów jako wypełniaczy w technologiach przetwórstwa materiałów polimerowych, takich jak polipropylen, poli(chlorek winylu), polietylen, poli (tereftalan etylenu) (Kuźnia i in. 2022). Produkty na bazie polimerów, w których jako wypełniacze stosuje się popiół, charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi, większą odpornością na ścieranie i niższą palnością. Kuźnia i in. (rok) zauważyli, że wprowadzenie do matrycy poliuretanowej popiołów w ilości do 10% poprawiło właściwości mechaniczne i stabilność termiczną, natomiast powyżej 10% spowodowało pogorszenie właściwości mechanicznych kompozytów poliuretanowych (Gnatowski i in. 2018). Ponadto wykorzystanie popiołów jako wypełniaczy zmniejsza naprężenia zrywające i odkształcenia kompozytów. Zwiększa także sprężystość i twardość, dzięki czemu kompozyty nie pękają krucho. Jak potwierdzają badania Gnatowskiego i in. (2018), dodatek popiołu ze spalania biomasy (zawierającego 17% CaO i 57% CaO) do poliamidu wpłynął na właściwości termiczne i mechaniczne materiału oraz na kompatybilność matrycy polimerowej i wypełniacza. Ponadto zaobserwowano, że dodatek 5% popiołu jako wypełniacza miał większy efekt wzmacniający niż dodanie go w większych ilościach.

W innych badaniach (Gnatowski i in. 2018; Pardo i in. 2014) przetestowano wpływ popiołu z biomasy na pękanie i zachowanie termiczne kompozytów polipropylenowych. Przebadano różne kompozyty na bazie polipropylenu, kopolimeru blokowego olefin i popiołu z biomasy w różnych ilościach. Kompozyty trójskładnikowe miały wyższą wytrzymałość niż matryca polipropylenowa. Najlepsze właściwości pękania w warunkach obciążenia quasi-statycznego zaobserwowano dla próbek ze stosunkiem kopolimeru blokowego olefin do popiołu wynoszącym 1:1.

Oczekuje się, że światowe zapotrzebowanie na wodę do nawadniania, użytku domowego, produkcji, hodowli zwierząt i produkcji energii elektrycznej wzrośnie o 55% w latach 2000–2050 (3500 km³ w 2000 roku w porównaniu z około 5500 km³ do 2050 roku) (Leflaivei i in. 2012). Aby uniknąć niedoborów wody, właściwe oczyszczanie ścieków ma ogromne znaczenie (Leflaivei i in. 2012), ponieważ może stanowić źródło czystej wody i łagodzić jej niedobór (Novais i in. 2019).

Stosowanie barwników w takich gałęziach przemysłu jak tekstylia, skóra, papier i tworzywa sztuczne generuje znaczne ilości zabarwionych ścieków (Rafatullah i in. 2010). W przemyśle tekstylnym błękit metylenowy (MB) jest najczęściej używanym barwnikiem do barwienia bawełny, drewna i jedwabiu (Rafatullah i in. 2010). Mimo to MB może powodować szkodliwe skutki dla zdrowia ludzi, takie jak ślepotę, niewydolność oddechową i zaburzenia jamy brzusznej. Dlatego też jego usuwanie ze ścieków jest niezwykle ważne.

Adsorpcja jest uważana za najskuteczniejszą i najprostszą metodę dekontaminacji wody. Charakteryzuje się niskim kosztem, prostym układem, łatwą obsługą i niewrażliwością na toksyczne zanieczyszczenia (Rafatullah i in. 2010). Z tego powodu liczba opublikowanych prac badawczych na temat usuwania MB ze ścieków jest bardzo duża (5545 dla „adsorbentów i błękitu metylenowego” według bazy danych Scopus z grudnia 2021 roku). Jednak opracowanie przyjaznych dla środowiska, tanich materiałów adsorbujących pozostaje nadal wyzwaniem.

Obecnie spalanie biomasy jest istotną alternatywną technologią wytwarzania użytecznej energii (ciepła i mocy), ponieważ jest uważane za neutralne pod względem emisji dwutlenku węgla (Illikainen i in. 2014; Ohenoja i in. 2016a; Ohenoja i in. 2016b). Niemniej jednak proces ten wytwarza ogromne ilości popiołu z biomasy (BA). Jedną z najczęściej stosowanych technologii spalania biomasy do produkcji ciepła i energii jest spalanie w złożu fluidalnym (BFBC). BFBC generuje dwa strumienie popiołu: popiół lotny z biomasy (BFA), który jest zbierany w przegrzewaczach, ekonomizerach i urządzeniach kontrolujących zanieczyszczenie powietrza (cyklony, filtry workowe, elektrofiltry) oraz popiół denny (BBA), zwykle grubszy, powstający w wyniku okresowych zrzutów złoża piasku zmieszanego z BA. Zarówno BFA, jak i BBA składają się z cząstek z pierwotnego złoża piasku, nieorganicznej zawartości biomasy, egzogennych materiałów nieorganicznych (gleby i małych kamieni) przyłączonych do biomasy i niespalonego paliwa (Illikainen i in. 2014; Ohenoja i in. 2016a; Ohenoja i in. 2016b). Zazwyczaj te dwa strumienie popiołu są składowane na wysypiskach (Illikainen i in. 2014; Ohenoja i in. 2016a; Ohenoja i in. 2016b), więc ich recykling jest ważny z punktu widzenia środowiskowego i ekonomicznego.

Jednym z innowacyjnych i przyjaznych dla środowiska zastosowań BFA jest jego wykorzystanie jako surowca do produkcji adsorbentów masowych, wykorzystując jego zdolność do samoutwardzania. BFA, po zmieszaniu z wodą, może utwardzać się i tworzyć monolity o wystarczającej wytrzymałości mechanicznej do niektórych zastosowań. Zdolność adsorpcji próbek można zwiększyć, zwiększając ich porowatość za pomocą środka spieniającego, takiego jak proszek aluminiowy (AP). Gęsta struktura ogranicza przepuszczalność dla cieczy, więc istnienie połączonych porów będzie sprzyjać wydajności adsorpcji. Zastosowanie adsorbentów masowych stanowi ulepszenie w stosunku do stosowania samego BFA, ponieważ umożliwia ich bezpośrednie wykorzystanie w złożach ubitych (adsorbenty proszkowe mogą wymagać użycia wewnątrz pojemnika (Novais i in. 2019), a po użyciu można je łatwo zebrać (Novais i in. 2018).

Według Huygens i in. (2019) oraz Zhai i in. (2022) w większości badanych popiołów ze spalania biomasy zawartość WWA jest niższa od norm UE, co umożliwia ich wykorzystanie jako nawozu. Ponadto niska zawartość metali ciężkich przemawia za wykorzystaniem popiołów jako nawozu (Zhai i in. 2021).

Mimo że dominującymi kierunkami odzysku odpadów energetycznych są nadal: przemysł materiałów budowlanych i budownictwo, budownictwo drogowe oraz górnictwo podziemne, coraz większą uwagę zwraca się na ich wykorzystanie w rolnictwie jako nawóz (Belviso i in. 2018; Vassilev i in. 2013). Wprowadzenie popiołu do gleby przyczynia się do poprawy migracji wody w glebie, zmniejszenia wymywania nawozów, zwiększenia pojemności sorbentów glebowych (stałych składników gleby biorących udział w sorpcji jonów wymiennych roztworu glebowego), zmniejszenia gęstości gleby i alkalizacji gleb kwaśnych (Yao i in. 2016).

Nie można pominąć faktu, że popioły ze spalania biomasy są najstarszym nawozem mineralnym. Ze względu na wysoką zawartość Ca i Mg, produkty uboczne spalania biomasy stanowią substytut nawozów wapniowych, wykazując właściwości odkwaszające (Wójcik i in. 2020). Ponadto popioły ze spalania biomasy są bogate w inne składniki nawozowe (K, P, S, Si i mikroelementy), dlatego mogą być stosowane jako podłoże do rekultywacji gleb i/lub nawóz poprawiający warunki wzrostu roślin (Mercl i in. 2016). Potwierdzają to wieloletnie badania Jacobsona i in. (2004), w których obserwowano trwały efekt poprawy pH nawet po 5–6 latach od zastosowania popiołów. Ponadto zastosowanie popiołu ze spalania zrębków drzewnych pozwala na zwiększenie plonu roślin na niektórych rodzajach gleb nawet o 45%, w porównaniu do tradycyjnych nawozów wapniowych (Barišić i in. 2022). Według Wierzbowskiej i in. (2020) wzbogacenie gleb popiołem zwiększyło

dostępność składników odżywczych, a poprzez zwiększenie pH gleby hamowało migrację potencjalnie toksycznych metali z gleby do roślin. Zastosowany popiół nie wpłynął na bioróżnorodność mikroorganizmów w glebie i nie oddziaływał negatywnie na kolonizację grzybów mikoryzowych. Według Lindvalla i in. (2015) alkaliczny odczyn produktów spalania biomasy powoduje, że nadaje się do pielęgnacji trawników, co zaobserwowano w badaniach, w których zastosowanie popiołu z biomasy miało pozytywny wpływ na plonowanie niektórych gatunków traw, w porównaniu z poletkami kontrolnymi, a wpływ popiołu na tempo wzrostu traw był porównywalny z działaniem innych nawozów mineralnych.

Jednym z podstawowych parametrów decydujących o wykorzystaniu popiołów do celów agrochemicznych i remediacyjnych jest zawartość zarówno CaO, jak i SiO₂. Tlenek wapnia spełnia w glebach dwa główne zadania: reguluje pH gleb kwaśnych oraz dostarcza wapnia w celu poprawy właściwości buforowych kompleksu sorpcyjnego, natomiast SiO₂ wpływa na retencję wody i kształtowanie struktury krystalicznej gleb (Piekarczyk i in. 2011a; Piekarczyk i in. 2011b). Popiół może być również stosowany do nawożenia plantacji roślin ekologicznych lub do wzbogacania gleb leśnych. Wydaje się więc, że jest to najbardziej ekologiczny i zrównoważony sposób ich utylizacji. Znaczna część makro- i mikroelementów pobranych przez rośliny z gleby powraca do siedliska, zamykając obieg pierwiastków. Aplikacja popiołu sprzyja poprawie plonu roślin oraz korzystnie wpływa na właściwości fizykochemiczne gleb (Jacobson i in. 2004).

W badaniach Piekarczyk i in. (2011b) właściwości popiołu ze słomy, pomimo zróżnicowania w zależności od warunków jego pozyskiwania, wskazują na możliwość wykorzystania tego odpadu do nawożenia i wzbogacania gleb. Badane próbki popiołu ze słomy pszennej, jęczmiennej, rzepakowej i siana z traw pastewnych charakteryzowały się średnio odczynem zasadowym (pH 10,2) oraz znaczną zawartością potasu - 155,7 g · kg⁻¹ K, wapnia - 124,0 g · kg⁻¹ Ca, fosforu - 15,1 g · kg⁻¹ P i magnezu - 7,3 g · kg⁻¹ Mg. Popiół ze słomy zawierał w swoim składzie chemicznym mikroelementy stosowane w nawożeniu roślin w ilości malejącej Fe > Mn > Zn > Cu. Niska, choć zmienna, naturalna zawartość metali ciężkich (Cr > Pb > Ni > Cd > Hg) nie jest przeciwwskazaniem do jej rolniczego wykorzystania.

Efekt wprowadzenia do gleby popiołu ze słomy jęczmienia zasadniczo utrzymywał się w ciągu czterech miesięcy prowadzenia badań. Zaobserwowano jedynie wyraźne zmniejszanie się wraz z upływem czasu koncentracji przyswajalnych dla roślin form potasu i żelaza w glebie. Popiół ze słomy jęczmienia jarego stosowany w dawkach do 1,0–2,0

$t \cdot ha^{-1}$ może zatem spełniać rolę nawozową. Z większymi jego dawkami wprowadza się do gleby bardzo duże ilości potasu przyswajalnego, jednak jego zawartość zmniejsza się w kolejnych miesiącach po aplikacji (Piekarczyk i in. 2011a).

W ostatnich latach popioły ze spalania biomasy są coraz częściej wykorzystywane jako materiał do poprawy jakości gleby w rolnictwie oraz w remediacji i rekultywacji gleb zanieczyszczonych. Wykorzystanie popiołu jako spoiwa jest również brane pod uwagę przy produkcji nawozów z innych odpadów, takich jak osady ściekowe. Popioły wydają się być cennym materiałem do poprawy plonów i wzrostu roślin. Jednakże ich bezpieczne wykorzystanie do celów środowiskowych wymaga rozległej wiedzy opartej na wynikach badań, uwzględniającej aspekty środowiskowe i techniczne oraz zmiany w przepisach prawnych. Ponadto, jak zauważyli Cruz i in. (2017), nadal istnieje niewiele informacji na temat potencjalnych zagrożeń dla środowiska wynikających z wymywania składników popiołu z biomasy w glebie i związanych z tym zagrożeń dla jej bioróżnorodności.

Jednakże wykorzystanie popiołów lotnych pochodzących ze spalania biomasy jest dynamicznie rozwijającym się zagadnieniem, które wciąż pozostaje niedostatecznie poznane, a strategia zagospodarowania/wykorzystania popiołów pochodzących ze spalania biomasy powinna opierać się przede wszystkim na składzie chemicznym popiołów, w szczególności na zawartości metali ciężkich lub WWA oraz parametrach geotechnicznych.

Możliwość wykorzystania popiołów ze spalania biomasy jest przedmiotem licznych dyskusji i komentarzy zarówno jej przeciwników, jak i zwolenników. Niezależnie od panującego trendu należy pamiętać, że utylizacja popiołów ze spalania biomasy powinna odbywać się zgodnie z najlepszymi praktykami technologicznymi i regulacjami prawnymi, przy zachowaniu efektywności ekonomicznej. W przypadku popiołów z biomasy obserwuje się dużą zmienność właściwości i składu, wynikającą ze zróżnicowania stosowanych surowców i warunków spalania. Dlatego poszukuje się nowych kierunków rozwoju, w tym syntezy zeolitów i geopolimerów, odzysku metali ziem rzadkich oraz produkcji tworzyw sztucznych.

Skład chemiczny popiołu z biomasy jest istotną cechą pozwalającą na ocenę zachowania się pierwiastków podczas spalania i użytkowania popiołów.

Wykorzystanie odpadów paleniskowych generowanych przez gospodarstwa domowe jest pozytywnym aspektem, ponieważ znacząco przyczynia się do zmniejszenia ilości odpadów trafiających na wysypiska. Wydaje się, że wykorzystanie odpadów paleniskowych

jest najkorzystniejszą opcją. Należy jednak zauważyć, że ich składowanie jest nadal najbardziej rozpowszechnioną formą.

Należy pamiętać, że wykorzystanie popiołu z biomasy jako nawozu wymaga dalszych i szczegółowych badań oraz długoterminowego monitorowania wpływu na gleby.

Wykorzystanie popiołów ze spalania biomasy w rolnictwie podlega różnorodnym regulacjom prawnym na poziomie Unii Europejskiej oraz Polski, które mają na celu zapewnienie bezpieczeństwa środowiskowego, ochronę zdrowia oraz zgodność z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym.

Rozważając wykorzystanie popiołów w zastosowaniach o wartości dodanej, wszystkie wysiłki muszą być zgodne z obowiązującymi przepisami i najlepszymi dostępnymi technologiami. Jednym z pierwszych kroków w celu zdefiniowania jest ocena, czy popiół jest klasyfikowany jako odpad niebezpieczny. Zgodnie z van Dijen i Pels (2020), w przypadku popiołów z biomasy kryteriami wyjściowymi w klasyfikacji są skład paliwa, technologia spalania, użyte dodatki i przepisy UE. Ponadto zawartość niespalonego węgla, CaO i fosforu może być wykorzystana do określenia działań niezbędnych do waloryzacji i wykorzystania popiołu. Rozważono kilka potencjalnych zastosowań popiołu z biomasy jako rodzaj zastosowań składowiskowych, np. nawozy w rolnictwie i leśnictwie, dodatki do produkcji kompostu, środki wapnujące w rolnictwie i leśnictwie, stabilizacja gleby, geopolimery, budowa dróg leśnych i stabilizacja osadów pogłębiarskich.

Dyrektywa UE w sprawie nawozów (EU Fertilizer Regulation 2019/1009) określa limity dla metali ciężkich i innych szkodliwych pierwiastków lub związków dla popiołów w nawozach lub zastosowaniach związanych z glebą. W UE ustawa o odpadach (646/2011), decyzja 2014/955/UE i zawiadomienie w sprawie wytycznych technicznych (2018/C 124/01) zawierają wytyczne dotyczące klasyfikacji odpadów i gospodarki odpadami.

Dyrektywa o odpadach (2008/98/WE)

W świetle Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE, z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy (tekst mający znaczenie dla EOG) Dz.U.UE.L.2008.312.3 popioły ze spalania biomasy są klasyfikowane jako odpad, co oznacza, że ich stosowanie w rolnictwie podlega szczegółowym regulacjom dotyczącym gospodarowania odpadami.

Hierarchia postępowania z odpadami (Art. 4 Dyrektywy 2008/98/WE). Dyrektywa wprowadza tzw. hierarchię postępowania z odpadami, która ma na celu minimalizację negatywnego wpływu na środowisko. Hierarchia ta obejmuje następujące kroki:

- zapobieganie (najwyższy priorytet),
- ponowne użycie,
- recykling,
- inne formy odzysku, np. odzysk energii,
- unieszkodliwianie (najniższy priorytet).

Zastosowanie popiołów ze spalania biomasy w rolnictwie, np. jako nawóz, wpisuje się w trzeci poziom hierarchii, czyli recykling, ponieważ popioły mogą być wykorzystane do poprawy jakości gleby, poprzez dostarczenie jej składników mineralnych.

Popioły ze spalania biomasy są zasadniczo klasyfikowane jako odpad, jednak mogą zostać uznane za produkt uboczny, jeżeli spełnią określone kryteria (Art. 5): Powstają jako nieodłączna część procesu produkcyjnego. Mogą być wykorzystane bez dalszej obróbki, poza zwykłymi metodami przemysłowymi. Są wykorzystywane zgodnie z prawem, bez szkody dla zdrowia ludzkiego i środowiska. Jeśli popioły spełniają te kryteria, mogą być uznane za produkt uboczny, co ułatwia ich stosowanie w rolnictwie bez konieczności przestrzegania przepisów dotyczących odpadów. Popioły mogą przestać być traktowane jako odpad, jeśli spełnią określone kryteria, które gwarantują, że mogą być bezpiecznie ponownie wykorzystane. Te kryteria muszą zostać ustanowione na poziomie krajowym lub unijnym i obejmują:

- spełnienie norm jakości,
- brak szkodliwego wpływu na zdrowie ludzi lub środowisko,
- zgodność z przepisami dotyczącymi produktów.

Jeśli popioły uzyskają status „końca odpadu”, mogą być traktowane jako surowiec wtórny, co umożliwia ich stosowanie w rolnictwie, np. jako nawóz bez konieczności traktowania ich jako odpad.

Dyrektywa o odpadach 2008/98/WE nadal obowiązuje, jednak została zmodyfikowana i zaktualizowana przez Dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851 z dnia 30 maja 2018 r. Oznacza to, że pierwotna Dyrektywa z 2008 roku nie została uchylona, lecz dostosowana do nowych celów Unii Europejskiej, zwłaszcza w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851).

Z kolei Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniła Dyrektywę 2008/98/WE w sprawie odpadów i jest częścią szerszego pakietu ustawodawczego dotyczącego gospodarki o obiegu zamkniętym, który ma na celu

poprawę zarządzania odpadami, zwiększenie recyklingu oraz zmniejszenie ilości odpadów składowanych na wysypiskach. Dyrektywa wpisuje się w politykę Unii Europejskiej dotyczącą gospodarki o obiegu zamkniętym, której celem jest minimalizacja ilości odpadów oraz maksymalizacja ponownego wykorzystania materiałów i surowców (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851). Dyrektywa kładzie większy nacisk na ponowne użycie, recykling i odzysk zasobów z odpadów, co sprzyja ograniczeniu wydobycia surowców pierwotnych. Wprowadzono nowe, bardziej ambitne cele w zakresie recyklingu odpadów komunalnych. Do 2025 r. państwa członkowskie mają osiągnąć 55% recyklingu odpadów komunalnych, do 2030 r. – 60%, a do 2035 r. – 65%. Cele dotyczą również odpadów opakowaniowych, w tym konkretne cele dla materiałów, takich jak plastik, drewno, metale żelazne, aluminium, szkło i papier/karton. Do 2035 r. ilość odpadów komunalnych kierowanych na składowiska ma zostać ograniczona do maksymalnie 10% całkowitej ilości odpadów generowanych przez państwo członkowskie. Składowanie odpadów stanowi najmniej pożądane rozwiązanie w hierarchii gospodarowania odpadami, dlatego nacisk położono na promowanie metod odzysku i recyklingu. Dyrektywa uściśla definicję odpadów oraz produktów ubocznych, co ma na celu umożliwienie większej ilości materiałów na ich ponowne wykorzystanie bez klasyfikacji ich jako odpady. Definicja końca statusu odpadu (End-of-Waste) została wzmocniona, aby jasno określić, kiedy odpad przestaje być odpadem i może być ponownie wprowadzony do obiegu jako produkt lub materiał wtórny. Dyrektywa nakłada większą odpowiedzialność na producentów za całkowity cykl życia produktów, które wprowadzają na rynek, w tym za odpady, które te produkty generują. Państwa członkowskie muszą zapewnić, że producenci będą finansować systemy zbierania i przetwarzania odpadów powstałych z ich produktów. EPR ma na celu zachęcenie producentów do projektowania bardziej zrównoważonych produktów, które są łatwiejsze do recyklingu i mają dłuższą żywotność. Dyrektywa wprowadza obowiązek przygotowywania krajowych programów zapobiegania powstawaniu odpadów, w których państwa członkowskie mają obowiązek podejmować działania na rzecz zmniejszenia ilości odpadów, w tym odpadów żywnościowych oraz ograniczania stosowania substancji niebezpiecznych w produktach. Szczególną uwagę położono na zmniejszenie produkcji odpadów plastiku. Dyrektywa zawiera przepisy dotyczące zarządzania odpadami niebezpiecznymi, zapewniając bardziej rygorystyczne wymagania w zakresie ich przetwarzania i śledzenia w celu ochrony zdrowia i środowiska.

Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 (REACH)

Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 (REACH) dotyczy rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów. Choć REACH koncentruje się na substancjach chemicznych w ogólnym obrocie, przepisy tego rozporządzenia mogą mieć zastosowanie do popiołów ze spalania biomasy stosowanych w rolnictwie, zwłaszcza w kontekście bezpieczeństwa i ochrony zdrowia oraz środowiska (Rozporządzenie (WE) Nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 roku).

Rejestracja substancji chemicznych (Art. 5 i Art. 6): Popioły ze spalania biomasy, traktowane jako produkt chemiczny, mogą podlegać obowiązkowi rejestracji w systemie REACH, jeśli są wprowadzane na rynek w ilościach powyżej 1 tony rocznie przez producenta lub importera. Podmioty, które chcą stosować popioły w rolnictwie (np. jako nawóz), muszą zarejestrować substancje chemiczne w popiołach, chyba że są one zwolnione z rejestracji (np. jeśli popioły spełniają określone kryteria wykluczenia, takie jak status odpadu) (Rozporządzenie (WE) Nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 roku).

Zwolnienia z rejestracji (Art. 2): Popioły ze spalania biomasy mogą być wyłączone z obowiązku rejestracji na mocy Art. 2 Rozporządzenia REACH, jeśli: Zostały zaklasyfikowane jako odpady w rozumieniu Dyrektywy 2008/98/WE. Odpady są zasadniczo wyłączone z obowiązku rejestracji w REACH, ale nadal podlegają przepisom o gospodarce odpadami. Są traktowane jako produkt uboczny lub uzyskały status końca odpadu (End-of-Waste), wtedy mogą być traktowane jako substancje chemiczne, które muszą spełniać wymogi REACH. Jeśli popioły ze spalania biomasy zostaną ponownie wprowadzone na rynek jako nawóz lub inny produkt rolniczy, mogą zostać objęte rejestracją, o ile nie spełniają innych kryteriów zwolnienia.

Ocena substancji chemicznych (Art. 44–48): Substancje chemiczne zawarte w popiołach muszą być oceniane pod kątem bezpieczeństwa dla zdrowia ludzi i środowiska. W ramach REACH obowiązuje wymóg sporządzania tzw. raportu bezpieczeństwa chemicznego (CSR), który musi określać ryzyka związane z użyciem popiołów oraz środki zapobiegawcze. Przed wprowadzeniem popiołów na rynek jako produkt stosowany w rolnictwie, należy ocenić ich potencjalne zagrożenia, szczególnie jeśli zawierają metale ciężkie lub inne niebezpieczne związki chemiczne, które mogłyby szkodzić glebom, roślinom lub wodom gruntowym.

Karty charakterystyki (Art. 31): W przypadku wprowadzania popiołów na rynek jako substancji chemicznych (np. nawozu) obowiązkowe jest dostarczenie karty charakterystyki

(Safety Data Sheet-SDS), zawierającej informacje o właściwościach chemicznych popiołów, potencjalnych zagrożeniach, środkach ochrony oraz zasadach bezpiecznego stosowania. Karta charakterystyki musi zawierać szczegółowe informacje na temat wszystkich potencjalnie niebezpiecznych substancji zawartych w popiołach, takich jak metale ciężkie (np. kadm, ołów), które mogą być obecne w resztkach po spalaniu biomasy (Rozporządzenie (WE) Nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r.).

Substancje wzbudzające szczególnie duże obawy (SVHC) (Art. 57): Jeśli popioły zawierają substancje wzbudzające szczególnie duże obawy (SVHC), np. niektóre metale ciężkie lub związki chemiczne, które mogą kumulować się w glebie lub powodować długotrwałe szkody w środowisku, mogą podlegać dodatkowemu monitorowaniu i ograniczeniom. W przypadku takich substancji może być wymagane uzyskanie zezwolenia na stosowanie w określonych celach rolniczych.

Ograniczenia (Art. 67–73): Popioły ze spalania biomasy mogą podlegać ograniczeniom wynikającym z przepisów dotyczących substancji chemicznych, które mogą być szkodliwe dla zdrowia lub środowiska. Ograniczenia te mogą dotyczyć np. maksymalnych dopuszczalnych stężeń niebezpiecznych związków chemicznych w popiołach. W przypadku popiołów stosowanych jako nawóz w rolnictwie istotne jest, aby ich skład chemiczny był zgodny z normami dotyczącymi bezpieczeństwa żywności i ochrony środowiska. Oznacza to konieczność kontroli poziomu potencjalnie niebezpiecznych substancji, takich jak kadm, rtęć czy ołów ((Rozporządzenie (WE) Nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r.).

Ocena zagrożeń dla zdrowia i środowiska (Art. 14): Producent lub importer, wprowadzając popioły ze spalania biomasy na rynek, musi przeprowadzić ocenę zagrożeń dla zdrowia ludzi i środowiska. W przypadku zastosowania popiołów w rolnictwie (np. jako nawóz), oceniane są ich potencjalne skutki dla gleby, wód gruntowych oraz ekosystemu rolniczego. W przypadku wykrycia jakichkolwiek zagrożeń, konieczne jest wdrożenie odpowiednich środków zaradczych, które minimalizują ryzyko, np. poprzez ograniczenie stosowania lub wprowadzenie specjalnych zaleceń dotyczących użytkowania.

Rozporządzenie (UE) 2019/1009 dotyczące produktów nawozowych

Rozporządzenie (UE) 2019/1009 dotyczące produktów nawozowych wprowadza ramy prawne dla udostępniania na rynku produktów nawozowych w Unii Europejskiej.

Rozporządzenie to dotyczy także popiołów ze spalania biomasy, jeśli są one stosowane w rolnictwie jako nawozy.

Popioły te mogą być używane w rolnictwie pod warunkiem, że spełniają odpowiednie wymogi określone w Rozporządzeniu, zwłaszcza w zakresie bezpieczeństwa i zrównoważenia. Oto główne aspekty tego Rozporządzenia dotyczące stosowania popiołów w rolnictwie.

Rozporządzenie obejmuje wszystkie produkty nawozowe UE, w tym nawozy organiczne, organiczno-mineralne, środki poprawiające właściwości gleby, biostymulatory roślin i materiały wapnujące. Popioły ze spalania biomasy mogą być sklasyfikowane jako nawóz lub materiał poprawiający właściwości gleby, pod warunkiem, że spełniają wymagania dotyczące składu, bezpieczeństwa i wpływu na środowisko (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 z dnia 5 czerwca 2019 r.).

Popioły ze spalania biomasy mogą zostać zaklasyfikowane w ramach jednej z kategorii funkcyjnych produktów nawozowych (PFC), np.:

- PFC 1(A): Nawóz organiczno-mineralny;
- PFC 1(B): Nawóz organiczny;
- PFC 2: Środek poprawiający właściwości gleby.

W zależności od rodzaju popiołów i ich składu chemicznego, możliwe jest ich wykorzystanie jako materiał wzbogacający glebę, dostarczający mikro- i makroelementy (np. wapń, potas, fosfor).

Rozporządzenie (UE) 2019/1009 ustanawia szczegółowe kryteria dotyczące składu chemicznego oraz maksymalnych dopuszczalnych poziomów zanieczyszczeń w produktach nawozowych. W przypadku popiołów ze spalania biomasy ważne są następujące przepisy:

- Zawartość metali ciężkich: Maksymalne dopuszczalne poziomy metali ciężkich, takich jak kadm, ołów, rtęć, chrom i arsen, są ściśle regulowane. Popioły muszą spełniać te normy, aby mogły być stosowane jako nawozy;
- Zawartość związków organicznych: W Rozporządzeniu uwzględniono także limity dla niektórych związków organicznych, które mogą występować w popiołach, co ma na celu minimalizację ryzyka zanieczyszczenia gleby;
- Stabilność chemiczna i bezpieczeństwo: Popioły muszą być chemicznie stabilne i nie mogą powodować negatywnych skutków dla zdrowia ludzkiego, zwierząt czy środowiska (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 z dnia 5 czerwca 2019 r.).

W Polsce nadrzędnym aktem prawnym odnoszącym się do popiołów lotnych jest Ustawa dotycząca odpadów z dnia 14 grudnia 2012. Aby dostosować polskie prawo do Dyrektyw Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE należało dokonać wiele zmian. Ustawa niosła za sobą wprowadzenie nowych definicji oraz kwalifikacji odpadów, które mają przyczynić się do efektywniejszego ich wykorzystania. Według art. 10 ustawy, popioły stanowią grupę odpadów przemysłowych, należących do kategorii z grupy 10 – tzw. odpady z procesów termicznych, podgrupa 10 01 odpady z elektrowni i innych zakładów energetycznego spalania surowców energetycznych takich jak węgiel kamienny i węgiel brunatny. Kategoria ta obejmuje (Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r.):

- popioły lotne ze spalania węgla kamiennego oraz z węgla brunatnego,
- mieszanki popiołowo-żużłowe z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych,
- żużle ze spalania węgla kamiennego i brunatnego,
- produkty odsiarczania według metody suchej oraz mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych,
- według metod suchych lub półsuchych odsiarczania spalin oraz spalania w złożu fluidalnym stałe odpady z wapniowych metod odsiarczania spalin, w tym gips poreakcyjny, produkty odsiarczania według metody półsuchej.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie listy rodzajów odpadów, które mogą być przetwarzane poza instalacjami lub urządzeniami: Określa, które odpady, w tym popioły, mogą być wykorzystywane w procesach rolniczych, np. jako nawóz. Zgodnie z tym Rozporządzeniem popioły ze spalania biomasy mogą być stosowane w określonych warunkach, np. po uprzednim badaniu ich składu chemicznego (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 maja 2015 r.).

Ustawa o nawozach i nawożeniu z dnia 10 lipca 2007 r. określa zasady stosowania produktów nawozowych w rolnictwie. Aby popioły mogły być używane jako nawóz, muszą spełniać odpowiednie wymagania dotyczące jakości i bezpieczeństwa. W przypadku nawozów organicznych, w tym tych z popiołów, obowiązują przepisy dotyczące maksymalnej zawartości metali ciężkich i innych substancji szkodliwych (Dz.U. 2007 nr 147 poz. 1033).

Stosowanie popiołów ze spalania biomasy w rolnictwie wpisuje się w cele gospodarki o obiegu zamkniętym (circular economy), której założeniem jest maksymalizacja

ponownego wykorzystania zasobów oraz minimalizacja odpadów. Popioły, które są produktem ubocznym procesu spalania biomasy, mogą być skutecznie wykorzystane jako surowiec wtórny w rolnictwie, co ogranicza potrzebę wprowadzania nowych surowców oraz zmniejsza ilość odpadów.

Zastosowanie popiołów w rolnictwie jako nawozu może poprawić właściwości gleby, dostarczając jej niezbędnych minerałów, takich jak wapń, potas i fosfor, co sprzyja zrównoważonemu zarządzaniu zasobami naturalnymi. Dzięki wykorzystaniu popiołów w rolnictwie można zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych związanych z produkcją i transportem sztucznych nawozów, co przyczynia się do osiągnięcia celów klimatycznych UE.

Europejski Zielony Ład to strategia UE mająca na celu osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku. Popioły jako produkt odpadowy mogą zastąpić nawozy syntetyczne, co zmniejsza eksploatację surowców naturalnych, takich jak fosforyty. Popioły stosowane zgodnie z wymogami Rozporządzenia nawozowego UE mogą poprawić jakość gleby, zwiększając jej produktywność bez naruszania równowagi ekosystemów. Wykorzystanie popiołów w rolnictwie jako produktu ubocznego z biomasy przyczynia się do ograniczenia emisji CO₂, wspierając dążenie do niskoemisyjnego rolnictwa, które jest kluczowym celem Zielonego Ładu.

Chociaż popioły ze spalania biomasy mogą być korzystne dla gleby, istnieje ryzyko wprowadzenia do niej szkodliwych substancji, takich jak metale ciężkie. Dlatego tak ważne jest przestrzeganie limitów zawartych w przepisach, aby chronić gleby przed degradacją i zanieczyszczeniem. W kontekście Zielonego Ładu, rozwijane są nowe technologie przetwarzania i wykorzystywania popiołów, które mogą zwiększyć ich przydatność w rolnictwie, jednocześnie zmniejszając ich potencjalne zagrożenie dla środowiska.

3.2. Popiołów z biomasy w nawozach wieloskładnikowych

Jednym z głównych celów gospodarki cyrkularnej jest promowanie wykorzystywania surowców wtórnych (Duque-Acevedo i in. 2020). Przemysł nawozowy opiera się na sprawdzonych technologiach związanych z wykorzystaniem rezerw zasobów kopalnych, dlatego odzysk składników odżywczych ze strumieni odpadów byłby istotnym krokiem w kierunku zrównoważonego rozwoju (Chojnacka i in. 2020). Alternatywnym surowcem wtórnym do produkcji nawozów mogą być wysokobiałkowe odpadowe materiały skórzane. Pozostałości garbarskie poddane hydrolizie mogą stanowić źródło azotu

aminokwasowego, który wpływa stymulująco na rozwój roślin (począwszy od fazy kiełkowania) oraz zwiększa ich odporność na stres biotyczny i abiotyczny (Chojnacka i in. 2021). Mimo, że rośliny mogą same syntezować aminokwasy, to zastosowanie gotowych preparatów przyspiesza procesy metaboliczne i dynamikę ich wzrostu, maksymalizując plon, zwłaszcza w niekorzystnych warunkach atmosferycznych (Popko i in. 2018). Z kolei, odpady hutnicze mogą stanowić alternatywne źródło mikroelementów nawozowych (Cu, Zn, Fe), które dostarczone roślinom (w odpowiedniej dawce i formie) mogłyby wspomagać ich rozwój i zapewnić wysoką jakość plonów.

Rośliny wykorzystują tylko połowę azotu dostarczonego z nawozów. Około 25% azotu to straty, z czego 20% jest uwalniane do atmosfery w postaci amoniaku i tlenków NO_x, a pozostałe 5% jest wymywane do wód gruntowych i powierzchniowych. NO₂ jest niebezpieczny dla środowiska, ponieważ jest jednym z gazów powodujących efekt cieplarniany. Podaje się, że 60% tlenków azotu emitowanych do atmosfery pochodzi z produkcji rolnej (Savci 2012). Wysoka chemizacja w produkcji rolnej prowadzi również do obniżenia jakości wód (z klasy I do III i IV), a także pogłębia problem zarastania zbiorników wodnych. Nadmiar azotu i fosforu w wodzie powoduje masowy rozwój glonów i wyższych form roślinnych, redukując stężenie tlenu i natężenie światła w zbiornikach, a tym samym zmniejsza różnorodność biologiczną w ekosystemie (Aziz i in. 2015). Spośród wszystkich elementów środowiska, gleba jest najbardziej narażona na degradację. Niewłaściwa dawka i rodzaj nawozu może prowadzić do akumulacji soli w roztworze glebowym, a w konsekwencji do zakwaszenia lub zasolenia podłoża. Nadmierne nawożenie zwiększa ryzyko zanieczyszczenia lub nawet skażenia gleb metalami ciężkimi. Wpływa na to jakość surowców, zwłaszcza fosforytów i apatytów, które zawierając pierwiastki toksyczne (np. kadm) i przyczyniają do chemicznej degradacji gleby. Oprócz arsenu, kadmu, ołowiu i rtęci, do metali toksycznych należą również miedź i cynk, które jednocześnie są mikroelementami niezbędnymi dla prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin. Okazuje się jednak, że ich wysoka koncentracja w roztworze glebowym również tworzy niesprzyjające warunki, które zaburzają plonowanie (Khan i in. 2018).

Obecnie gospodarka funkcjonuje według modelu liniowego zgodnie z zasadą “wytwórz-użyj-wyrzucić” (ang. “make-take-waste”), gdzie celem nadrzędnym jest intensywna produkcja i konsumpcja, w wyniku której powstaje znaczna ilość odpadów. Jednokierunkowy przepływ materiałów i energii pomiędzy gospodarką, a przyrodą spowodował, że globalne rezerwy surowców naturalnych znacznie się skurczyły. Liniowe zużycie zasobów przyczyniło się również do zmian środowiskowych, w tym zubożenia gleb,

puścynienia, wyczerpywania się zasobów wodnych oraz zaniku bioróżnorodności. Rozwiązaniem problemu zaspokojenia potrzeb rosnącej populacji bez nadmiernej eksploatacji nieodnawialnych surowców i degradacji środowiska jest cykliczny przepływ materiałów i energii (Sadhukhan i in. 2020). Gospodarka cyrkularna jest modelem ekonomicznym, który jest skoncentrowany na efektywnym zarządzaniu zasobami zarówno surowcami, jak i odpadami (Smol 2021). Szacuje się, że Unia Europejska mogłaby zyskać nawet 600 mld euro rocznie dzięki zmianom gospodarczym. W przeciwieństwie do modelu liniowego, gospodarka cyrkularna stymuluje nowe możliwości biznesowe poprzez ponowne wykorzystanie materiałów i energii odnawialnej (słonecznej, wiatrowej) oraz odpadów w całym cyklu życia produktu. Skupia się na regeneracji, naprawie i ulepszeniu komponentów, ponieważ model CE został stworzony głównie przez praktyków (takich jak decydenci, przedsiębiorcy, konsultanci biznesowi). Gospodarka o obiegu zamkniętym wymaga mniejszych nakładów energii i zasobów, a zatem jest bardziej ekonomiczna niż konwencjonalny recykling. Zgodnie z założeniami CE, materiał powinien przejść ścieżkę odzysku w celu ponownego użycia, odnowienia i naprawy, recyklingu, spalania i dopiero unieszkodliwienia. Takie podejście pozwala zachować najwyższą możliwą wartość materiału, a jednocześnie oszczędzać energię tak długo, jak to możliwe (Korhonen i in. 2018). Model CE ma na celu zmniejszenie zużycia materiałów pierwotnych, energii, wytwarzania odpadów i emisji poprzez wdrożenie kaskady odnawialnych cykli energetycznych i materiałowych. Doprowadzi to do obniżenia kosztów produkcji, w tym kosztów surowców i energii, a także kosztów związanych z gospodarką odpadami i kontrolą emisji.

Popioły ze spalania biomasy zawierają chlorki, siarczany, tlenki i wodorotlenki, ale też są źródłem potasu, fosforu i magnezu, co może być przydatne w rolnictwie. Z uwagi na właściwości alkalizujące, popioły mogą być stosowane wyłącznie na glebach kwaśnych albo do neutralizacji odpadów kondycjonowanych kwasami mineralnymi (Lanzerstorfer 2019). Wysokobiałkowe pozostałości roślinne (np. rośliny strączkowe) lub zwierzęce (np. pióra lub skóra) można poddać hydrolizie kwaśnej lub zasadowej, w wyniku której uzyskuje się aminokwasy – źródło azotu organicznego. Działają one stymulująco na rośliny, zwiększając dostępność i przyswajalność składników odżywczych (chelaty aminokwasowe). Wadą hydrolizy kwaśnej (2M HCl lub 4M H₂SO₄) jest degradacja tryptofanu. Z kolei, podczas hydrolizy zasadowej (2M NaOH) rozkładowi ulega cysteina, seryna, treonina i arginina (Tavano 2013).

Nawozy organiczno-mineralne można uzyskać poprzez połączenie różnych odpadów, np. alkalicznych popiołów ze spalania biomasy i osadów ściekowych kondycjonowanych kwasem mineralnym (Chojnacka i in. 2022).

Popioły z biomasy mogą być cennym składnikiem biofertylizatorów, przyczyniając się do poprawy jakości gleby i zwiększenia plonów. W celu uzyskania optymalnych efektów, popioły można mieszać z kompostem, obornikiem lub innymi naturalnymi materiałami organicznymi. Pozwala to na zrównoważenie składu odżywczego i zwiększenie efektywności biofertylizatora. Ważne jest precyzyjne dostosowanie ilości popiołu do potrzeb gleby, biorąc pod uwagę jej aktualny skład chemiczny oraz pH.

Ocena wartości nawozowej biofertylizatorów produkowanych z odpadów rolniczych nie jest prosta i jednoznaczna. Jest to klasyczny przykład *czarnej skrzynki*. Skład chemiczny tego typu nawozu nie stanowi bezpośredniego kryterium oceny jego wpływu na wzrost roślin, plon i jego wartość odżywczą (Diacono i in. 2019; Nkoa 2014). Reakcja roślin uprawnych wynika zarówno z działania bezpośredniego, jak i pośredniego (Foereid 2019; Chojnacka i in. 2020). Biofertylizator jest źródłem składników odżywczych dla rośliny, ale ich zawartość w formie bezpośrednio dostępnej jest zwykle niska (Möller i in. 2012). Pośrednie efekty biofertylizatorów wynikają głównie z ich wpływu na procesy glebowe (Vaneckhaute i in. 2013). Z tych powodów walidacja tej grupy nawozów wymaga uwzględnienia trzech grup kryteriów: produkcyjne, ekologiczne i zdrowie człowieka (Przygocka-Cyna i in. 2018). Kryteria produkcyjne walidacji tej grupy nawozów obejmują: plon, skład chemiczny jadalnych części roślin, w tym zawartość związków organicznych, azotu i innych składników odżywczych oraz metali ciężkich (Przygocka-Cyna i in. 2018; Murtić i in. 2018; Pastorelli i in. 2021). Kryteria ekologiczne dotyczą wpływu biofertylizatora na szybkość mineralizacji materii organicznej gleby, zawartość i dostępność głównych składników odżywczych, zawartość i dostępność metali ciężkich i przenoszenie metali ciężkich z gleby do rośliny (Dragicevic i in. 2018). Ocena ryzyka wpływu biofertylizatora na zdrowie człowieka wynika zarówno z zawartości niepożądanych składników, głównie metali ciężkich w jadalnych częściach roślin, jak i wysokości ich spożycia (Bertato 2019). Zawartość metali ciężkich w jadalnych częściach warzyw podlega rygorystycznej kontroli (Mehlich 1984).

Północnoamerykański przemysł celulozowo-papierniczy generuje znaczne ilości popiołu drzewnego (WA) i osadu papierniczego (SL) jako odpadowych produktów ubocznych (Cherian, Siddiqua 2019). Aby zmniejszyć koszty utylizacji i potencjalne zanieczyszczenie środowiska, WA i SL mogą być wykorzystywane jako cenne alternatywne

źródła składników odżywczych dla produkcji roślinnej (Camberato i in. 2006). Oba materiały zawierają różne niezbędne składniki odżywcze, które są korzystne dla wzrostu roślin, w tym azot (N), fosfor (P), potas (K), wapń (Ca) i mikroelementy (Norrie, Fierro 2020; Rodríguez i in. 2019). Odpady z papierni przechodzą proces utleniania podczas przetwarzania, w wyniku czego powstaje SL z dostępnymi dla roślin składnikami odżywczymi (Pereira i in. 2020).

Ze względu na niską żyzność i wysoką kwasowość gleby NL wymagają regularnego stosowania wapna i nawozów w celu uzupełnienia pierwiastków niezbędnych do wzrostu roślin (Kedir i in. 2021). Pobieranie składników odżywczych i wydajność produkcji w uprawach mogą spaść nawet o 40%, gdy pH jest niższe niż 5,9. Przy pH poniżej 5,0 (bardzo kwaśnym) Al, Fe i mangan (Mn) stają się bardziej dostępne, co jest toksyczne dla upraw. Nadmiar Al^{3+} może ograniczać wzrost korzeni i ich funkcjonowanie w uprawach (Hajiboland i in. 2023).

Skuteczność WA i SL jako środków wapnujących różni się w zależności od zawartości węglanów i wodorowęglanów, potencjału wapnowania, szybkości aplikacji, początkowego i docelowego pH gleby przyjmującej oraz rozpuszczalności w porównaniu do wapienia (LIME) (Royer-Tardif i in. 2019; Yang i in. 2018). Potencjał neutralizujący WA i SL może wynosić odpowiednio od 8%–90% i 12%–60% (Kar i in. 2014). Ponadto WA i SL zawierają materię organiczną i niezbędne składniki odżywcze dla wzrostu roślin, takie jak azot (N), wapń (Ca), magnez (Mg), potas (K) i fosfor (P) (Cruz i in. 2023).

Głównym czynnikiem ograniczającym wykorzystanie odpadów z papierni do produkcji roślinnej są obawy dotyczące zanieczyszczeń organicznych i metali ciężkich (Hanson i in. 2023). Javed i in. (2024) oceniali potencjał wykorzystania odpadów papierniczych WA i SL samodzielnie i w połączeniu z BC do wapnowania i kondycjonowania gleby w celu wsparcia produkcji żywic rocznej. Ich wyniki sugerują znaczny potencjał WA jako alternatywnego materiału do wapnowania i poprawy plonów żywic rocznej uprawianej na glebach bielcowych NL. Z drugiej strony, SL może mieć ograniczony potencjał ze względu na ryzyko zwiększenia unieruchomienia N i resztkowego mineralnego N w glebie, gdy warunki wzrostu są ograniczone. Połączenie SL z WA lub BC wydaje się łagodzić te ryzyka. Przyjęcie tych poprawek do systemów produkcji polowej wymaga poważnego rozważenia w NL i innych regionach o podobnych glebach lub wyzwaniach.

Różnice odnośnie zawartości chlorofilu spowodowane zastosowaniem wapna, popiołu, kompostu i ich mieszanin były u pszenicy stosunkowo niewielkie (Stankowski

i in. 2014). Tendencję do uzyskania największej zawartości chlorofilu stwierdzono dla wariantów z udziałem kompostu BIOTOP, co jest uzasadnione wobec faktu, że kompost był materiałem zawierającym najwięcej azotu. Szereg Autorów (Sulewska i in. 2007; Panasiewicz i in. 2009; Panasiewicz i in. 2009; Jarecki i in. 2013) przedstawia dane wskazujące, że odczyty SPAD odzwierciedlające stan odżywienia roślin azotem rosną wraz ze wzrostem zastosowanej dawki nawozu. Wprowadzenie preparatu miało mały wpływ na zawartość chlorofilu, różnice w reakcji w poszczególnych wariantach miały przypadkowy charakter. Indeks powierzchni liści zmieniał się pod wpływem zastosowanego nawożenia i wahał się 3,40 do 5,02 m². W przypadku pszenicy zastosowanie popiołu lub wapna oraz ich łącznie miało ujemny wpływ na badaną cechę. Wartość zbliżoną do uzyskanej dla wariantu kontrolnego stwierdzono po zastosowaniu wariantu popiół + kompost + wapno. W wyniku wprowadzenia nawozu o istotnej zawartości azotu uzyskano wzrost wielkości powierzchni asymilacyjnej łanu przypadającą na jednostkę powierzchni pola. W dotychczas prowadzonych badaniach szereg Autorów (Sulewska i in. 2007; Panasiewicz i in. 2009; Jarecki i in. 2013) wskazuje że na wielkość współczynnika LAI korzystnie wpływa nawożenie azotem. Zastosowanie preparatu Efektywne Mikroorganizmy EM nie miało wpływu na LAI w przypadku uprawy pszenicy odmiany Bombona (Stankowski i in. 2014). Zastosowanie produktów odpadowych jest celowe ze względu na ograniczenie konieczności ich składowania. Ich efektywność zależy jednak od wielu czynników – składu chemicznego, przyswajalności składników, wielkości dawki czy rodzaju gleby i uprawianej rośliny (Piekarczyk i in. 2011).

Stosowanie popiołów ma jednak pewne ograniczenia. Popioły mogą zawierać metale ciężkie, takie jak kadm, ołów, rtęć czy arsen, które w nadmiernych ilościach mogą szkodzić roślinom, a także przedostawać się do łańcucha pokarmowego, stanowiąc zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt. Dlatego przed ich zastosowaniem należy przeprowadzić analizę chemiczną pod kątem zawartości zanieczyszczeń.

Skład popiołów zależy od rodzaju spalanej biomasy (drewno, słoma, odpady roślinne) oraz od procesu spalania. Biomasa pochodząca z różnych źródeł może dostarczać różne ilości składników odżywczych oraz zanieczyszczeń. Brak standardowej jakości popiołów może być problemem przy ich komercyjnym zastosowaniu, dlatego konieczne jest regularne badanie składu i dostosowywanie dawek nawozowych. Popioły z biomasy są bogate w składniki mineralne, ale pozbawione substancji organicznej, co może ograniczać ich pozytywny wpływ na glebę w porównaniu do nawozów organicznych, takich jak kompost czy obornik. Popioły z biomasy mogą zawierać znaczne ilości rozpuszczalnych soli

(głównie potasu i wapnia), co przy ich nadmiernym stosowaniu może prowadzić do zasolenia gleby, zwłaszcza w przypadku gleb o słabej przepuszczalności. Zmiana pH i struktury chemicznej gleby spowodowana zastosowaniem popiołów może wpływać na mikroflorę i mikrofaunę glebową, co w dłuższym okresie może prowadzić do zmian w ekosystemie gleby.

3.3. Kukurydza – charakterystyka gatunku

Kukurydza jest jedną z najstarszych i najbardziej rozpowszechnionych roślin uprawnych. Jest użytkowana jako roślina jadalna, pastewna i przemysłowa. Zalicza się ją do grupy zbóż właściwych (*Cerealina*), tzw. traw gruboziarnistych. Zboża należą do klasy: jednoliściennych (*Monocotyledones*), rodzina traw (*Gramineae*), podrodziny: wiechlinowate (*Poaceae*).

Niższym szczeblem klasyfikacji są: plemię majsowe (*Maydeae*), podplemię kukurydzowe (*Zeinae*), a najniższym ogniwnem systematyki to rodzaj: kukurydza (*Zea*). Trawy są roślinami zielnymi, jednorocznymi lub wieloletnimi, o charakterystycznej budowie. Cechą charakterystyczną plemienia roślin są: morfologia narządów rozmnażania, jednopłciowość (rozdzielność płciowość) kwiatów oraz osobliwa budowa łodygi. Można też spotkać inne systemy klasyfikacji botanicznej. Dalszym ciągiem klasyfikacji zbóż to podział rodzajów na gatunki, a te dzieli się na podgatunki i odmiany botaniczne (*varietas*). Następnym szczeblem systematyki są odmiany hodowlane (*cultivar*), stanowiące rośliny jednego gatunku, o zbliżonych właściwościach biologicznych, możliwie wyrównanych cechach morfologicznych, odznaczające się szczególnymi cechami użytkowymi. Odmiana botaniczna charakteryzuje się tylko wyróżniającymi cechami morfologicznymi, pomija się cechy użytkowe.

Kukurydza może dobrze plonować na każdym rodzaju gleby, niemniej jednak pewne problemy mogą pojawić się na stanowiskach bardzo ciężkich – zlewnych, trudno nagrzewających się i okresowo nadmiernie wilgotnych. Z kolei na glebach bardzo lekkich przy deficycie wody w okresach krytycznych dla kukurydzy (kwitnienie, nalewanie ziarna) istnieje ryzyko spadku plonu ziarna na skutek niedostatecznego wykształcenia kolb czy słabego wykształcenia ziarna. Kukurydza jest bardzo tolerancyjna na przedplon. Jest to modelowy przykład gatunku do uprawy w monokulturze. W przypadku długotrwałej monokultury należy zwrócić uwagę na aspekt ekologiczny takiej uprawy – głównie pod

kątem kompensacji chwastów oraz szkodników, a także zubożenia gleby w mikroskładniki i jej erozję (Michalski i in. 2018).

Kukurydza należy do roślin o relatywnie niskich wymaganiach glebowych. Na lekkich glebach plony zależą od kultury roli, dostępności wody i stopnia zakwaszenia (pH). Na glebach kwaśnych (pH poniżej 5) można się spodziewać znacznego obniżenia plonów. Kukurydza wykazuje dużą tolerancję stanowiska, może być także uprawiana po sobie, o ile nie ma przeciwwskazań z tytułu występowania określonych szkodników bądź chorób. Reaguje ujemnie na stanowisko po burakach cukrowych zbieranych ciężkim sprzętem mechanicznym, ze względu na nadmierne ugniecenie gleby. Bez względu na kierunek użytkowania, kukurydza tylko w plonie głównym daje gwarancję wysokich i stabilnych plonów. Podstawowym zabiegiem uprawowym jest głęboka orka zimowa (ok. 30 cm). Orka wiosenna jest niewskazana, a jeśli jest ona konieczna, należy wykonać ją jak najwcześniej z wałami ugniatającymi. Zabiegi wiosenne należy zacząć od włókania i bronowania, w celu wyrównania pola, zapobieżenia utracie wody i niszczenia wschodzących chwastów. Bezpośrednio przed siewem należy glebę spulchnić agregatem przedsewnym do głębokości siewu (Michalski i in. 2018).

Kukurydza jest rośliną rzadkiego siewu i dlatego dobre przygotowanie roli oraz dokładność siewu mają ogromne znaczenie. Siew kukurydzy w optymalnym terminie przypada pomiędzy 20 kwietnia a 5 maja. Temperatura gleby w okresie siewu powinna wynosić nie mniej niż 8 °C, co zapewnia szybkie i równomierne wschody. Naturalnym wskaźnikiem rozpoczęcia siewu jest kwitnienie mniszka lekarskiego, wczesnych czereśni oraz porzeczki. Przyspieszenie, jak i opóźnienie siewu w stosunku do optymalnego terminu, jest niewskazane. Siewy zbyt wczesne, szczególnie przy chłodnej wiosnie mogą pogorszyć wschody, zaś siewy późne zawsze obniżają plony. Gęstość siewu kukurydzy uzależniona jest od warunków środowiskowych, kierunku użytkowania i wczesności odmiany. Nadmierne zagęszczenie powoduje szybsze wyczerpanie zapasów wody, zmniejsza fotosyntezę i zwiększa ilość drobnych, słabo zaziarnionych kolb. Roślina ta wymaga równomiernego wysiewu na jednakowe odległości i pożądaną głębokość 3-4 cm na glebach ciężkich i 5-6 cm na glebach lekkich (co zależy od wilgotności gleby w danym roku). W uprawie tej rośliny najlepiej sprawdza się siewnik z redlicami talerzowymi (Michalski i in. 2018).

Ponadto wieloletnie obserwacje wskazują, że termin siewu wpływa na wilgotność ziarna podczas zbioru. Każdy dzień opóźnienia siewu wiosną to konieczność opóźnienia zbioru jesienią nawet o 4-6 dni. O możliwym terminie siewu kukurydzy decyduje

temperatura gleby, a nie temperatura powietrza. Temperatura gleby w czasie siewu na głębokości 6-8 cm powinna wahać się od 6 do 8 °C, co umożliwi szybkie spęcznienie ziarna i wzrost korzonka zarodkowego oraz kielka. Optymalny termin siewu przypada między trzecią dekadą kwietnia w rejonie południowo-wschodnim i południowo-zachodnim, a pierwszą dekadą maja w pozostałych rejonach.

Głębokość siewu kukurydzy zależy od rodzaju gleby i terminu siewu, co związane jest z dostępnością wilgoci niezbędnej w okresie kiełkowania. Należy kierować się zasadą: im gleba lżejsza lub późniejszy termin, to siew kukurydzy powinien być wykonany głębiej. Na glebach średnich i cięższych, a więc bardziej wilgotnych i zimnych oraz przy wcześniejszych siewach większość zaleceń jako optymalną głębokość siewu ziarna kukurydzy podaje 3-5 cm. Natomiast na glebach lżejszych i siewach opóźnionych głębokość siewu należy zwiększyć do 5-7 cm.

Kukurydza niezależnie od kierunku użytkowania odmiany wymaga równomiernego rozmieszczenia roślin na powierzchni, co determinuje jednakowe warunki rozwoju dla poszczególnych osobników. Gwarancją optymalnej gęstości siewu ziarna, a w rezultacie obsady powschodowej roślin daje siew punktowy. O obsadzie powschodowej roślin decyduje gęstość siewu ziarna oraz jego PZW. Gęstość ziarna to ilość ziarna (wyrażona w szt. ziarna na 1 m² lub 1 ha) wysiana na jednostce powierzchni. Z kolei PZW (wyrażona w %) to połowa zdolność wschodów. Uzależniona jest ona przede wszystkim od miejscowych warunków siedliskowych oraz zdolności kiełkowania ziarna, która koryguje wartość gęstości siewu i obsady powschodowej.

Dobór właściwej odmiany do rejonu uprawy, warunków środowiska i kierunku użytkowania kukurydzy jest jednym z ważniejszych czynników plonowania. Kukurydza jest uprawiana przede wszystkim w celu uzyskania dwóch produktów użytkowych: ziarna albo plonu ogólnego suchej masy roślin z możliwie dużym udziałem kolb. Znaczenie obfitego plonu kolb zmniejsza się w przypadku odmian hodowanych w kierunku uzyskania dużej masy strawnej, zawartej w wegetatywnej frakcji roślin. Modyfikacją paszowego wykorzystania ziarna jest kiszonka z ześrutowanych kolb kukurydzy (CCM). Każde z wymienionych zastosowań kukurydzy wymaga nieco innych cech, którymi powinny charakteryzować się odmiany (Metodyka integrowanej ochrony i produkcji kukurydzy, opracowanie zbiorowe, IOR PIB, Warszawa 2023).

Ponadto, jako uniwersalne kryteria doboru do uprawy należy uwzględnić następujące cechy fizjologiczne i odpornościowe odmian: reakcja na chłody i niekorzystne zjawiska początkowej fazy wzrostu. Newralgiczny dla kukurydzy jest okres kiełkowania, wschodów

i początku wegetacji. Wigor początkowy poszczególnych odmian jest dość wyraźnie zróżnicowany, podobnie jak podatność na choroby. Przy uprawie na ziarno najważniejszą chorobą pochodzenia grzybowego jest fuzaryjna zgorzel łodyg powodująca wyleganie dojrzewających roślin. Stopień podatności odmian na fuzariozy jest warunkowany genetycznie i warto to uwzględnić przy przewidywanym opóźnieniu zbioru kukurydzy, tym bardziej, że opanowanie kolb przez grzyby *Fusarium* przeważnie jest równoznaczne ze zwiększoną ilością mikotoksyn w paszy. Występowanie innych chorób bardziej jest związane z warunkami wegetacji w danym roku. Najbardziej widoczną z tych chorób jest głównie guzowata kukurydzy, znacznie obniżająca plon i wartość pokarmową paszy oraz reakcja odmian na szkodniki. Różnice wrażliwości roślin wynikają głównie z różnic morfologicznych odmian (omszenie liści, twardość tkanek rośliny). Silniej atakowane są też odmiany wczesne. W rejonach największego zagrożenia przez omacnicę prosowiankę ograniczenie szkodliwości zapewnią zabiegi agrotechniczne (dokładne rozdrobnienie słomy kukurydzy, głęboka orka) i unikanie monokultury (Gąsiorowski 2008).

W uprawie kukurydzy korzystnie jest zastosować obornik w okresie jesiennym przed orką przedzimową. W przypadku kukurydzy kiszonkowej, która jest uprawiana w plonie wtórnym, może być on stosowany przed orką siewną wykonaną pod międzyplon w dawce 20-30 t · ha⁻¹. Dobrym źródłem składników pokarmowych w uprawie kukurydzy jest również gnojowica, którą najlepiej użyć w okresie jesiennym, z kolei na glebach lżejszych w okresie wczesnowiosennym w dawkach od 80 do 100 m³ · ha⁻¹. Warto dodać, że jesienią stosuje się wyższe dawki, a na przedwiośniu – niższe. Należy pamiętać, że przy jesiennej aplikacji nawozów naturalnych w okresie wiosennym składniki mineralne należy uzupełnić w ilości 50% całkowitych zalecanych dawek azotu, fosforu i potasu (Cai 2018).

Ważnym składnikiem plonotwórczym w uprawie kukurydzy jest azot. W uprawie kukurydzy na ziarno dawki azotu wynoszą od 100 kg N · ha⁻¹ na glebach lekkich, mało zasobnych (przy przewidywanym plonie 4-5 t · ha⁻¹) do 160 kg N · ha⁻¹ na glebach ciężkich, żyznych zasobnych przy zakładanym plonie 8-10 t · ha⁻¹. Z kolei w uprawie kukurydzy na kiszonkę dawki tego składnika powinny wynosić od 100 kg N · ha⁻¹ na glebach lekkich, mało zasobnych (przy przewidywanym plonie 10-12 t · ha⁻¹) do 180 kg N · ha⁻¹ na glebach ciężkich, żyznych zasobnych przy zakładanym plonie 16-18 t · ha⁻¹ (Peng i in. 2010).

Kukurydza charakteryzuje się wolnym tempem wzrostu, zwłaszcza w początkowych fazach rozwojowych, dlatego też zaleca się stosowanie nawozów azotowych wolniej działających, które zawierają w swoim składzie formę amonową oraz amidową azotu. Zaleca się aplikację azotu w dwóch dawkach, przy czym od 50 do 70% jego całkowitej dawki należy

wnieść przed siewem roślin, zaś pozostałą część zastosować w fazie 4-6 liści, tak by rośliny mogły korzystać z tego nawozu w późniejszych fazach rozwojowych. Zwłaszcza że intensywne pobieranie tego składnika przez kukurydzę rozpoczyna się na kilka dni przed kwitnieniem wiech i wzrasta aż do dojrzewania roślin. Od kwitnienia do pełnej dojrzałości kukurydza pobiera ponad połowę całej zalecanej dawki azotu, przy czym pobieranie tego makroskładnika zależy od temperatury i ulega osłabieniu w temperaturze poniżej 5°C, co może prowadzić do zahamowania rozwoju roślin w początkowym okresie wzrostu (Subedi, Ma 2005).

Efektywne wykorzystanie azotu przez rośliny w znacznym stopniu uzależnione jest od optymalnego zaopatrzenia roślin w siarkę, której kukurydza pobiera średnio 30-40 kg · ha⁻¹. W uprawie kukurydzy bez nawożenia organicznego należy zastosować siarkę w ilości 1/5-1/8 zalecanej dawki azotu (Gallais, Hirel 2004).

Kukurydza wykazuje wysokie potrzeby pokarmowe w stosunku do potasu, którego najintensywniejsze pobieranie przypada na okres kwitnienia, po czym stopniowo maleje. W uprawie tej rośliny na ziarno dawki potasu wynoszą od 60 kg K₂O · ha⁻¹ na glebach ciężkich, żyznych zasobnych (przy przewidywanym plonie 4-5 t · ha⁻¹) do 120 kg K₂O · ha⁻¹ na glebach lekkich, mało zasobnych, przy zakładanym plonie 6-7 t · ha. Natomiast w uprawie kukurydzy na kiszonkę dawki potasu wahają się w przedziale od 80 kg K₂O · ha⁻¹ na glebach ciężkich, żyznych zasobnych (przy przewidywanym plonie 10-12 t · ha⁻¹) do 160 kg K₂O · ha⁻¹ na glebach lekkich, mało zasobnych, przy zakładanym plonie 16-18 t · ha⁻¹.

¹. Potas wpływa na proces fotosyntezy i transport asymilatów, jak również zwiększa odporność kukurydzy na stesy abiotyczne i biotyczne. Przy niedoborze tego składnika następuje zahamowanie wzrostu, słabe wypełnienie ziarna, jak również zwiększa się skłonność roślin do wylegania, szczególnie przy intensywnym nawożeniu azotowym (Fallah, Neisani 2017; Von Pinho i in. 2009).

Kukurydza charakteryzuje się mniejszym zapotrzebowaniem na fosfor w stosunku do azotu i potasu. Wpływa on korzystnie na rozwój systemu korzeniowego, wykształcenie ziarna i dojrzewanie roślin. W okresie wiosennym często występuje ograniczenie pobierania fosforu przez rośliny, co związane jest z niską temperaturą gleby, gdyż w czasie wschodów oraz w początkowym okresie rozwoju kukurydzy temperatura gleby wynosi poniżej 12 °C.

W uprawie kukurydzy na ziarno dawki fosforu wynoszą od 40 kg P₂O₅ · ha⁻¹ na glebach ciężkich, żyznych zasobnych (przy przewidywanym plonie 4-5 t · ha⁻¹) do 100 kg P₂O₅ · ha⁻¹ na glebach lekkich, mało zasobnych, przy zakładanym plonie 6-7 t · ha⁻¹ oraz na glebach średnich, średnio zasobnych (przy przewidywanym plonie 8-10 t · ha⁻¹). Z kolei w uprawie

kukurydzy na kiszonkę dawki fosforu powinny wynosić od 30 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ na glebach ciężkich, żyznych zasobnych (przy przewidywanym plonie 10-12 t $\cdot ha^{-1}$) do 130 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ na glebach lekkich, mało zasobnych, przy zakładanym plonie 16-18 t $\cdot ha^{-1}$.

Fosfor, podobnie jak potas, należy w całości zastosować przed siewem roślin. W przypadku aplikacji nawozów wieloskładnikowych, ze względu na prawie 3-krotnie większe pobranie potasu w stosunku do fosforu, należy aplikować nawóz o szerszym stosunku P:K, na przykład 1:3 do 1:2,7.

W uprawie kukurydzy nie należy również zapominać o zaopatrzeniu roślin w magnez i wapń, a także niezbędne mikroelementy, takie jak cynk, mangan, bor i miedź. Magnez i wapń należy dostarczać roślinom doglebowo w okresie jesiennym lub wiosennym, z kolei mikroskładniki można aplikować w nawożeniu startowym podczas siewu kukurydzy, względnie zaleca się stosować je dolistnie, najczęściej w fazie 6-8 liści. Przy okazji wapnowania gleb można zastosować nawożenie regenerujące, stosując między innymi wapno magnezowe. Z kolei nawożenie podstawowe, zwłaszcza wykonane w okresie wiosennym, należy wносить z wykorzystaniem nawozów szybko działających, które zawierają składnik rozpuszczalny w wodzie, np. z wykorzystaniem kizerytu stanowiącego, poza magnezem, źródło siarki.

Kukurydza na każdą tonę ziarna z odpowiednią ilością słomy pobiera 10 kg MgO i 10 kg CaO oraz 85 g cynku, 110 g manganu, 11 g boru i 14 g miedzi. Z kolei z plonem 10 t zielonki roślina ta pobiera około 12 kg MgO i 20 kg CaO, a także 150 g cynku i 150 g manganu oraz 17 g boru i 13 g miedzi. Przy braku nawożenia organicznego w okresie jesiennym wiosenne nawożenie magnezem powinno stanowić 75-100% potrzeb pokarmowych roślin. Na glebach o niskiej zasobności w przyswajalne formy magnezu należy zwiększyć nawożenie tym składnikiem w celu dodatkowego podniesienia zasobności gleby do poziomu średniego. Z kolei na glebach charakteryzujących się bardzo wysoką lub wysoką zasobnością w magnez można zrezygnować z nawożenia doglebowego tym składnikiem, względnie znacznie go ograniczyć, a wykonać tylko dokarmianie dolistne magnezem.

W uprawie kukurydzy magnez wpływa na proces kwitnienia i zapyłania, stąd też w warunkach jego niedoboru następuje ograniczenie zawiązywania kolb oraz pogorszenia ich zaziarnienia. Cynk z kolei wpływa na rozwój systemu korzeniowego, jak również stymuluje pobieranie i fizjologiczną aktywność azotu. Przedłuża także żywotność pyłku, sprzyja nalewaniu ziarna oraz chroni kukurydzę przed suszą i sprzyja jej regeneracji po ustąpieniu warunków stresowych. Natomiast bor odpowiada za zawiązki kolb, wpływa na

prawidłowe zapylenie i wypełnienie kolb ziarnem, a także zwiększa sztywność łodyg, ograniczając wyleganie i chroni rośliny przed szkodnikami. Miedź z kolei przyspiesza termin zbioru kukurydzy oraz poprawia wydajność i jakość ziarna (Smalberger i in. 2006).

Kiedy kukurydza siana jest po zbożach (stanowisko słabe, niska zasobność), dawki azotu powinny być wyższe, zaś po dobrym przedplonie dawki mogą być niższe (Wang i in. 2014). Nawożenie azotem na glebach żyznych można zastosować jednorazowo przed siewem w postaci wolno działających nawozów, jak np. mocznik, siarczan amonu. Na glebach słabszych wskazane jest dzielenie dawki na część przedsiewną i pogłówną. W ciągu ostatnich czterech dekad światowa produkcja kukurydzy znacznie wzrosła (FAO 2018), głównie ze względu na stosowanie nawozów azotowych. Na całym świecie nawozy azotowe były szeroko stosowane w nadmiarze w celu uzyskania wyższych plonów ziarna (Meng i in. 2016; Cui i in. 2009). Na przykład średnia dawka nawozu azotowego stosowana przez rolników była większa niż 300 kg ha^{-1} ($288 \pm 113 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), co znacznie przekracza optymalne dawki N dla kukurydzy wykazane w eksperymentach polowych (Zhang i in. 2023; Yang i in. 2017; Chang i in. 2014). Nawóz azotowy był stosowany w nadmiarze ($350\text{--}600 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$) (Mueller i in. 2013) w celu maksymalizacji plonów na Nizinie Północnochińskiej. Jednak nadmierne stosowanie nawozu azotowego ma negatywny wpływ na uprawy, znacznie zmniejsza efektywność wykorzystania azotu (NUE) i powoduje znaczne straty w wyniku wymywania azotanów (ponad 50% N do środowiska) oraz wpływa na zanieczyszczenie wód gruntowych (Suchy i in. 2018; McBratney, Field 2015; Wang i in. 2014; Erisman i in. 2013).

Zmniejszenie dawek nawozów azotowych z tego poziomu do poziomów „umiarkowanych” na polach kukurydzy może poprawić NUE, utrzymać uczciwy poziom plonu ziarna kukurydzy (Qiang i in. 2019; Zhao i in. 2010) i wykazywać mniej negatywnych skutków dla środowiska. Aby wdrożyć zmniejszone dawki nawozów azotowych, konieczne jest ocenienie, w jakim stopniu dawka nawozu azotowego jest zgodna z zapotrzebowaniem upraw na azot, aby zmaksymalizować wykorzystanie zasobów i utrzymać stosunkowo wysokie plony ziarna (Zhang i in. 2015; Robertson, Vitousek 2009).

Powolny początkowy wzrost kukurydzy powoduje, że straty plonu wywołane przez chwasty są szczególnie duże. Mechaniczne zwalczanie chwastów przy pomocy bronowania przedwschodowego i opielaczy nie zabezpiecza plantacji przed zachwaszczeniem. Do ochrony chemicznej przed chwastami zaleca się stosować dostępne na rynku herbicydy. Szczególną uwagę należy zwrócić na to, że niektóre herbicydy nie są selektywne w stosunku do niektórych odmian, dlatego przed ich zastosowaniem należy dokładnie zapoznać się

z instrukcją stosowania danego środka oraz sprawdzić wrażliwość odmiany na dany preparat.

Szacuje się, że choroby kukurydzy w skali kraju mogą powodować bezpośrednie ubytki w plonie ziarna w wysokości do 10-15%, a w połączeniu ze szkodnikami nawet do 20-30%. Duże znaczenie ma również ich pośrednia szkodliwość, związana ze spadkiem jakości ziarna, zwłaszcza jeżeli jest ono wykorzystywane na cele paszowe oraz w przetwórstwie. Ponadto niektóre patogeny, jak np. grzyby z rodzaju *Fusarium*, mogą wytwarzać mikotoksyny. Są to silne trucizny, których poziom zawartości w ziarnie i produktach wytwarzanych z kukurydzy jest poddawany kontroli.

3.4. Kiszonki z kukurydzy – wytwarzanie i znaczenie

Nawożenie kukurydzy wpływa bezpośrednio na jej wzrost, skład chemiczny i jakość kiszonki, która jest powszechnie wykorzystywana jako pasza w żywieniu bydła mlecznego i mięsnego. Optymalne nawożenie przyczynia się do uzyskania wysokowydajnych roślin o odpowiednim składzie odżywczym, co ma kluczowe znaczenie dla jakości kiszonek.

Kukurydza (*Zea mays* L.) jest nie tylko ważną rośliną podstawową do produkcji żywności dla milionów ludzi, ale także ważną rośliną paszową, która najczęściej obecnie wykorzystywana jest w postaci wysokoenergetycznej kiszonki. Kukurydza wyhodowana specjalnie na kiszonkę, zwana kukurydzą kiszonkową, ma potencjał do produkcji wysokich plonów o wysokiej zawartości energii i może być spożywana przez przeżuwacze w dużych ilościach. Kukurydza na kiszonkę jest nadal jedną z najlepszych opcji suplementacji, szczególnie w porze suchej, ze względu na wysoką wydajność produkcji suchej masy na jednostkę powierzchni, wysoki plon zielonej masy z hektara, wysoką zdolność fermentacji podczas przechowywania i dobrą akceptację przez zwierzęta (Restle i in. 2006). Regiony produkujące kiszonkę z kukurydzy to Ameryka Północna (AP), Europa, Azja i Pacyfik, Ameryka Łacińska i kraje Azji Środkowo-Wschodniej, przy czym dominują kraje AP, z udziałem w rynku kiszonki z kukurydzy wynoszącym 40,1%. Dzięki zaawansowanym technologiom produkcja kiszonki z kukurydzy w USA stale rosła w ciągu ostatnich 20 lat, a w 2020 r. wyniosła 137,675 mln ton (Statista 2022).

Europa, drugi wiodący region na rynku kiszonki z kukurydzy, produkuje 34,2% udziału. Wielka Brytania jest znaczącym krajem w regionie europejskim, który zwiększył produkcję kiszonki z kukurydzy wraz ze wzrostem konsumpcji produktów zwierzęcych. Pozostałe regiony mają łącznie 25,7% udziału w rynku kiszonki z kukurydzy. Wartość rynku

kiszonki z kukurydzy wyniosła 342,4 mln USD w 2022 r. i przewiduje się, że do 2032 r. wzrośnie do 677,33 mln USD. Szacuje się, że rynek kiszonki z kukurydzy wykaże złożoną roczną stopę wzrostu (CAGR) na poziomie 7,1% w okresie prognozy. Popularność kiszonki z kukurydzy rośnie ze względu na jej wysoką zawartość energii i łatwą strawność dla przeżuwaczy.

W kilku krajach kiszonka z trawy była podstawową paszą dla krów mlecznych w okresie zimowym. Jednak wydajność suchej masy, wartość odżywcza i właściwości zakiszania kieszonki z traw podlegają znacznym wahaniom. Dodatkowo, kieszonka z traw ma niższy potencjał spożycia suchej masy i energii, ograniczając tym samym jej skuteczność w diecie bydła mlecznego o wysokiej produkcji mleka (O'mara i in.1998). W przypadku kukurydzy, większość hybryd dostępnych na rynku została opracowana w celu poprawy wydajności ziarna. Hodowla mieszańców na kieszonkę wymaga jednak zwrócenia uwagi nie tylko na plon ziarna, ale także na wiele cech jakościowych, w tym wysoki plon suchej masy (dry matter yield DMY), wystarczająco wysoką zawartość suchej masy (Dry matter content DMC), wysoką jakość paszy dla przeżuwaczy i wysokie spożycie przez zwierzęta gospodarskie. Hodowla na kieszonkę również różni się od hodowli mieszańców paszowych, ponieważ w przypadku kieszonki ziarno jest najbogatszym źródłem dostępnych węglowodanów w kukurydzy. Jakość słomy zależy od klimatu i systemów uprawy. Na przykład, dłuższy fotoperiod i niższe temperatury generują większą suchą masę rośliny. Dlatego też kryteria poprawy jakości kukurydzy na kieszonkę będą się różnić w zależności od kraju i systemu uprawy.

Zbiór plonów w optymalnym stadium na kieszonkę ma kluczowe znaczenie. Najlepszym fizjologicznym stadium dojrzałości ziarna kukurydzy na kieszonkę jest stadium półmleczne, o optymalnej wilgotności 30%-35%. W fazie półmlecznej połowa ziarna jest wypełniona mlecznym bielmem, co znacznie przyspiesza proces fermentacji, a pozostała część to twarda skrobia trawiona przez przeżuwacze (Ma, Dwyer 2012). Niska DMC spowodowana wczesnymi zbiorami skutkuje niską suchą masą kieszonki, która może być niewystarczająca, a tym samym ogranicza spożycie paszy i wydajność zwierząt. Niska DMC powoduje również straty składników odżywczych podczas zakiszania (odcieki). $DMC < 30\%$ dodatkowo zwiększa ryzyko psucia się kieszonki. Opóźnienie zbiorów skutkuje również niską smakowitością, a tym samym zmniejszonym spożyciem.

W miarę dojrzewania kukurydzy w okresie wypełniania ziarna zwiększa się zawartość s.m. i skrobi oraz zmniejsza się zawartość neutralnego włókna detergentowego (NDF) (Phipps i in. 2000). Stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości skrobi, zawartość ADF

i NDF zmniejsza się z powodu ujemnej korelacji między nimi (Sutton i in. 2000). Ponadto, szklistość ziarniaków (tj. udział szklistości w bielmie) wzrasta wraz z dojrzałością (Correa 2002) i jest związana ze zmniejszoną degradacją skrobi w żwaczu (Ettle i in. 2001) i zwiększonym trawieniem skrobi po żwaczu (Sutton i in. 2000). Zbiór kukurydzy w późniejszych etapach jej dojrzałości może mieć negatywny wpływ na jej jakość odżywcza. Harika i Sharma (1994) stwierdzili, że opóźnienie zbioru kukurydzy prowadziło do zmniejszenia zawartości białka surowego i podatności na rozkład suchej masy, a także do wzrostu zawartości NDF i ADF we frakcji liści i łodyg.

Podobnie, Irlbeck i in. (1993) stwierdzili, że zbiór kukurydzy 28 dni po osiągnięciu dojrzałości fizjologicznej skutkowało wyższym stosunkiem ziarna do kiszonki, zwiększonym stężeniem NDF, ADF i kwaśnej ligniny detergentowej (ADL) w kiszonce, niższym plonem kiszonki i zmniejszonym stężeniem strawnej *in vitro* suchej masy, CP i węglowodanów niestrukturalnych ogółem w kiszonce, w porównaniu z kukurydzą zbieraną w dojrzałości fizjologicznej.

Pollmer i in. (1979a) badali zdolność kukurydzy flint i dent do plonowania i postawili hipotezę, że wysoki procent białka i plon białka dojrzałego ziarna może być spowodowany intensywnym pobieraniem azotu, wydłużeniem fazy pobierania azotu i wysoką translokacją tego składnika. Nie stwierdzili oni (Pollmer i in. 1979b) znaczących różnic w zawartości białka i wigorze we wczesnych fazach wegetacji, ale zaobserwowali znaczące różnice w innych składnikach plonu i cechach kwitnienia. Ma to szczególne znaczenie, bowiem czas kwitnienia (FTi) w kukurydzy jest ważną i złożoną cechą agronomiczną o krytycznym znaczeniu dla schematów płodozmianu.

Optymalna zawartość s.m. w kukurydzy stosowanej do zakiszania wynosi 300-350 g · kg⁻¹. Zakiszanie kukurydzy o zawartości s.m. <250 g · kg⁻¹ skutkuje niższą wydajnością mleka i zawartością białka. Zakiszanie kukurydzy o zawartości s.m. >350 g · kg⁻¹ wykazuje zmniejszoną zawartość NDF i zwiększoną zawartość skrobi. Spadek strawności włókna może być związany z negatywnym wpływem diety o wyższej zawartości skrobi na trawienie włókna w żwaczu, co ostatecznie może prowadzić do kwasicy żwacza (Khan i in. 2015).

Ziarno kukurydzy składa się głównie ze skrobi, która stanowi około 75% DMY ziarna i służy jako główne źródło energii w przemyśle mleczarskim. Wartość odżywcza kukurydzy pastewnej w dużej mierze zależy od degradacji skrobi (Canizares i in. 2011). Bielmo kukurydzy zawiera >85% skrobi, która działa jako znaczący substrat do fermentacji

w żwaczu, co prowadzi do produkcji znacznych ilości kwasu propionowego, który jest silnym źródłem energii (Stevnebo i in. 2006).

W kiszonce z całych roślin typowa zawartość skrobi wynosi około 25%–30% całkowitej suchej masy. Zwiększenie zawartości skrobi i strawności poprawia wydajność krów mlecznych karmionych wyłącznie dietą z kiszonki kukurydzianej (Oba, Allen 1999b). Strawność skrobi jest w dużym stopniu uzależniona od etapu dojrzewania, obróbki ziarna i długości okresu kiszenia i jest skorelowana z zawartością białka. Słoma kukurydziana jest zazwyczaj uboga pod względem odżywczym w stosunku do ziarna kukurydzy. Zawiera ona ograniczone ilości węglowodanów rozpuszczalnych w wodzie i jest uboga w białko, a bogata w błonnik (NDF). Philippeau i Michalet-Doreau (1998) porównali degradowalność skrobi w żwaczu ziaren siekanych, niekiszonych i kiszonych. Kukurydza dent miała wyższą wartość strawności niż kukurydza flint. Jednak kiszenie kukurydzy zwiększyło degradowalność skrobi w żwaczu średnio o 5,8% zarówno dla kukurydzy dent, jak i flint. Kiszona kukurydza dent wykazała lepszą strawność skrobi w porównaniu z kukurydzą flint (Philippeau, Michalet-Doreau 1998).

Białko jest głównym składnikiem żywienia zwierząt gospodarskich. Ponieważ białko obecnego w kiszonce nie można bezpośrednio zmierzyć, do oszacowania ilości prawdziwego białka i azotu niebiałkowego są używane CP i zawartość azotu w kiszonce. Kiszonka z kukurydzy ma zwykle niską zawartość białka (Khan i in. 2012). Bakterie powodujące fermentację nie mogą metabolizować kiszonki ani paszy, jeśli nie ma odpowiedniej ilości CP. Ostatecznie wpływa to na spożycie kiszonki przez zwierzęta i zmniejsza jej strawność. CP jest często używane jako wskaźnik jakości paszy, ale nie wartości energetycznej. Niską zawartość CP można skorygować poprzez uzupełnienie określonych mączek z nasion oleistych i paszy ze strączków.

Lignina jest polimerem fenylopropanoidów, zwanych również monolignolami. Jednostki guaiacylowe (G), syringylowe (S) i p-hydroksyfenylowe (H) stanowią większość ligniny kukurydzy. Lignina zapewnia wsparcie strukturalne i wytrzymałość ściany komórkowej. Zmniejsza również utratę wody i wnikanie patogenów chorobotwórczych (Dean, Eriksson 1994). Ze względu na negatywny wpływ na dostępność składników odżywczych włókna roślinnego, lignina jest uważana za składnik kiszonki niskiej jakości. Lignifikacja reguluje ilość strawnego włókna, stąd ma bezpośredni i istotny wpływ na wartość strawnej energii (DE) paszy (Jung, Allen 1995). Dlatego lignifikacja zmniejsza stężenie energii trawiennej w paszy i ilość suchej masy spożywanej przez zwierzęta (Moore 1993).

Włókno to część ściany komórkowej, która jest częściowo trawiona przez przeżuwacze (Moore, Hatfield 1994). Zwiększone stosowanie nawozów azotowych może istotnie zwiększyć CP i zmniejszyć zawartość ADF i NDF w roślinach (Kaplan i in. 2016; Yolcu, Cetin 2015; Liu i in. 2011).

Mikroelementy odgrywają ważną rolę w różnych procesach metabolicznych i pomagają utrzymać podstawowe procesy w organizmach bydła, takie jak regulacja enzymów i biosynteza chemiczna. Zwierzęta posiadają szeroką gamę enzymów, które zawierają cynk lub inne pierwiastki w białkach układów biologicznych, które są zależne od cynku, w celu prawidłowego funkcjonowania i zachowania swojej integralności strukturalnej. Cynk odgrywa ważną rolę immunologiczną, uczestniczy w syntezie hormonów, podziale komórek i równowadze elektrolitów we krwi. Podobnie selen (Se) jest dodawany do paszy dla zwierząt w celu poprawy ich odżywiania i zdrowia.

Większość energii zużywanej przez przeżuwacze pochodzi ze skrobi i włókien kiszonki; jednak zawartość tłuszczu odgrywa również znaczącą rolę. Zawartość kwasów tłuszczowych i skład kiszonki kukurydzianej są bardzo zmienne, głównie ze względu na różnice w dojrzałości podczas zbioru (Khan i in. 2015). Różne nienasycone kwasy tłuszczowe determinują jakość kiszonki, przy czym najbardziej wyraźne efekty mają kwasy α -linolenowy, palmitynowy i oleinowy. Ich optymalne stężenia nieuchronnie wpływają na jakość mleka. Wyższe zawartości kwasu linolenowego zmniejszają poprzez biohydratację zawartość tłuszczu mlecznego.

Dobra kiszonka wydziela lekko słodki lub owocowy zapach ze względu na obecność kwasu mlekowego. Kwas octowy jest drugim najczęściej występującym produktem końcowym fermentacji, który jest dość lotny i zapewnia łagodny zapach octu w normalnej kiszonce. Kiszonka o zjełczałym, rybim lub zgniłym zapachu, żółtozielonym lub ciemnobrązowym kolorze i śluzowatej konsystencji jest wynikiem zanieczyszczenia *Clostridium*. *Clostridium* przekształcają kwas mlekowy i nadmiar cukrów roślinnych w kwas masłowy i octowy. Zjełcziała kiszonka ma zazwyczaj obniżoną wartość energetyczną i białkową. Etanol jest uważany za jeden z najważniejszych lotnych związków kiszonki kukurydzianej. Ponadto alkohole mogą reagować z kwasami organicznymi w kiszonce, wytwarzając estry i dodając owocowego aromatu. Ograniczone badania wskazują na istotną korelację między tymi zapachami, a poziomami estrów etylowych i propylowych mleczanu i octanu, a prawdopodobnie także kwasu fenylloctowego (Kung i in. 2018).

Przy dobrej fermentacji kiszonki występuje stosunek 2,5–3,0. Kwas mlekowy jest najskuteczniejszym kwasem fermentacyjnym odpowiedzialnym za obniżenie pH kiszonej

świeżej paszy. Ponadto wysoki poziom rozpuszczalnego białka w kiszonce może szybko ulegać degradacji. Należy więc dodawać amoniak. Amoniak (NH_3) łączy się z jonami H^+ , tworząc jon amonu (NH_4^+), który pomaga w osiągnięciu przez pH kiszonki pożądanego poziomu (Kung i in. 2018). Stosunek kwasu mlekowego do kwasu octowego jest powszechnym wskaźnikiem jakości kiszonki. Inne kwasy uwalniane z kiszonki to kwas butanowy, heksanowy, pentanowy, propionowy i 3-metylobutanowy. Im wyższa zawartość całkowitego cukru rozpuszczalnego (TSS) w łądydze, tym lepszy aromat i kwasowość. Zwiększenie zawartości cukru w łądydze kukurydzy poprawia proces fermentacji. Polimerowe węglowodany łądygi muszą zostać rozbite na cukry proste i przekształcone w kwas mlekowy i etanol. Gdy łądyga kukurydzy ma wysoką zawartość cukru (mono-, di- i oligosacharydów), bakterie potrzebują mniej energii do wytworzenia kwasu mlekowego, niż w przypadku bardziej złożonych węglowodanów, co prowadzi do wydajnej fermentacji (Bian i in. 2015).

Aby sprostać wysokiemu i stale rosnącemu zapotrzebowaniu na żywność, rolnictwo musi nieustannie zwiększać swoją produkcję (Penuelas i in. 2023). Wysokie plony można uzyskać, zapewniając im dostęp do optymalnej ilości składników odżywczych. Doprowadziło to do pojawienia się obszarów nadmiernie nawożonych nawozami mineralnymi, co spowodowało zanieczyszczenie środowiska ze źródeł rolniczych. Dlatego istnieje potrzeba bardziej wydajnego wykorzystania składników odżywczych z nawozów przez rośliny w celu ochrony środowiska i jednocześnie zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego.

Obliczenia wykazały, że ekstremalnie wysokie dawki azotu stosowane w latach 80. (do 500 kg N/ha) w uprawie na glebach piaszczystych kukurydzy z przeznaczeniem na kiszonkę powodowały duże straty wskutek wymywania NO_3^- , sięgające kilkuset kilogramów na hektar rocznie (Schröder i in. 1987). Jednak obecne straty wymywania azotanów z kukurydzy kiszonkowej są znacznie mniejsze, głównie z powodu norm stosowania azotu, zarówno w nawozach organicznych, jak i mineralnych (Schröder i in. 2009). Pomimo tego stężenia azotanów w wodach gruntowych na glebach piaszczystych z uprawą kukurydzy kiszonkowej nadal często przekraczają normę 50 mg NO_3^- określoną w Dyrektywie Azotanowej. Wyniki programu monitoringu jakości wód w regionach rolniczych wykazały, że w latach 2009–2015 średnie stężenie azotanów w górnej części wód gruntowych wynosiło 37 mg NO_3^- w przypadku użytków zielonych ($n = 10\,354$) i 95 mg NO_3^- w przypadku upraw kukurydzy ($n = 3219$) (Hooijboer i in. 2017).

Kukurydza jest wrażliwa na niedobór Zn w odżywianiu i w związku z tym reaguje pozytywnie na nawożenie Zn, przede wszystkim poprzez zwiększenie jego zawartości w ziarnie i łodygach (Grujčić i in. 2021). W badaniach Petković i in. (2022) dolistne stosowanie Zn doprowadziło do zwiększenia jego zawartości w kukurydzy. Efektywność zastosowanego Zn była wyższa w 2015 r. w porównaniu do 2014 r. Wyższą efektywność w drugim roku można wyjaśnić niższymi uzyskanymi plonami i wyższą zawartością Zn w roślinach w wyniku jego większego pobierania.

W Polsce w latach poprzedzających eksperyment systematycznie zwiększała się produkcja kukurydzy na kiszonkę: 2010 rok – 395 tys. ha; 2013 rok – 462 tys. ha; 2015 rok – 555 tys. ha; 2017 rok – 596 tys. ha (Central Statistical Office, 2022). Włączenie obornika do nawożenia kukurydzy na kiszonkę może mieć istotny wpływ na powodzenie jej uprawy, wpływając nie tylko na wysokość plonu, ale również na obniżenie kosztów uprawy.

Badanie Wysokińskiego i Kożuchowskiej (2024) wykazały, że plon biomasy kukurydzy wzrastał w pierwszym roku po zastosowaniu nawozu króliczego (RM) do $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ i N_{\min} do $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Wysokiński, Kożuchowska 2024). Dalsze wzrosty do $60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ RM i $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ N_{\min} nie doprowadziły do istotnego zwiększenia plonu kukurydzy. W drugim roku badań uzyskano wzrost plonu w porównaniu do zabiegu bez zastosowania RSM, po zastosowaniu dwóch najwyższych dawek (40 i $60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). Poza tym zróżnicowane stosowanie N_{\min} nie różnicowało istotnie plonów rośliny testowej, co jest zgodne z ideą szybkiego, ale krótkotrwałego efektu nawozowego nawozów azotowych. Azot stosowany w małych dawkach jest głównym czynnikiem ograniczającym wzrost roślin kukurydzy. Zwiększenie podaży azotu zmniejsza produktywność zastosowanego N, ponieważ plon jest determinowany przez czynniki inne niż ograniczający składnik odżywczy (Bernardi i in. 2022; Ma i in. 2023). W badaniach Sulewskiej i in. (2007) kukurydza w uprawie na ziarno i kiszonkę plonowała lepiej po zastosowaniu nawozów naturalnych niż mineralnych.

Reasumując, nawożenie ma duży wpływ na zawartość składników pokarmowych w kiszonce, w tym białka, skrobi, włókna oraz makro- i mikroelementów, które są istotne z punktu widzenia wartości odżywczej paszy dla zwierząt.

4. Hipoteza badawcza i cel badań

Popiół ze spalania biomasy może być cennym surowcem do produkcji nawozów wieloskładnikowych. Ze względu na swoje pochodzenie i klasyfikację jako odpad, konieczna jest nie tylko ocena jego właściwości nawozowych, ale także zawartości metali ciężkich. Kluczowe będzie również zbadanie ich obecności w glebie oraz roślinach uprawnych, co może wpłynąć na bezpieczeństwo i efektywność stosowania takich nawozów w produkcji paszowej.

Głównym celem badań jest opracowanie odpowiedniej mieszanki nawozowej na bazie popiołu z biomasy, która będzie efektywna pod względem wartości nawozowych oraz bezpieczna dla środowiska i zdrowia. Badania mają na celu znalezienie odpowiedniej proporcji składników, aby uzyskać wartościowy nawóz wieloskładnikowy do stosowania w uprawach roślin paszowych.

Do celów ogólnych rozprawy doktorskiej należą:

- Wskazanie zależności pomiędzy ilością popiołu w nawozie wieloskładnikowym, rodzajem źródła wapnia w nawozie, zawartością wapnia i potasu w nawozie oraz dawką nawozu a plonowaniem i parametrami jakościowymi kukurydzy;
- Określenie najkorzystniejszego składu nawozu wieloskładnikowego na bazie popiołu ze spalania biomasy w aspekcie plonowania kukurydzy z przeznaczeniem na cele paszowe i jej parametrów jakościowych.

Celem szczegółowym jest określenie wpływu różnych proporcji i źródeł składników nawozowych oraz dawki nawozu na:

- Plonowanie i parametry biometryczne kukurydzy;
- Zawartość makroelementów w kukurydzy, w tym azotu ogółem, fosforu, potasu, magnezu, wapnia, siarki siarczanowej i sodu;
- Zawartość mikroelementów i innych metali ciężkich w kukurydzy, w tym cynku, manganu, miedzi, żelaza, kadmu, arsenu, rtęci i ołowiu;
- Zawartość suchej masy i włókna w kiszonce z kukurydzy;
- Zawartość makroelementów w kiszonce z kukurydzy, w tym azotu ogółem, fosforu, potasu, magnezu i wapnia;
- Zawartość makroelementów w glebie po zbiorze kukurydzy, w tym azotu ogólnego, azotu mineralnego, fosforu, potasu, wapnia, magnezu i siarki siarczanowej;

- Zawartość mikroelementów i innych metali ciężkich w glebie po zbiorze kukurydzy, w tym cynku, manganu, miedzi, żelaza, kadmu, arsenu, rtęci i ołowiu.

Postawione cele badawcze mogą mieć znaczenie:

- Poznawcze – umożliwią poszerzenie wiedzy na temat wpływu stosowania nawozów na bazie biomasy oraz wapnia i potasu, lub wapnia, siarki i potasu na zawartość związków determinujących wielkość i jakość plonu kukurydzy w uprawie na zieloną masę;
- Aplikacyjne – gdyż będzie można określić rodzaj nawozów zawierających popioły z biomasy z dodatkiem potasu oraz wapnia i siarki oraz ich dawkę jako optymalną dla wielkości i jakości plonu kukurydzy, a także jakości kiszonki.

5. Materiały i metody

5.1. Charakterystyka materiału badawczego

Popiół będący przedmiotem badań jest jednym z produktów ubocznych powstających podczas spalania biomasy w procesie pozyskiwania energii elektrycznej. Materiał odpadowy wykorzystany w eksperymencie pochodził z Elektrociepłowni Białystok S.A. i został zaliczony do odpadów mineralnych o kodzie 10 01 03 (popiół lotny ze spalania biomasy – torf i drewno niepoddanego obróbce chemicznej). Popioły te charakteryzują się niższą zawartością krzemu oraz większą ilością składników pokarmowych, w porównaniu do popiołów ze spalania węgla.

Ważną zaletą fitopopiołów jest znaczna zawartość wapnia i obecność magnezu, co nadaje im właściwości odkwaszające. Wszystkie zbadane próbki popiołu miały odczyn zasadowy o pH w przedziale 11,0-12,8 oraz poniżej 1% zawartości azotu. Badane popioły wykazywały różnice w składzie pierwiastków odżywczych, tj. zawartości potasu (3 - 8% K_2O), wapnia (9 - 24% CaO), magnezu (1 - 3% MgO) czy fosforu (0,2 - 4% P_2O_5), a także metali ciężkich, np. kadmu (0,5 - 18,0 $mg\ Cd \cdot kg^{-1}$ suchej masy), ołowiu (2 - 235 $mg\ Pb \cdot kg^{-1}$ s.m.), niklu (2 - 61 $mg\ Ni \cdot kg^{-1}$ s.m.), chromu (3 - 88 $mg\ Cr \cdot kg^{-1}$ s.m.), rtęci (0,003 - 1,2 $mg\ Hg \cdot kg^{-1}$ s.m.) czy arsenu (2,8 - 7,41 $mg\ As \cdot kg^{-1}$ s.m.). Zróżnicowanie to wymusza kontrolę każdej partii popiołu ze spalania biomasy pod względem zawartości zarówno składników pokarmowych, jak i zanieczyszczeń.

Do mieszanek nawozowych zastosowano popiół ze spalania biomasy o pH 12,2 i zawartości azotu poniżej 0,01% N, fosforu 0,99% P_2O_5 , 3,6% K_2O , 16,9% CaO , 1,6% MgO oraz 7,37 mg arsenu (As), 1,38 mg kadmu (Cd), 8,37 mg ołowiu (Pb), 0,016 mg rtęci (Hg), 25,3 mg miedzi (Cu), 7,0 mg niklu (Ni) i 180 mg cynku (Zn) w przeliczeniu na kilogram suchej masy. Przepisy prawne określają maksymalne wartości graniczne w nawozach dla arsenu, kadmu, ołowiu i rtęci zgodnie z Rozporządzeniem z dnia 21 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów Ustawy o Nawozach i Nawożeniu (Dz.U. 2024 r. poz. 1261). Zgodnie z tym aktem prawnym dopuszczalne zawartości zanieczyszczeń w nawozach mineralnych nie powinny przekraczać: 50 mg arsenu (As), 50 mg kadmu (Cd), 140 mg ołowiu (Pb) i 2 mg rtęci (Hg) na kilogram masy nawozu.

5.2. Opracowanie mieszanek nawozowych

Opracowano osiem konfiguracji nawozów wieloskładnikowych zawierających popiół ze spalania biomasy z dodatkiem węgla wapnia - CaCO_3 (CaO 52,6 %) lub siarczanu wapnia - CaSO_4 (40% S, 34 % CaO) i chlorku potasu – KCl (60% K_2O) (tab.6).

Tabela 6. Składy surowcowe wytworzonych mieszanek nawozowych

Mieszanka nawozowa	Ilość popiołu	Źródło i ilość wapnia	Ilość KCl
1	40 % popiołu	40% CaCO_3	20% KCl
2	40 % popiołu	40% CaSO_4	20% KCl
3	40 % popiołu	50% CaCO_3	10% KCl
4	40 % popiołu	50% CaSO_4	10% KCl
5	30% popiołu	40% CaCO_3	30% KCl
6	30% popiołu	40% CaSO_4	30% KCl
7	30% popiołu	50% CaCO_3	20% KCl
8	30% popiołu	50% CaSO_4	20% KCl

Nawozy nr 1-4 w swoim składzie zawierały 40%, a nawozy nr 5-8 30% popiołu z biomasy. Mieszanki 1-4 zawierały 20% CaO , a nawozy 5-8 15% CaO , przy czym w nawozach 1, 3, 5 i 7 źródłem wapnia był węgiel wapnia. W nawozach o numerach 2, 4, 6 i 8 zastosowano z kolei siarczan wapnia, który wprowadził w mieszankach 2 i 4 po 25% siarki, w nawozie 6 – 16% i w nawozie nr 8 – 20% siarki. Wszystkie nawozy wzbogacono dodatkowo chlorkiem potasu do uzyskania zawartości 13% K_2O w mieszankach 1, 2, 7 i 8; 6% K_2O w nawozach 3 i 4 oraz 17% K_2O w nawozach 5 i 6.

Przygotowanie mieszanek nawozowych polegało na wymieszaniu komponentów każdego nawozu. Wszystkie surowce w formie pyłu w odpowiednich proporcjach zostały zmieszane w mieszalniku. Następnie, powstałe mieszanki zgranulowano uzyskując mieszanki nawozowe o frakcji 3-5 mm.

5.3. Charakterystyka doświadczenia polowego

Podstawą badań był trzyletni eksperyment polowy założony w dwóch lokalizacjach:

- Gospodarstwo Doświadczalne Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie zlokalizowane w Czesławicach (51°18'23"N 22°16'02"E).
- Prywatne gospodarstwo rolne w Krynicach k/Białegostoku (53°13'41"N 23°01'59"E).

Doświadczenie polowe rozpoczęto wiosną 2020 roku, a zakończono we wrześniu 2023 roku. Eksperyment przeprowadzono w układzie losowanych bloków z trzema powtórzeniami, co dało łącznie 81 poletek doświadczalnych (27 obiektów w 3 powtórzeniach). W doświadczeniu testowano 8 mieszanek nawozowych w porównaniu do kontroli. Powierzchnia każdego poletka wynosiła 25 m² i składała się z 8 rzędów, rozmieszczonych co 75 cm, zgodnie z rozstawem dysz siewnika.

Gleba, na której prowadzono eksperyment polowy według klasyfikacji gleb zgodnie z polską normą PN R 04033:1998 i kategoriami agronomicznymi sklasyfikowana jest do:

1. Gospodarstwo Doświadczalne Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie zlokalizowane w Czesławicach (Cz): skład granulometryczny: frakcja piasku – zakres 2,0 – 0,05 mm – 20,76 % (w tym: 2,0 – 1,0 mm – <0,01%; 1,0 – 0,01 mm – 1,31%; 0,10 – 0,05 mm 19,44%), frakcja pyłu – zakres 0,05 – 0,002 mm – 79,25% (w tym: 0,05 – 0,02 mm – 40,53%; 0,02 – 0,002 mm – 31,74%) i frakcja łu – zakres poniżej 0,002 mm – 6,98%.

Gleba charakteryzowała się wysoką zasobnością w fosfor (380 mg P₂O₅ · kg⁻¹ gleby), potas (321 mg K₂O · kg⁻¹ gleby), wapń (775 mg CaO · kg⁻¹ gleby) i magnez (111 mg MgO · kg⁻¹ gleby), a także średnią zawartością siarki (10,4 mg SO₄ · kg⁻¹ gleby) i zawartością azotu na poziomie 49,2 mg · ha⁻¹. Odczyn gleby był lekko kwaśny o pH – 6,3 w 1 mol KCl · dm⁻³.

Ze względu na wysokie zawartości składników pokarmowych w glebie w Czesławicach w doświadczeniach polowych podjęto próbę oceny, czy obniżenie nawożenia wpłynie na redukcję plonu i pogorszenie jego jakości. Testowano wpływ nawożenia w dwóch wariantach, optymalne nawożenie NPK kukurydzy w dawce 180 kg · ha⁻¹ azotu, 80 kg · ha⁻¹ fosforu i 180 kg · ha⁻¹ potasu oraz nawożenie NPK obniżone o 25% w dawce 135 kg · ha⁻¹ azotu, 60 kg · ha⁻¹ fosforu i 135 kg · ha⁻¹ potasu. Do nawożenia azotem zastosowano saletrę amonowa (34% N), do uzupełnienia fosforu zastosowano superfosfat wzbogacony (40% P₂O₅) i sól potasową (60% K₂O) jako źródło potasu.

2. Gospodarstwo Rolne w Krynicach/Białegostoku (K): skład granulometryczny: frakcja piasku – zakres 2,0 - 0,05 mm – 47,02 % (w tym: 2,0 - 1,0 mm – 0,02%; 1,0 - 0,01 mm – 36,83%; 0,10 - 0,05 mm – 10,17%), frakcja pyłu - zakres 0,05 - 0,002 mm – 45,1% (w tym: 0,05 - 0,02 mm – 11,9%; 0,02 - 0,002 mm – 33,2%) i frakcja łu – zakres poniżej 0,002 mm – 7,88%.

Gleba charakteryzowała się niską zasobnością fosforu (81 mg P₂O₅ · kg⁻¹ gleby), potasu (66 mg K₂O · kg⁻¹ gleby), wapnia (392 mg CaO · kg⁻¹ gleby) i siarki (5,1 mg SO₄ · kg⁻¹ gleby), wysoką zasobnością magnezu (98 mg MgO · kg⁻¹ gleby) i zawartością azotu na poziomie 32,6 mg · ha⁻¹. Odczyn był bardzo kwaśny o pH – 4,4 w 1 mol KCl · dm⁻³.

Ze względu na niskie zasobności składników pokarmowych w tej lokalizacji zrezygnowano z testowania plonowania i parametrów jakościowych kukurydzy w bloku o obniżonym o 25% nawożeniu NPK.

5.4. Warunki meteorologiczne w czasie doświadczenia polowego

Warunki meteorologiczne w trakcie eksperymentu polowego były zróżnicowane, zarówno w poszczególnych latach badań, jak i ze względu na lokalizację (tabele 7 i 8).

Tabela 7. Warunki meteorologiczne w czasie trwania doświadczenia polowego – Czesławice

Średnie miesięczne temperatury powietrza (°C)							
Lata	Miesiąc						Średnia
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
2021	6,4	12,6	19,7	22,3	17,3	12,8	15,2
2022	5,9	12,8	19,4	19,4	20,5	10,8	13,1
2023	8,2	12,9	17,4	20,0	21,0	17,6	16,1
Średnia	6,8	12,8	18,8	20,6	19,6	13,7	
Średnia 2011–2020	9,5	14,4	18,5	20,1	19,7	14,7	
Średnie miesięczne sumy opadów (mm)							
Lata	Miesiąc						Średnia
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
2021	49,1	55,7	43,2	43,0	231,7	62,1	80,7
2022	53,2	36,3	38,7	111,8	52,3	112,3	67,4
2023	57,9	66,0	60,0	84,7	46,4	28,5	57,3
Średnia	53,4	52,7	47,3	79,8	110,1	67,6	
Średnia 2011–2020	40,8	80,3	64,3	91,3	54,9	60,2	

Tabela 8. Warunki meteorologiczne w czasie trwania doświadczenia polowego – Krynice

Średnie miesięczne temperatury powietrza (°C)							
Lata	Miesiąc						Średnia
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
2021	6,1	11,7	19,2	21,5	16,1	11,7	14,4
2022	5,6	12,0	18,3	18,0	20,1	10,4	14,0
2023	8,3	12,3	17,2	18,7	20,1	16,8	15,6
Średnia	6,95	12,15	17,8	18,4	20,1	13,6	
Średnia 2011–2020	8,2	13,4	17,2	18,3	17,8	13,3	
Średnie miesięczne sumy opadów (mm)							
Lata	Miesiąc						Średnia
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
2021	24,6	80,7	49,3	118	143	81,8	82,9
2022	56,7	56,5	61,5	130	6,7	94,3	67,5
2023	32,2	37,8	65,6	45,1	42,9	18,5	40,4
Średnia	37,8	58,3	58,8	97,6	64,1	64,9	
Średnia 2011–2020	32,6	81,0	71,4	103,0	54,5	50,4	

Najwyższą średnią temperaturę w trakcie sezonu wegetacyjnego zanotowano w trzecim roku badań polowych zarówno w Czesławicach (16,1°C), jak i w Krynicach (15,6°C), a najniższą w obu lokalizacjach w drugim roku (Cz - 13,1°C; K - 14,0°C). Z kolei największe średnie opady miały miejsce w pierwszym roku badań (Cz - 80,7 mm; K - 82,9 mm), podczas gdy najmniejsze wystąpiły w trzecim roku (Cz - 57,3 mm i K - 40,4 mm). Trzeci rok okazał się najkorzystniejszy dla wschodów roślin, co wynikało z wyższych temperatur i większych opadów w kwietniu i maju.

Aby lepiej opisać warunki meteorologiczne panujące w trakcie eksperymentu, obliczono wskaźnik hydrotermalny Sielianiowa (k).

Gdzie:

- P — miesięczna suma opadów atmosferycznych (mm);
- Σt — miesięczna suma temperatur powietrza > 0 °C.

Współczynnik Sielianiowa określa zaopatrzenie roślin w wodę w okresie wegetacji i dzieli się na klasy przedstawione w tabeli 9.

Tabela 9. Podział współczynnika Sielianinowa na klasy

Zakres współczynnika k	Opis
$k \leq 0,4$	Warunki ekstremalnie suche
$0,4 < k \leq 0,7$	Bardzo suche warunki
$0,7 < k \leq 1,0$	Warunki suche
$1,0 < k \leq 1,3$	Warunki dość suche
$1,3 < k \leq 1,6$	Optymalne warunki
$1,6 < k \leq 2,0$	Warunki dość wilgotne
$2,0 < k \leq 2,5$	Wilgotne warunki
$2,5 < k \leq 3,0$	Bardzo wilgotne warunki
$k > 3,0$	Warunki ekstremalnie wilgotne

Tabela 10. Wartości współczynnika Sielianinowa podczas doświadczenia polowego

Czesławice						
Rok	Miesiąc					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
2021	2,56	1,43	0,73	0,62	4,32	1,62
2022	3,01	0,91	0,66	1,86	0,82	3,47
2023	2,35	1,65	1,15	1,37	0,71	0,54
Krynice						
Rok	Miesiąc					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
2021	1,35	2,22	0,86	1,77	2,86	2,34
2022	3,35	1,54	1,12	2,32	0,11	3,02
2023	1,3	0,99	1,27	0,78	0,69	0,37

Obliczenia wartości współczynnika hydrotermicznego jednoznacznie wskazują, że warunki pogodowe z Czesławicach i Krynicach były zróżnicowane w poszczególnych latach badań. Stosując współczynnik Sielianinowa (tab. 10) można stwierdzić, że w Czesławicach w każdym roku badań polowych siew kukurydzy poprzedzał miesiąc o korzystnych warunkach wilgotnościowych ($k = 2,35-3,01$). W Krynicach natomiast w pierwszym i drugim roku doświadczeń polowych warunki były korzystne ($k = 1,35-3,35$), a w trzecim roku warunki były dość suche ($k = 1,3$). Najlepsze warunki do siewu występowały w maju w pierwszym roku badań (Krynice $k = 1,43$; Czesławice $k = 2,22$), a najgorsze w czerwcu w drugim roku badań w Czesławicach ($k = 0,66$) oraz w trzecim roku w Krynicach ($k = 0,99$). Cały cykl wegetacyjny kukurydzy w obu lokalizacjach przebiegał w zróżnicowanych warunkach. Zbiór kukurydzy w każdym roku badań przypadał na wrzesień. Najbardziej optymalne warunki odnotowano w pierwszym roku

badań (Czesławice $k = 1,62$; Krynice $k = 2,34$), w drugim roku warunki były skrajnie wilgotne (Czesławice $k = 3,47$; Krynice $k = 3,02$), a w trzecim roku były bardzo suche (Czesławice $k = 0,54$; Krynice $k = 0,37$).

5.5. Opis roślin paszowych wybranych do badań

Rośliną testową w doświadczeniu była średnio wczesna odmiana kukurydzy P8240 firmy Pioneer - mieszańiec typu M3, z przeznaczeniem na kiszonkę o FAO: K240-250. Typ ziarna – dent. Odmianę cechuje kiszonka o wysokiej zawartości skrobi dobrze degradowalnej w żwaczu. Odmiana charakteryzuje się elastycznością w terminie zbioru – w przypadku opóźnienia, ziarno dobrze napęla się skrobią i dojrzewa prawidłowo. Wykazuje szybki wzrost na początkowych etapach oraz dobrą tolerancję na niskie temperatury. Plonuje stabilnie, niezależnie od warunków środowiskowych.

Siew przeprowadzono w optymalnych terminach dla kukurydzy wybranej odmiany:

- W Czesławicach: 12 maja 2021 r., 15 czerwca 2022 r. i 8 maja 2023 r. Termin siewu kukurydzy w drugim roku badań był późniejszy niż w pozostałych latach ze względu na szkody wyrządzone przez dziki i konieczność powtórzenia siewu.
- W Krynicach : 14 maja 2021 r., 11 maja 2022 r. i 4 maja 2023 r.

Przed siewem wprowadzono do gleby testowane nawozy. Azot zastosowano w ilości stanowiącej 70% całkowitej dawki planowanego nawożenia. Pozostałą część azotu zastosowano pogłównie w fazie 5–6 liści.

Gęstość siewu kukurydzy wynosiła $80\ 000$ nasion \cdot ha⁻¹. W trakcie wzrostu rośliny zabezpieczano przed chwastami, stosując oprysk insektycydem Lumax 537,5SE.

Zbiory kukurydzy wykonano w fazie dojrzałości mleczno-woskowej, gdy zawartość suchej masy wynosiła 30–35%:

- W Czesławicach: 10 września 2021 r., 01 października 2022 r. i 22 września 2023 r. Zbiór kukurydzy w drugim roku badań opóźniono ze względu na późniejszy termin siewu.
- W Krynicach : 17 września 2021 r., 17 września 2022 r. i 12 września 2023 r.

Na etapie zbioru określono parametry plonu na podstawie zbioru 2 m² pobranych z dwóch środkowych rzędów każdego poletka. Kukurydzę zbierano ręcznie ścinając rośliny 10 cm nad powierzchnią gleby i określono plon masy zielonej z przeznaczeniem na kiszonkę. Z każdego poletka doświadczalnego losowo wybierano 8 roślin, mierząc ich wysokość oraz liczbę kolb i rzędów ziaren w kolbie. Następnie przy pomocy sieczkarni paszowej rośliny pocięto na kawałki i po wymieszaniu materiału pobierano próbki: 500 g do

badan materiału roślinnego oraz 1 kg do przygotowania kiszonki. Próbki przeznaczone do badań umieszczano w piecu z cyrkulacją powietrza o temperaturze 70°C, aż biomasa osiągnęła stałą masę, co pozwalało na oszacowanie zawartości suchej masy. Wsuszone próbki przygotowano do dalszych analiz. Kiszonki wykonano w torebkach zamykanych próżniowo przy pomocy zgrzewarki do żywności, wzbogacając je preparatem wspomagającym zakiszenie o nazwie Biosilac żółty.

5.6. Zakres badań nawozów, gleby, rośliny i kiszzonek

Metody analiz nawozów, gleby, rośliny i kiszzonek zamieszczono w tabeli 11.

Tabela 11. Metody analityczne

Rodzaj badanego materiału	Oznaczone parametry gleby	Metoda
Nawozy, gleba, roślina, kiszonki	odczyn/pH	metoda potencjometryczna
	azot (N)	metoda Kjeldahla
	fosfor (P ₂ O ₅)	metoda spektrofotometryczna
	potas (K ₂ O)	metoda płomieniowej emisyjnej spektrometrii atomowej (FAES)
	wWapń (CaO)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)
	magnez (MgO)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)
Nawozy, gleba, roślina	kadm (Cd)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)
	niedź (Cu)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)
	nikiel (Ni)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)
	ołów (Pb)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)
	cynk (Zn)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)
	chrom (Cr)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)
	rtęć (Hg)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)
	arsen (As)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej po mineralizacji w wodzie królewskiej
	siarka siarczanowa (S-SO ₄)	metoda nefelometryczna
Gleba, roślina	sód (Na)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)

Rodzaj badanego materiału	Oznaczone parametry gleby	Metoda
	żelazo (Fe)	metoda płomieniowej absorbcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS)
Gleby	skład granulometryczny	metoda dyfrakcji laserowej
	węgiel organiczny (C _{org})	metoda Tiurina
	azot azotanowy i amonowy w warstwie 0-60 cm	metoda spektrofotometryczna
Kiszonki	Włókno	metoda wagowa

5.7. Metody statystyczne

Analizę statystyczną wyników przygotowano przy użyciu programu Statistica 13. W tym celu zastosowano analizę wariancji (ANOVA) dla układów czynnikowych, a istotność różnic określono przy użyciu testu Tukeya (HSD) przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ dla każdego roku badań oddzielnie. Założenia dla testu ANOVA sprawdzono przy użyciu testu Levene'a (jednorodność wariancji) i testu Shapiro–Wilka (normalność rozkładu).

Dla każdego zmierzonego parametru w poszczególnych latach przedstawiono wpływ poszczególnych czynników oraz wpływ ich efektów interakcji. Miarę tego wpływu określono poprzez obliczenie współczynnika: cząstkowego eta kwadrat (η^2_p) — określającego, który czynnik w większym stopniu wyjaśnia zmienność mierzonego parametru.

Porównano działanie nawozów w zależności od zawartości popiołu (A) (czynnik nadrzędny, 2 poziomy: 30% i 40%). Czynniki drugorzędnymi w tej analizie było źródło wapnia (B) (2 poziomy: CaCO₃ i CaSO₄) i zawartość wapnia i potasu w nawozie (C) (2 poziomy: 40/30 i 50/20 dla 30% zawartości popiołu oraz 40/20 i 50/10 dla 40% zawartości popiołu).

Analizę statystyczną przeprowadzono osobno dla każdej lokalizacji doświadczenia polowego. W doświadczeniu polowym przeprowadzonym w Czesławicach dodatkowym czynnikiem była dawka nawozu (D) (2 poziomy: optymalna – 100% i obniżona – 75%). W Krynicach zastosowano nawożenie w optymalnej dawce. Uzyskane wyniki porównano z obiektem kontrolnym nawożonym nawozami komercyjnymi.

Za pomocą testu Tukeya wyznaczono grupy jednorodne dla średnich wartości badanych parametrów (oznaczone małymi literami) oraz grupy jednorodne dla średnich grupowych (oznaczone dużymi literami).

6. Wyniki badań

Wyniki badań kukurydzy w lokalizacjach Czesławice i Krynice w latach 2021-2023 wskazują, jak czynniki A (zawartość popiołu w nawozie), B (źródło wapnia – CaCO_3 lub CaSO_4) oraz C (zawartość wapnia i potasu w nawozie) wpływają na parametry plonu. W Czesławicach dodatkowo analizowano wpływ czynnika D (dawka nawożenia: optymalna i obniżona o 25%).

6.1. Plonowanie i parametry biometryczne kukurydzy

W klasycznym ujęciu plon rośliny testowej definiuje się jako część rośliny uprawnej, którą można przeznaczyć jako paszę dla zwierząt. Plonem głównym w uprawie kukurydzy na kiszonkę są całe rośliny. W doświadczeniach polowych zbiory kukurydzy na kiszonkę przeprowadzono w potencjalnie optymalnym terminie.

6.1.1. Plon suchej masy kukurydzy

W doświadczeniu polowym przeprowadzonym w Czesławicach plony suchej masy kukurydzy nie wykazywały istotnych różnic i kształtowały się w przedziale od 29,21 do 43,56 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (tab. 12 i 13). Najwyższy plon kukurydzy odnotowano w pierwszym roku przy zastosowaniu 40% popiołu i CaSO_4 jako źródło wapnia, a najniższy w drugim roku przy obniżonym nawożeniu i zastosowaniu CaCO_3 . W Krynicach plony suchej masy kukurydzy kształtowały się od 29,18 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ do 43,87 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Istotne różnice odnotowano w drugim roku eksperymentu.

Wyższa zawartość popiołu w nawozie przeważnie powodowała zwiększenie plonu kukurydzy. Różnice w plonowaniu kukurydzy w poszczególnych latach, zarówno w Czesławicach, jak i Krynicach wynosiły do 3%. Tendencje odwrotne odnotowano w drugim roku badań i różnice te wynosiły 3% w Czesławicach i 9% w Krynicach. W większości lat badań wyższe plony uzyskano przy 40% udziale popiołu oraz zastosowaniu siarczanu wapnia. Nie stwierdzono różnic statystycznych w plonie kukurydzy po zastosowaniu poziomu nawożenia o zróżnicowanym stosunku wapnia i potasu użytego, jakkolwiek dysproporcje w plonie kukurydzy były znaczące.

W Czesławicach zaobserwowano, że zastosowanie zarówno CaCO_3 , jak i CaSO_4 prowadziło do uzyskania zbliżonych plonów suchej masy kukurydzy. Średnie plony z lat 2021-2023 wynosiły dla CaCO_3 przy 30% udziale popiołu 35,91 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ i przy 40% popiołu 34,83 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ i dla CaSO_4 odpowiednio 34,99 i 36,60 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Podobnie w Krynicach,

zastosowanie różnych źródeł wapnia nie wykazywało znaczących różnic, choć przeważnie wyższe plony kukurydzy odnotowano przy zastosowaniu CaSO_4 .

Proporcje wapnia do potasu w nawozach (C) miały zróżnicowany wpływ na średni plon suchej masy kukurydzy w zależności od lokalizacji. W Czesławicach zmienność wyników związana z tym czynnikiem była niska, a średnie plony kukurydzy były zbliżone niezależnie od proporcji. W Krynicach proporcje wapnia do potasu okazały się istotniejsze, szczególnie w latach 2021 i 2022, gdzie wpływ proporcji (C) na plony kukurydzy miał istotność statystyczną (udział obserwowanej zmienności) na poziomie 32,72% w 2021 roku i 35,32% w 2022 roku.

W Czesławicach badano również wpływ dawki nawożenia (optymalna i obniżona o 25%) na plon suchej masy kukurydzy. W większości przypadków różnice między dawką optymalną a obniżoną były niewielkie. Średnia dla dawki optymalnej z trzech lat wyniosła przy 30% popiołu 35,40, a przy 40% popiołu 36,10 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$, a dla dawki obniżonej o 25% odpowiednio – 35,50 i 35,34 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$. W 2021 roku różnice między dawkami były nieco bardziej widoczne (11,52% udziału zmienności związanej z dawką), ale ogólnie zmniejszenie dawki nawożenia nie prowadziło do istotnych zmian w plonie kukurydzy.

Analizując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że plony suchej masy kukurydzy były kształtowane przez różne czynniki nawożenia, jednak ich wpływ był ograniczony. W obu lokalizacjach zwiększenie zawartości popiołu w nawozie nie prowadziło do znaczących różnic w plonach kukurydzy, chociaż w Krynicach w drugim roku badań wyższe plony uzyskiwano przy nawożeniu nawozem z 30% popiołu. Zastosowanie różnych źródeł wapnia, zarówno CaCO_3 , jak i CaSO_4 , przynosiło podobne efekty, co sugeruje, że wybór źródła wapnia ma ograniczony wpływ na plon kukurydzy. Proporcje wapnia do potasu miały większe znaczenie w Krynicach, co może wynikać z lokalnych (i gorszych) warunków glebowych i lepszego dostosowania nawożenia do potrzeb roślin. W Czesławicach dawka nawożenia miała niewielki wpływ na wysokość plonów kukurydzy, co sugeruje, że nawet przy zmniejszonej dawce nawożenia uzyskiwano zadowalające wyniki plonowania.

Wyniki badań sugerują, że chociaż nawożenie ma wpływ na plony kukurydzy, inne czynniki środowiskowe mogą również odgrywać kluczową rolę, zwłaszcza w latach o mniej sprzyjających warunkach uprawy, jak w 2023 roku.

6.1.2. Wysokość kukurydzy

W Czesławicach wysokość roślin wahała w 2021 roku się od 292,96 cm do 318,04 cm w zależności od kombinacji nawożenia (tab. 14 i 15). Wyższe wartości wysokości zaobserwowano przy stosowaniu nawozów z 30% popiołu oraz źródłem wapnia CaSO_4 , z dawką optymalną. Zmienność w tym roku zaobserwowano dla interakcji między źródłem wapnia, proporcjami wapnia i potasu oraz dawką nawożenia. Średnia wysokość roślin w 2022 roku była niższa w porównaniu do 2021 roku, wynosząc od 285,13 cm do 311,79 cm. Różnice pomiędzy dawką optymalną a obniżoną o 25% były mniejsze niż w poprzednim roku. Najwyższe wartości osiągnięto przy dawce optymalnej i 30% popiołu (średnia 300,43 cm). Wpływ na zmienność wyników miały źródło wapnia i dawka, a także interakcje między źródłem wapnia i proporcjami wapnia i potasu oraz dawką nawożenia. Wysokość roślin w 2023 roku była nieco niższa niż w latach 2021 i 2022. Wartości były bardziej wyrównane, a średnia dla dawki optymalnej wynosiła 292,14 cm przy 30% i 286,25 cm przy 40% popiołu. Wpływ na istotne statystycznie różnice miały źródło wapnia, proporcje wapnia do potasu i dawka nawozu, a także interakcje między źródłem wapnia oraz stosunkiem wapnia i potasu.

Wysokość roślin w Krynicach w 2021 była porównywalna z tą z Czesławic. Najwyższe wartości odnotowano przy stosowaniu nawozów z 40% popiołu przy optymalnej dawce (średnia 307,63 cm). Zmienność w wysokości roślin była związana z proporcją wapnia do potasu. W 2022 i 2023 wysokość roślin była niższa niż w 2021 roku. Niewielki wpływ na uzyskane wyniki miały proporcje wapnia do potasu. Średnie wysokości były bardziej zbliżone do siebie, co może sugerować mniejszy wpływ zmian nawożenia na wysokość roślin w tym roku. W średnich z trzech lat nie odnotowano istotnych różnic między poszczególnymi wariantami nawożenia, co sugeruje stabilność wyników niezależnie od stosowanych nawozów.

6.1.3. Ilość kolb kukurydzy

W Czesławicach średnia liczba kolb kukurydzy w latach 2021-2023 pozostawała stosunkowo stabilna, niezależnie od zastosowanej zawartości popiołu, źródła wapnia czy proporcji wapnia do potasu (tab. 16 i 17). W 2021 roku średnie wartości wahały się od 1,04 do 1,29 kolb na roślinę, co wskazuje na niewielkie różnice między poszczególnymi wariantami nawożenia. W 2022 roku zaobserwowano nieco wyższe wartości, sięgające nawet 1,38 kolb na roślinę, zwłaszcza przy nawożeniu z 40% popiołu i niższą proporcją

wapnia do potasu. W 2023 roku wartości ponownie były wyrównane, z zakresem od 1,08 do 1,33 kolb na roślinę. W analizie statystycznej dla Czesławic nie odnotowano istotnych różnic między analizowanymi czynnikami ani interakcjami (wszystkie oznaczone jako n.i.), co sugeruje, że różne kombinacje nawożenia miały stosunkowo niewielki wpływ na liczbę kolb.

W Krynicach wyniki były podobne do tych uzyskanych w Czesławicach, jednak zaobserwowano większe wahania w liczbie kolb kukurydzy między latami i wariantami nawożenia. W 2021 roku średnia liczba kolb wynosiła przy 30% popiołu 1,15, przy 40 % popiołu była wyższa i wynosiła 1,24. W 2022 roku wartości te były nieco wyższe, sięgając do 1,46 kolb na roślinę, zwłaszcza przy stosowaniu nawozów z 40% popiołu. W 2023 roku wartości pozostawały na podobnym poziomie, wynosząc od 1,08 do 1,38 kolb na roślinę.

Podobnie jak w Czesławicach, analiza statystyczna w Krynicach nie wykazała istotnych różnic między analizowanymi czynnikami, co sugeruje, że liczba kolb kukurydzy była stabilna niezależnie od rodzaju nawożenia i proporcji składników.

6.1.4. Stosunek masy zielonej do masy kolb kukurydzy

W obu lokalizacjach wyniki dotyczące stosunku masy zielonej do masy kolb były zbliżone. W Czesławicach wartości stosunku masy zielonej do masy kolb były zbliżone we wszystkich analizowanych latach (tab. 18 i 19). Średnie wartości dla wariantu z 30% popiołu wynosiły od 42,11% (2023) do 44,37% (2021) i przy 40% udziału popiołu wynosił 43,49% (2023) do 44,66% (2021). W 2022 roku statystycznie istotnym czynnikiem była dawka nawozu i relacja między źródłem wapnia a proporcją wapnia i potasu. Najwyższą średnią wartość odnotowano przy 40% popiołu i optymalnej dawce, a najniższą przy 30% udziale popiołu i obniżonym o 25% nawożeniu.

W Krynicach wartości stosunku masy zielonej do masy kolb wynosiły od 42,64% do 46,13%. We wszystkich latach zaobserwowano w kontroli niższe wartości średnich niż w przypadku zastosowanych mieszanek zawierających popiół.

Brak istotnych różnic między analizowanymi wariantami w większości lat sugeruje, że stosunek masy zielonej do masy kolb w kukurydzy jest mniej podatny na zmiany związane z nawożeniem i warunkami meteorologicznymi.

6.1.5. Ilość rzędów ziarniaków w kukurydzy

W Czesławicach liczba rzędów ziarniaków w kolbach kukurydzy wahała się od 15,42 (2021) do 16,92 (2022), w zależności od kombinacji nawożenia (tab. 20 i 21). Najwyższe

wartości odnotowano przy stosowaniu nawozów z 30% popiołu i wyższą proporcją wapnia do potasu (50/20), zwłaszcza w obiektach z CaCO_3 . Istotnym statystycznie czynnikiem była dawka nawożenia w pierwszym roku badań. W 2022 roku oraz dla średnich z lat istotny wpływ miała interakcja między proporcją wapnia i potasu a dawką nawozu.

W Krynicach liczba rzędów ziarniaków w kolbach kukurydzy wahała się od 13,92 do 15,75, w zależności od zastosowanego nawożenia. Najwyższe wartości odnotowano przy nawożeniu z 30% popiołu i CaSO_4 i przy 40% popiołu oraz CaCO_3 w 2022 roku. W 2021 i 2022 roku oraz średniej z lat istotny wpływ na wyniki miało źródło wapnia, proporcja zawartości wapnia i potasu, a w pierwszym roku również interakcja między źródłem wapnia i stosunkiem wapnia do potasu. W 2023 roku badane czynniki nie miały znaczącego wpływu na wyniki.

Porównując wyniki z obu lokalizacji, zauważono, że zawartość popiołu w nawozie nie wpływała istotnie na liczbę rzędów ziarniaków kukurydzy w obu lokalizacjach. Wpływ źródła wapnia był bardziej widoczny w Krynicach, co może wynikać z odmiennych warunków glebowych. Stosunek wapnia do potasu miał większe znaczenie w Krynicach, szczególnie w 2022 roku, co sugeruje, że w tej lokalizacji odpowiednie proporcje mogły optymalizować wzrost kukurydzy. W Czesławicach z kolei wpływ dawki nawożenia był niewielki, co może wskazywać, że nawet przy zmniejszonej dawce nawożenia uzyskiwano zadowalające wyniki w zakresie liczby rzędów ziarniaków.

6.2. Zawartość makroelementów w kukurydzy

W literaturze można znaleźć liczne dane dotyczące zmienności zawartości składników mineralnych, które zależą od typu gleby, jej zasobności w minerały oraz warunków pogodowych podczas prowadzenia badań. Ponadto na gromadzenie składników pokarmowych w roślinach wpływa odpowiedni wybór odmiany kukurydzy oraz zabiegi agrotechniczne.

6.2.1. Zawartość azotu ogółem w kukurydzy

Zawartość azotu ogółem w kukurydzy wahała się w przedziale od 10,64 do 18,15 g $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w Czesławicach oraz w granicach od 8,69 do 15,12 g $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w Krynicach (tab. 22 i 23). Wszystkie badane czynniki wpływały na zróżnicowanie zawartości azotu ogółem w kukurydzy.

Zwiększenie zawartości popiołu w nawozie przyczyniło się do ograniczenia zawartości azotu ogółem w kukurydzy w Czesławicach zarówno średniej z 3 lat, jak i w 2021 i 2022 roku. W roku 2023 odnotowano zależność odwrotną. Należy jednak nadmienić, że różnice w zawartości azotu ogółem w kukurydzy były niewielkie (do 2%) i tylko w drugim roku badań wynosiły 5%. W Krynicach po aplikacji nawozu zawierającego 40% popiołu w swojej masie odnotowano zwiększenie zawartości azotu ogółem w kukurydzy w 2021, 2023 roku i średniej z 3 lat, odpowiednio o 5, 3 i 2%.

W Czesławicach w większości lat badań, zarówno w serii z 30%, jak i z 40% udziałem popiołu w nawozie, zawartość azotu ogółem w kukurydzy była wyższa w nawozach z dodatkiem CaSO_4 niż w nawozach z CaCO_3 . W przypadku serii z 30% zawartością popiołu w nawozie różnice te dla średniej z lat wynosiły tylko 3%, a w obiektach z 40% udziałem popiołu 6%. Były one największe w pierwszym roku badań, gdzie wynosiły odpowiednio 7 i 13%. W Krynicach źródło wapnia w nawozie działało bardziej jednoznacznie na zawartość azotu ogółem w kukurydzy w serii z niższą zawartością popiołu (30%). W tym przypadku średnia z lat zawartość azotu ogółem w kukurydzy w obiektach z aplikacją nawozów z dodatkiem CaSO_4 była niższa o 5% (w tym w roku 2022 o 10%, a w roku 2023 tylko o 3%), w porównaniu do nawozów z CaCO_3 . W serii z wyższą zawartością popiołu (40%) oddziaływanie źródła wapnia w nawozach było uzależnione od roku badań, gdyż trendy zmian w roku 2022 były odwrotne niż w latach 2021 i 2023. W konsekwencji średnia zawartość azotu ogółem w kukurydzy uprawianej na poletkach z zaaplikowanym nawozem z wapniem w postaci CaSO_4 była nieco niższa niż w obiektach z CaCO_3 . Różnice te wynosiły jednak zaledwie 2%.

Zwiększenie zawartości wapnia w nawozie w formie CaCO_3 i CaSO_4 miało niejednoznaczny wpływ na zawartość azotu ogółem w kukurydzy, jakkolwiek dość często obserwowano antagonistyczne oddziaływania między tymi pierwiastkami.

Zmniejszenie dawki nawozu o 25% spowodowało zmniejszenie zawartości azotu ogółem w roślinach rosnących na poletkach w Czesławicach, średnio o 10% w serii z CaCO_3 i o 8% w obiektach z CaSO_4 . W poszczególnych latach badań różnice między dawkami nawozów wynosiły 11% (2021), 7% (2022) i 12% (2023) w serii z CaCO_3 oraz 9% (2021), 2% (2022) i 13% (2023), w porównaniu do zastosowanej w nawożeniu dawki optymalnej. W przypadku obiektu kontrolnego odnotowano zależności odwrotne.

6.2.2. Zawartość fosforu w kukurydzy

Zawartość fosforu w kukurydzy wahała się w przedziale od 1,10 do 4,53 g P · kg⁻¹ s.m. w Czesławicach oraz od 1,40 do 3,38 g P · kg⁻¹ s.m. w Krynicach (tab. 24 i 25).

Wzrost zawartości popiołu w nawozie spowodował zmniejszenie zawartości fosforu w kukurydzy uprawianej w Czesławicach, zarówno w średniej z trzech lat, jak i w latach 2021 i 2022. Różnice w zawartości fosforu w kukurydzy były niewielkie (do 3%) i tylko w drugim roku badań wynosiły 5%. W Krynicach po aplikacji nawozu zawierającego 40% popiołu odnotowano zmniejszenie zawartości fosforu w kukurydzy w każdym roku i średniej z 3 lat. W roku 2021 wynosiło ono 5%, w 2022 3%. W trzecim roku badań nie odnotowano takiej zależności.

W Czesławicach zarówno w serii z 30%, jak i z 40% udziałem popiołu w nawozie, zawartość fosforu w kukurydzy była wyższa w nawozach z dodatkiem CaSO₄ niż w nawozach z CaCO₃. W Krynicach w pierwszym i drugim roku eksperymentu przy udziale 30% popiołu odnotowano wyższą zawartość fosforu przy udziale CaCO₃. W przypadku średnich z lat zawartość fosforu w kukurydzy w obiektach z aplikacją nawozów z 30% udziałem fosforu z dodatkiem CaSO₄ była niższa o 5% (w tym w roku 2021 o 5%, a w roku 2022 o 13%), w porównaniu do nawozów z CaCO₃. W serii z 40% udziałem fosforu stwierdzono odwrotne zależności, zwłaszcza w ostatnim roku badań, w którym stwierdzono 44% wzrost zawartości tego składnika w kukurydzy. Zwiększenie zawartości wapnia w nawozie w postaci CaCO₃ i CaSO₄ miało zróżnicowany wpływ na zawartość fosforu w kukurydzy.

Zmniejszenie dawki nawozu o 25% przy 30% udziale popiołu w nawozach spowodowało zmniejszenie zawartości fosforu w roślinach na poletkach w Czesławicach o 16% w 2021 roku, 6% w 2022 i 7% w 2023 roku. W serii z 40% udziałem popiołu wyższe zawartości fosforu wystąpiły przy obniżonym nawożeniu. W poszczególnych latach badań różnice między dawkami nawozów wynosiły 14% (2021), 7% (2022) i 10% (2023), w porównaniu do zastosowanej w nawożeniu dawki optymalnej.

6.2.3. Zawartość potasu w kukurydzy

Zawartość potasu w kukurydzy w obu lokalizacjach była zróżnicowana i kształtowała się w przedziale od 10,95 do 41,13 g K · kg⁻¹ s.m. w Czesławicach (tab. 26) oraz od 16,48 do 54,73 g K · kg⁻¹ s.m. w Krynicach (Tabela 27). Najwyższe wartości odnotowano w 2022 roku w obu miejscowościach, a najniższe w ostatnim roku

doświadczania w Czesławicach i pierwszym roku w Krynicach. W Czesławicach w 2021 roku średnia zawartość potasu w kukurydzy wynosiła $31,42 \text{ g K} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ dla 30% popiołu i była o 11% wyższa niż przy 40% udziale popiołu. W 2022 i 2023 roku oraz dla średniej z lat zawartości potasu w kukurydzy były wyższe przy 40% popiołu. W pierwszym i drugim roku w kontroli średnie zawartości potasu w kukurydzy były wyższe niż w testowanych mieszankach. W Krynicach zaobserwowano różnice statystyczne w drugim i trzecim roku badań, gdzie średnie wartości wykazały istotne różnice między poziomami popiołu. Średnie z lat 2021-2023 w obu lokalizacjach wykazały nieistotne zmiany w zawartości potasu w kukurydzy niezależnie od udziału popiołu w nawozach.

Źródło wapnia w nawozach, czyli wybór między CaCO_3 a CaSO_4 , miało istotny wpływ na wyniki w pierwszym i trzecim roku badań w Czesławicach i we wszystkich latach w Krynicach.

Proporcje wapnia do potasu w nawozach były czynnikiem wpływającym na zawartość potasu w kukurydzy w obu lokalizacjach. W Krynicach, wpływ tego czynnika był wyraźnie widoczny we wszystkich latach badań. W Czesławicach proporcje wapnia i potasu wpływały istotnie na wyniki w 2023 oraz 2021 roku w interakcji ze źródłem wapnia. W Czesławicach analizowano wpływ dawki nawożenia, różnice między tymi wariantami odnotowano w 2021 i 2022 roku. Zaobserwowano, że zawartość potasu w kukurydzy przy dawce optymalnej przeważanie była niższa, względem wyników przy dawce obniżonej o 25%, co wskazuje, że zmniejszenie dawki nawożenia nie miało negatywnego wpływu na zawartość potasu w kukurydzy. Podobne wyniki zaobserwowano w latach kolejnych, co sugeruje, że rośliny dobrze adaptowały się do mniejszej ilości nawozów.

6.2.4. Zawartość magnezu w kukurydzy

W Czesławicach zawartość magnezu w kukurydzy wahała się w zależności od kombinacji nawożenia, osiągając wartości od $1,34$ do $3,73 \text{ g Mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ (tab.28). Najwyższe wartości zaobserwowano przy zastosowaniu nawozów w obniżonej dawce zawierających 30% popiołu i CaSO_4 ($3,73 \text{ g Mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Różnice między poszczególnymi wariantami nawożenia nie były istotne statystycznie zarówno w 2021, jak i w 2022 roku. W 2023 roku wpływ na zmienność wyników miały interakcje między źródłem wapnia, proporcjami nawozowymi, a dawką. Zawartości magnezu w kukurydzy przy optymalnym nawożeniu były wyższe niż przy dawce obniżonej.

W Krynicach zawartości magnezu w kukurydzy we wszystkich latach były wyższe niż w Czesławicach, szczególnie przy stosowaniu CaSO_4 i zawartości 40% popiołu (tab.29). Wyniki zawartości magnezu w kukurydzy mieściły się w zakresie od 1,69 do 4,06 $\text{g Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. Znaczący wpływ na wyniki miało źródło wapnia oraz proporcje wapnia i potasu, a w 2022 roku oprócz źródła wapnia także interakcja między tymi czynnikami.

W obu miejscowościach zawartość magnezu w kukurydzy w 2022 roku była niższa w porównaniu do 2021 roku, w 2023 roku zawartości magnezu ponownie wzrosły, najczęściej przy nawożeniu zawierającym 40% popiołu i CaSO_4 , co sugeruje korzystny wpływ tej kombinacji na dostępność magnezu.

6.2.5. Zawartość wapnia w kukurydzy

Zawartość wapnia w kukurydzy w Czesławicach (tab.30) i Krynicach (tab.31) w 2021 i 2022 była na zbliżonym poziomie, w trzecim roku badań odnotowano znacznie niższe wartości. W obu lokalizacjach, zawartość popiołu w nawozie (30% i 40%) miała ograniczony wpływ na zawartość wapnia w kukurydzy. W Czesławicach średnie jego wartości dla nawozów z 30% popiołu w latach 2021-2023 wynosiły około 3,43 $\text{g Ca} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., a dla nawozów z 40% popiołu – 3,31 $\text{g Ca} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., co nie stanowiło istotnych różnic między wariantami. Podobnie w Krynicach, różnice między średnimi wynikami z lat dla obu poziomów popiołu były niewielkie. Różnice między tymi wariantami miały istotny wpływ w trzecim roku badań, gdzie wyższą zawartość wapnia w kukurydzy odnotowano przy 30% popiołu (2,14 $\text{g Ca} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.), a przy 40% popiołu zawartość była o 26% niższa.

Wpływ źródła wapnia i proporcje wapnia do potasu były bardziej zauważalne w Krynicach niż w Czesławicach. W 2023 roku w Krynicach odnotowano istotny wpływ tych czynników na zawartość wapnia w kukurydzy ($B - \Pi_p^2 = 27,60\%$ i $C - \Pi_p^2 = 41,97\%$). W Czesławicach istotność wpływu proporcji była widoczna głównie w połączeniu z dawką nawożenia ($B \times C$ i $B \times C \times D$), co wskazuje, że wpływ proporcji wapnia do potasu był zależny od kombinacji innych czynników.

Wyniki pokazały, że zmniejszenie dawki nawożenia nie miało istotnego wpływu na zawartość wapnia w kukurydzy. W 2021 roku średnie wartości przy dawce optymalnej wynosiły 4,22 $\text{g Ca} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., a przy obniżonej – 4,57 $\text{g Ca} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., co sugeruje, że kukurydza potrafiła dostosować się do niższych dawek nawożenia bez znaczącej utraty zawartości wapnia.

Porównując obie lokalizacje, można zauważyć, że Krynice wykazywały większą wrażliwość na zmienne takie jak źródło wapnia i proporcje wapnia do potasu. W Czesławicach wpływ tych czynników był mniej wyraźny, a znaczenie miała dawka nawożenia, szczególnie w interakcjach z innymi zmiennymi.

6.2.6. Zawartość siarki w kukurydzy

W Czesławicach różnice w zawartości siarki w kukurydzy (tab. 32) przy zastosowaniu nawozów z 30% i 40% popiołu były nieznaczące, istotne różnice statystyczne zaobserwowano tylko w 2021 roku, a najwyższy wynik odnotowano w kontroli. W Krynicach (tab. 33), zawartość popiołu nie wpłynęła znacząco na poziom siarki w kukurydzy. Wartości były zbliżone, co oznacza, że zmiana udziału popiołu w nawozie nie miała istotnego wpływu na zawartość siarki.

Źródło wapnia miało bardziej zauważalny wpływ na zawartość siarki w kukurydzy w Krynicach niż w Czesławicach. W Krynicach, w 2023 roku, różnice między średnimi wartościami przy różnych źródłach wapnia były widoczne, wyższe wartości uzyskano przy 40% popiołu. W Czesławicach źródło wapnia miało mniejszy wpływ na zawartość siarki w kukurydzy, a jego znaczenie uwidaczniało się głównie w interakcjach z innymi czynnikami, jak dawka nawożenia i proporcje wapnia do potasu (BxCxD). Proporcja wapnia do potasu miała różne znaczenie w zależności od lokalizacji. W Czesławicach wpływ tego czynnika na zawartość siarki w kukurydzy był widoczny jedynie w interakcji z dawką nawożenia. W Krynicach natomiast proporcja wapnia do potasu była czynnikiem o większym znaczeniu, co potwierdza statystyczna istotność w 2021 roku ($C - \eta^2 = p$ 32,72%).

Wyniki pokazały, że zmniejszenie dawki nawożenia nie miało istotnego wpływu na zawartość siarki w kukurydzy. Średnie wartości zawartości siarki przy obu dawkach były zbliżone we wszystkich latach, co wskazuje, że rośliny mogły efektywnie adaptować się do zmniejszonej dostępności nawozów bez większego ograniczenia zawartości siarki w kukurydzy.

6.2.7. Zawartość sodu w kukurydzy

W Czesławicach (tab.34) w zależności od ilości popiołu w nawozach wyniki zawartości sodu w kukurydzy istotnie różniły się tylko w 2021 roku. W latach 2022 i 2023 były generalnie na zbliżonym poziomie, przy czym w 2022 roku zawartości sodu

w kukurydzy były znacznie niższe niż w innych latach. Najwyższe średnie zawartości sodu we wszystkich latach odnotowano w badaniach kontrolnych. W Krynicach (tab.35) zmienność statystyczną odnotowano w latach 2022 i 2023 i również najniższe zawartości sodu w kukurydzy były w 2022 roku. Zaobserwowano, że we wszystkich latach zastosowanie 30% popiołu wiązała się z wyższą zawartością sodu w kukurydzy, zwłaszcza w Krynicach. Najwyższe zawartości odnotowano w trzecim roku badań.

Przy 30% udziale popiołu i w kombinacji z węglanem wapnia w Czesławicach, zawartości sodu we wszystkich latach były niższe w porównaniu do nawozów zawierających siarczan wapnia, natomiast przy 40% popiołu przeważały trochę wyższe wartości sodu w kukurydzy przy użyciu CaCO_3 . W Krynicach wyniki były bardziej zróżnicowane, a wyższe zawartości sodu w kukurydzy odnotowano także przy 30% popiołu.

W Czesławicach stosunek wapnia do potasu istotnie wpływał na wyniki tylko w 2021 roku, pozostałych latach nie stwierdzono istotnych różnic. Z kolei w Krynicach istotne różnice odnotowano we wszystkich latach badań. Najwyższa zawartość sodu w kukurydzy była w 2023 roku przy 30% popiołu, CaSO_4 jako źródło wapnia oraz proporcji wapnia do potasu 50/20. W innych obiektach i latach zależność ta nie była aż tak wyraźna, ale podobne tendencje można było zauważyć, szczególnie przy wyższych stosunkach wapnia do potasu.

W Czesławicach większa dawka nawozu sprzyjała nagromadzeniu sodu w roślinach, co wskazuje na pozytywną korelację między intensywniejszym nawożeniem a wzrostem zawartości sodu w kukurydzy.

6.3. Zawartość mikroelementów w kukurydzy i innych metali

6.3.1. Zawartość cynku w kukurydzy

Zawartości cynku w kukurydzy były zróżnicowane w poszczególnych latach. Średnia zawartość cynku w zależności od zastosowanych czynników doświadczalnych oraz roku badań wahała się w przedziale od 5,80 do 70,17 $\text{mg Zn} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w Czesławicach oraz w granicach od 6,55 do 71,00 $\text{mg Zn} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w Krynicach (tab. 36 i 37), gdzie odnotowano zwiększenie koncentracji cynku w obiektach kontrolnych. W obu lokalizacjach najniższe wartości odnotowano w 2021 roku, ostatecznie średnie z lat były na zbliżonym poziomie i nie różniły się istotnie, Jakkolwiek różnice między latami były znaczne. Wyższe zawartości cynku w kukurydzy odnotowano przy 40% popiołu.

W Krynicach w latach 2021 i 2022 oraz dla średniej z lat badań przy 30% zawartości popiołu w nawozie wyższe zawartości cynku w kukurydzy wystąpiły w obiektach, w których aplikowano nawozy na bazie CaCO_3 . W latach 2021 i 2023 zależność ta była odwrotna w Czesławicach. Przy stosowaniu w uprawie kukurydzy nawozów z 40% zawartością popiołu wyższe zawartości cynku w kukurydzy stwierdzono w roślinach z obiektów z CaSO_4 we wszystkich latach w Krynicach oraz w Czesławicach tylko w drugim roku trwania eksperymentu polowego. Różnice istotne statystycznie zaobserwowano w pierwszym roku badań w Krynicach oraz w trzecim roku w Czesławicach.

Proporcje wapnia do potasu w nawozach miały zróżnicowany wpływ na zawartość cynku w kukurydzy w zależności od lokalizacji. W Czesławicach zmienność wyników związana z tym czynnikiem była widoczna szczególnie w latach 2021 i 2023, gdzie wpływ proporcji na poziom cynku był istotny statystycznie, a pierwszym roku badań również z dawką nawożenia. W Krynicach proporcje wapnia do potasu okazały się mniej istotne, wpływ ten widoczny był w tylko pierwszym roku w interakcji ze źródłem wapnia.

Wpływ dawki nawozów na zawartość cynku w kukurydzy w Czesławicach nie był istotny statystycznie. Należy jednak podkreślić, że największe różnice odnotowano w drugim roku badań. W większości przypadków niższe zawartości cynku były w kombinacjach z dawką optymalną bez względu na zawartość popiołu w nawozie i źródło wapnia. Wyjątkiem była kukurydza uprawiana w trzecim roku badań, w której zastosowano nawozy zawierające 40% popiołu. Średnia dla dawki optymalnej z trzech lat wyniosła przy 30% popiołu $31,37 \text{ mg Zn} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, a przy 40% popiołu $30,78 \text{ mg Zn} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, a dla dawki obniżonej o 25% odpowiednio – $34,54$ i $35,32 \text{ mg Zn} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$

6.3.2. Zawartość manganu w kukurydzy

W Czesławicach (tab. 38) zawartości manganu w kukurydzy przy zastosowaniu nawozów z 40% udziałem popiołu były wyższe niż przy zastosowaniu 30% popiołu (A), natomiast odwrotną zależność zauważono w Krynicach (tab. 39). Istotne statystycznie różnice wystąpiły w drugim roku w obu lokalizacjach oraz w trzecim roku w Krynicach. Średnie w poszczególnych latach kształtowały się w przedziałach od $4,13$ – $39,63 \text{ mg Mn} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ w Czesławicach i $23,50$ – $125,70 \text{ mg Mn} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ w Krynicach. Najniższe zawartości manganu w kukurydzy oznaczono w drugim roku uprawy w Czesławicach, a najwyższe w Krynicach w pierwszym roku.

Zastosowane w mieszankach nawozowych źródło wapnia (B) miało niejednoznaczny wpływ na zawartość manganu w kukurydzy w Czesławicach, natomiast w Krynicach we wszystkich latach wyższe wartości manganu zbadano w kombinacji z 30% popiołu i CaCO_3 , a przy 40% popiołu przy zastosowaniu CaSO_4 . W Krynicach zaobserwowano różnice istotne statystycznie we wszystkich latach badań, w Czesławicach natomiast tylko w 2022 roku.

Proporcje wapnia do potasu w nawozach (C) istotnie wpływały na wyniki tylko w Krynicach, zależności te zaobserwowano w 2021 i 2022 roku, a w ostatnim roku uprawy jako interakcję ze źródłem wapnia (B×C).

Wpływ dawki nawożenia w Czesławicach nie był istotny, a różnice między tymi wariantami zróżnicowane, szczególnie w drugim roku badań. W średnich z lat wyższe wartości były przy optymalnym nawożeniu, a różnice w zawartości manganu w kukurydzy były niewielkie.

6.3.3. Zawartość miedzi w kukurydzy

Zawartości miedzi w kukurydzy obu lokalizacjach były dosyć zbliżone. Średnia zawartość miedzi w kukurydzy wahała się w przedziale od 5,26 do 15,08 $\text{mg Cu} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w Czesławicach oraz w granicach od 10,75 do 16,08 $\text{mg Cu} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w Krynicach (tab. 40 i 41). Średnie z lat były na podobnym poziomie i nie różniły się istotnie, jednak wyższe zawartości miedzi w kukurydzy w obu doświadczeniach na ogół notowano przy 40% udziale popiołu.

W Krynicach w latach 2022 oraz Czesławicach w 2021 roku przy 30% zawartości popiołu w nawozach wyższe zawartości miedzi w kukurydzy wystąpiły w obiektach, w których zastosowano CaSO_4 . Przy 40% popiołu wzrost zawartości tego pierwiastka wystąpił w 2022 i 2023 roku i dla średnich z lat w Czesławicach w nawozach z CaCO_3 , natomiast w Krynicach wyższe wyniki uzyskano przy CaSO_4 . Statystycznie istotne różnice zaobserwowano w pierwszym roku badań w Czesławicach oraz w drugim i trzecim roku w Krynicach. Zaobserwowano wyraźny wpływ tego czynnika również w interakcji z proporcjami wapnia do potasu oraz w Czesławicach także z dawką nawożenia.

Proporcje wapnia do potasu w nawozach miały niejednoznaczny wpływ na zawartość miedzi w kukurydzy. W obu lokalizacjach zmienność wyników związana z tym czynnikiem była widoczna szczególnie w latach 2021 i 2023, gdzie wpływ proporcji na poziom miedzi był istotny statystycznie.

Dawki nawożenia miały istotny wpływ na zawartość miedzi w kukurydzy w Czesławicach w pierwszym i drugim roku badań. W większości przypadków przy 30% udziale popiołu niższe zawartości miedzi były w kombinacjach z dawką optymalną (szczególnie w drugim roku badań), natomiast przy 40% popiołu odnotowano zależności odwrotne. Najwyższe zawartości miedzi zaobserwowano przy optymalnym nawożeniu w trzecim roku badań, gdzie zastosowano nawozy zawierające 40% popiołu.

6.3.4. Zawartość żelaza w kukurydzy

Średnia zawartość żelaza w kukurydzy w zależności od zastosowanych czynników doświadczalnych oraz roku badań wahała się w przedziale od 126,4 do 377,1 mg Fe · kg⁻¹ s.m. w Czesławicach oraz w granicach od 99,8 do 270,0 mg Fe · kg⁻¹ s.m. w Krynicach (tab. 42 i 43). Wszystkie badane czynniki doświadczalne wpływały na zróżnicowanie zawartości żelaza w kukurydzy.

W przypadku uprawy kukurydzy w Czesławicach istotny wpływ czynników doświadczalnych (B – źródło wapnia w nawozie, C – ilość wapnia i potasu w nawozie, D – dawka nawozu) oraz ich interakcji (BxC, BxCxD) stwierdzono jedynie w trzecim roku trwania eksperymentu. Natomiast w Krynicach w drugim roku trwania eksperymentu połowego odnotowano istotny wpływ zawartości wapnia i potasu w nawozie oraz interakcji pomiędzy źródłem wapnia w nawozie a zawartością wapnia i potasu w nawozie na zawartość analizowanego mikroelementu w roślinie testowej. Z kolei w trzecim roku badań istotną zależność stwierdzono jedynie w przypadku wpływu zawartości wapnia i potasu w nawozie na zawartość żelaza w kukurydzy.

Zwiększenie zawartości popiołu w nawozie przyczyniło się do zmniejszenia zawartości żelaza w kukurydzy w Czesławicach zarówno średniej z 3 lat badań, jak i w roku 2021 i 2022. Z kolei w Krynicach we wszystkich latach badań zwiększenie zawartości popiołu w nawozie z 30 na 40% wiązało się ze wzrostem zawartości żelaza w roślinie testowej.

W Czesławicach we wszystkich latach trwania eksperymentu w serii z 30% udziałem popiołu w nawozie zawartość żelaza w kukurydzy była wyższa w nawozach z dodatkiem CaSO₄ niż w nawozach z dodatkiem CaCO₃. Z kolei przy aplikacji nawozów z 40% udziałem popiołu w drugim i trzecim roku (w odróżnieniu od pierwszego roku) i dla średniej ze wszystkich lat badań wyższe zawartości żelaza stwierdzono w kukurydzy z serii z dodatkiem CaCO₃ niż CaSO₄.

W Krynicach we wszystkich latach badań przy niższej zawartości popiołu w nawozie wyższe zawartości żelaza w kukurydzy wystąpiły w obiektach, w których aplikowano nawozy na bazie CaCO_3 . Zależność ta była odwrotna niż w Czesławicach. Przy stosowaniu w uprawie kukurydzy nawozów z 40% zawartością popiołu wyższe zawartości żelaza w kukurydzy analogicznie wystąpiły w roślinach z obiektów z CaCO_3 , przy czym zależność tą odnotowano dla średniej z lat badań oraz w pierwszym i drugim roku trwania eksperymentu polowego. Niemniej jednak warto podkreślić, że trzecim roku badań stwierdzono niewielkie różnice w zawartości żelaza w kukurydzy z obiektów z CaCO_3 i CaSO_4 .

W Czesławicach obniżenie dawki potasu w nawozie (C) wiązało się ze zmniejszeniem zawartości żelaza w kukurydzy w pierwszym roku badań oraz dla średniej z lat badań, a także w drugim i trzecim roku przy dawce nawozu obniżonej o 25%. W pozostałych przypadkach odnotowano zwiększenie koncentracji żelaza w roślinie testowej.

W uprawie kukurydzy w Czesławicach obniżenie dawki nawozu o 25%, bez względu na zawartość popiołu w nawozie i źródło wapnia skutkowało zwiększeniem zawartości żelaza w kukurydzy. Wyjątek stanowiła kukurydza uprawiana w trzecim roku badań, w uprawie której aplikowano nawozy z 40% zawartością popiołu.

6.3.5. Zawartość kadmu w kukurydzy

W tabelach 44 i 45 przedstawiono zawartość kadmu w kukurydzy pochodzącej z dwóch lokalizacji: Czesławic i Krynic. W Czesławicach, w latach 2021-2023, średnia zawartość kadmu w kukurydzy była zbliżona, niezależnie od zawartości popiołu w nawozach (30% lub 40%). Różnice w zawartości kadmu związane z dawkami nawozów były niewielkie i nie wykazały istotnych statystycznie różnic. Źródło wapnia również nie miało istotnego wpływu na poziom kadmu w kukurydzy. W Krynicach wyniki były podobne. W latach 2021 i 2022 zawartość kadmu wynosiła średnio $0,050 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, niezależnie od zawartości popiołu czy źródła wapnia. W 2023 roku zawartość kadmu była nieco większa, osiągając wartości zbliżone do $0,062\text{-}0,063 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, jednak również bez istotnych różnic statystycznych pomiędzy badanymi wariantami.

Wyniki badań wskazują, że ani zawartość popiołu w nawozach, ani źródło wapnia (CaCO_3 lub CaSO_4) nie wpływały istotnie na zawartość kadmu w kukurydzy w badanych lokalizacjach. Różnice między średnimi zawartościami kadmu w kukurydzy były niewielkie, a poziom tego metalu pozostawał stabilny, niezależnie od dawki nawożenia czy

warunków zastosowanych w badaniu. W żadnym z przypadków zawartość kadmu w kukurydzy nie przekroczyła dopuszczalnych norm, co sugeruje, że zastosowane metody nawożenia są bezpieczne pod względem akumulacji kadmu w roślinach.

6.3.6. Zawartość arsenu w kukurydzy

W Czesławicach zawartość arsenu w kukurydzy wahała się znacznie w zależności od zastosowanej dawki nawożenia oraz rodzaju nawozu (tab. 46). W 2021 roku średnie wartości oscylowały wokół $0,034 \text{ mg As} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ przy 30% popiołu, natomiast przy 40% udziale popiołu zawartość arsenu była niższa i wynosiła $0,029 \text{ mg As} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ W 2022 roku zawartości arsenu w kukurydzy były niższe i wynosiły średnio $0,010$ i $0,012 \text{ mg As} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ W 2023 roku zawartość arsenu w kukurydzy wynosiła średnio około $0,015 \text{ mg As} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ przy w obu wariantach zawartości popiołu. W drugim roku badań niższe zawartości arsenu w kukurydzy oznaczono przy CaSO_4 , ale tylko w serii z 40% popiołu. W pozostałych latach przeważnie były one zbliżone do siebie. Zaobserwowano wyższe zawartości tego pierwiastka w kukurydzy przy obniżonej dawce nawożenia w 2021 i 2022 roku, co wskazuje na większą akumulację arsenu przy mniejszej dawce nawozu. Wpływ dawki nawozów w pierwszym roku oraz różnych wariantów nawożenia oraz interakcje w drugim i trzecim roku był istotny statystycznie.

W Krynicach zawartość arsenu w kukurydzy była wyższa niż w Czesławicach, zwłaszcza w 2021 roku, gdzie wartości osiągnęły średnio $0,051 \text{ mg}$ i $0,048 \text{ mg As} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ po zastosowaniu odpowiednio 30% i 40% popiołu (tab. 47). W 2022 roku zawartość arsenu w kukurydzy była niższa, podobnie jak w Czesławicach, a w następnym roku znów wzrosła, co sugeruje wpływ zmiennych warunków środowiskowych. W Krynicach wpływ badanych czynników na poziom arsenu w kukurydzy był niewielki, ale istotny.

Analizując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że zawartość arsenu w kukurydzy była wyższa w Krynicach, szczególnie w pierwszym roku badań. W obu lokalizacjach wyższe zawartości arsenu w kukurydzy obserwowano przy stosowaniu niższych dawek nawożenia. Z kolei zmniejszenie zawartości arsenu w kukurydzy w 2022 roku mogło być związane z warunkami klimatycznymi lub zmianami w dostępności składników odżywczych w glebie. Wyniki sugerują, że w długoterminowej uprawie kukurydzy konieczne jest monitorowanie poziomu arsenu, zwłaszcza przy zmiennych dawkach nawożenia, aby uniknąć nadmiernej akumulacji tego pierwiastka w roślinach.

6.3.7. Zawartość rtęci w kukurydzy

W Czesławicach zawartość rtęci w kukurydzy była stabilna przez wszystkie trzy lata badań (tab. 48). W 2021 roku zawartość rtęci wynosiła średnio $0,0054\text{--}0,0055 \text{ mg Hg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., bez znaczących różnic między zawartością popiołu czy źródłem wapnia w nawozach. Niewielki wpływ na wyniki związany był z dawkami nawożenia. W 2022 roku zanotowano znaczny wzrost zawartości rtęci w niektórych próbach roślin, osiągający średnio $0,0093$ i $0,0073 \text{ mg Hg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. po zastosowaniu nawożenia odpowiednio z 30% i 40% popiołu. W 2023 roku wartości wróciły do poziomu $0,0050 \text{ mg Hg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., co sugeruje, że wpływ różnych wariantów nawożenia był ograniczony. Średnia z lat wskazuje że nieznacznie wyższe zawartości rtęci w kukurydzy były przy zastosowaniu CaCO_3 .

W Krynicach wyniki były podobne (tab. 49), we wszystkich latach nie odnotowano różnic istotnych statystycznie. W 2021 roku zawartość rtęci we wszystkich próbkach wynosiła $0,0050 \text{ mg Hg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., niezależnie od warunków nawożenia. W 2022 roku w niektórych próbach odnotowano wzrost, a najwyższe wartości otrzymano przy 40% popiołu i CaCO_3 i stosunku wapnia do potasu 50/10, co mogło być wynikiem specyficznych warunków glebowych lub klimatycznych w tym roku. W 2023 roku zawartość rtęci w kukurydzy wróciła do poziomu $0,0050 \text{ mg Hg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., co potwierdza stabilność zawartości rtęci przy długoterminowym stosowaniu różnych nawozów.

W obu lokalizacjach zawartość rtęci w kukurydzy była stabilna i generalnie niska, co świadczy o tym, że zastosowane metody nawożenia nie wpływały znacząco na akumulację rtęci w roślinach. Wartości te nie przekraczały norm bezpieczeństwa, co wskazuje na brak zagrożeń związanych z gromadzeniem się rtęci w kukurydzy w tych warunkach uprawy. Wzrosty zawartości rtęci w niektórych próbach w 2022 roku mogły być spowodowane czynnikami zewnętrznymi, ale nie miały trwałego wpływu na wyniki w kolejnych latach. W ogólnym ujęciu, badane nawozy można uznać za bezpieczne pod względem wpływu na poziom rtęci w roślinach.

6.3.8. Zawartość ołowiu w kukurydzy

W tabelach 50 i 51 przedstawiono wyniki dotyczące zawartości ołowiu w kukurydzy z Czesławic i Krynic. W Czesławicach średnie wartości zawartości ołowiu w kukurydzy wynosiły od $0,036$ do $0,182 \text{ mg Pb} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., zależnie od poziomu popiołu i źródła wapnia. Zaobserwowano wzrost zawartości ołowiu w kukurydzy w każdym kolejnym roku. W roku 2022 i dla średniej z lat wyższe zawartości w kukurydzy odnotowano przy 30% udziale

popiołu. We wszystkich latach wyższe zawartości ołowiu w kukurydzy widoczne były przy obniżonym o 25% nawożeniu. Wpływ poszczególnych czynników nie był istotny statystycznie, poza wpływem dawki nawozu w pierwszym roku.

W Krynicach zawartość ołowiu w kukurydzy wynosiła średnio od 0,051 do 0,162 mg Pb · kg⁻¹ s.m., przy czym nieco wyższe średnie wartości zanotowano dla nawozów z 30% popiołu. Również tutaj nie zaobserwowano istotnych różnic statystycznych związanych z użytymi nawozami, co wskazuje na stabilność wyników w poszczególnych latach.

Należy zauważyć również wzrost zawartości ołowiu w roślinach testowych w obu lokalizacjach, gdzie w nawożeniu stosowane były wyłącznie nawozy komercyjne.

Wyniki wskazują, że zawartość ołowiu w kukurydzy była stabilna i nie wykazała istotnych różnic związanych z zastosowanymi rodzajami nawozów, ich dawkowaniem czy zawartością popiołu. W obydwu lokalizacjach, zarówno Czesławicach, jak i Krynicach, zawartości ołowiu w kukurydzy były porównywalne, a ich poziom nie przekraczał norm bezpiecznych dla upraw. Zastosowane metody nawożenia nie wpłynęły znacząco na akumulację ołowiu w kukurydzy, co świadczy o ich odpowiedniej kontroli środowiskowej.

6.4. Zawartość suchej masy w kiszonce z kukurydzy

W Czesławicach (tab. 52) średnia zawartość suchej masy w kiszonce z kukurydzy wynosiła od 34,72% do 39,80%, zależnie od zastosowanych warunków nawożenia. W 2021 i 2022 roku wyższe zawartości suchej masy w kiszonce z kukurydzy zaobserwowano przy 40% popiołu, a we wszystkich latach przy obniżonej dawce nawożenia, szczególnie przy 30% zawartości popiołu. W 2022 i 2023 roku średnia zawartość suchej masy w kiszonce z kukurydzy wzrastała, natomiast wartości były bardziej wyrównane pomiędzy różnymi wariantami nawożenia. Różnice między zastosowanymi wariantami nawożenia były istotne w 2021, w przypadku średniej z lat wyniki były praktycznie takie same.

W Krynicach zawartość suchej masy w kiszonce z kukurydzy była zbliżona, ale wykazywała większą zmienność w poszczególnych latach (tab. 53). Średnie zawartości suchej masy w kiszonce z kukurydzy wahały się od 33,31% do 39,69%, z wyższymi wynikami przy stosowaniu optymalnej dawki i 40% popiołu. W 2022 roku wartości wzrosły, osiągając maksymalnie 40,66% przy zastosowaniu CaCO₃ i proporcji wapnia do potasu 50/10. W ostatnim roku zawartości suchej masy w kiszonce z kukurydzy były nieco niższe

niż w 2022 roku, z wyższymi wynikami przy wyższej zawartości popiołu i optymalnej dawce nawożenia.

Porównanie wyników z obu lokalizacji wskazuje, że zawartość suchej masy w kiszonkach z kukurydzy była porównywalna, choć Krynice wykazywały nieco wyższe wartości w 2022 roku. W obu lokalizacjach wyższe wartości suchej masy w kiszonce z kukurydzy przeważnie były związane z większą zawartością popiołu oraz optymalnymi dawkami nawożenia, co może sugerować korzystny wpływ tych czynników na poprawę jakości kiszonki. Wyniki te wskazują na znaczenie dostosowania dawek i rodzaju nawożenia w celu uzyskania optymalnych parametrów kiszonki, co może pozytywnie wpłynąć na jej wartość odżywczą.

6.5. Zawartość włókna w kiszonce z kukurydzy

Zawartość włókna w kiszonkach wytworzonych z kukurydzy zebranej w Czesławicach wahała się od 5,00% do 17,54% (tab. 54) w zależności od roku badań i warunków nawożenia. W 2021 roku wyższe wartości odnotowano po zastosowaniu nawozu z 30% popiołu i obniżonej dawce nawożenia, osiągając średnio 15,67%. W kolejnych latach badań zawartość włókna w kiszonce z kukurydzy była niższa, oscylując wokół 7,63% przy 30% popiołu i 6,39% przy udziale 40% popiołu w 2022 roku oraz analogicznie 5,98% i 5,84% w 2023 roku. Wyższe zawartości włókna w kiszonce z kukurydzy na ogół otrzymywano w kiszonkach przy zastosowaniu CaCO_3 . Wpływ dawki nawożenia, zawartości popiołu oraz źródła wapnia zazwyczaj był istotny, co wskazuje na znaczenie tych czynników dla poziomu włókna w kiszonce. Obniżona dawka nawożenia sprzyjała wyższej zawartości włókna w kiszonce z kukurydzy, szczególnie przy wyższej zawartości popiołu.

W Krynicach zawartość włókna w kiszonce z kukurydzy była bardziej zróżnicowana niż w Czesławicach (tab.55). W 2021 roku wynosiła od 5,27% (kontrola), 7,97% (30% popiołu) do 13,14% (40% popiołu), w następnych latach zawartości włókna w kiszonkach były coraz niższe, przy czym wyższe wartości były związane z nawożeniem o większej zawartości popiołu. Wpływ nawożenia był widoczny we wszystkich latach badań, zwłaszcza w zakresie źródła wapnia i zawartości popiołu, co miało istotny wpływ na ostateczne wyniki.

Analizując wyniki z obu lokalizacji, można stwierdzić, że zawartość włókna w kiszonkach z kukurydzy była wyższa w Czesławicach, szczególnie przy stosowaniu obniżonej dawki nawożenia i wyższej zawartości popiołu. W Krynicach zmienność wyników była większa, co może wynikać z różnic w składzie gleby i jej reakcji na nawożenie

lub wpływ warunków pogodowych. W obu lokalizacjach czynniki takie jak zawartość popiołu i rodzaj stosowanego nawozu miały znaczący wpływ na poziom włókna w kiszonkach z kukurydzy. Wyniki te sugerują, że dostosowanie dawek nawożenia i składników odżywczych jest kluczowe dla uzyskania odpowiedniej jakości kiszonki, co wpływa na wartość paszy dla zwierząt.

6.6. Zawartość makroelementów w kisonce z kukurydzy

6.6.1. Zawartość azotu ogółem w kisonce z kukurydzy

W tabelach 56 i 57 przedstawiono zawartość azotu ogółem w kisonce z kukurydzy, uzyskanej w dwóch lokalizacjach: Czesławicach i Krynicy, w latach 2021-2023. W Czesławicach średnia zawartość azotu ogółem w kisonce z kukurydzy wahała się od 8,83 do 12,30 g N · kg⁻¹ s.m. W 2021 roku wyższe wartości azotu w kisonce z kukurydzy odnotowano przy optymalnej dawce nawożenia po zastosowaniu nawozów z 30% popiołu i przy obniżonej dawce nawozów w serii z 40% popiołu, osiągając średnio 10,04 i 10,25 g N · kg⁻¹ s.m. W serii z 40% popiołu w 2022 roku zawartość azotu w kisonce z kukurydzy była wyższa, niezależnie od dawki nawożenia, z wartościami dochodzącymi średnio do 12,76 g N · kg⁻¹ s.m. W 2023 roku zawartość azotu spadła, z najwyższymi wartościami wynoszącymi około 9,46 g N · kg⁻¹ s.m. Przy zastosowaniu siarczanu wapnia i 30% popiołu w 2021 i 2022 oraz średniej z lat otrzymano wyższe zawartości w kisonce z kukurydzy niż przy zastosowaniu CaCO₃, z kolei w obiektach nawożonych 40% popiołu i CaSO₄ we wszystkich latach wartości były niższe. Wyniki wykazały istotny wpływ poszczególnych czynników i interakcji na poziom azotu w kisonce w pierwszych i trzecim roku eksperymentu.

W Krynicy zawartość azotu w kisonce była porównywalna do wyników z Czesławic, choć w niektórych latach obserwowano wyższe wartości. Średnia zawartość azotu wynosiła od 10,21 g N · kg⁻¹ s.m. w próbkach kontrolnych do 12,65 g N · kg⁻¹ s.m, a najwyższe wartości były związane z zastosowaniem 30% popiołu, CaSO₄, w 2022 roku osiągając maksymalnie 14,59 g N · kg⁻¹ s.m. W 2023 roku zaobserwowano spadek wartości, z poziomami azotu średnio w granicach 8,82–10,79 g N · kg⁻¹ s.m. Zaobserwowano znaczący wpływ źródła wapnia i proporcji wapnia do postu oraz interakcji między nimi tylko w 2021 roku.

Analizując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że zawartość azotu ogółem w kisonce z kukurydzy była zbliżona, z wyższymi wartościami w Krynicy, szczególnie

w 2022 roku. W obu przypadkach wyższa zawartość popiołu sprzyjały zwiększonej zawartości azotu. Różnice między wariantami nawożenia były istotne statystycznie, co wskazuje na konieczność precyzyjnego doboru nawozów w celu osiągnięcia optymalnej jakości paszy. Regularne monitorowanie i dostosowywanie strategii nawożenia może pomóc w uzyskaniu odpowiedniego poziomu azotu w kiszonce, co jest istotne dla jej wartości odżywczej.

6.6.2. Zawartość fosforu w kiszonce z kukurydzy

Zawartość fosforu w kiszonce z kukurydzy przedstawiono w tabelach 58 z Czesławic i 59 z Krynicy. W Czesławicach średnia zawartość fosforu w kiszonce z kukurydzy wynosiła od 1,53 do 2,57 g P · kg⁻¹ s.m. w zależności od zastosowanego nawożenia. W 2021 roku wyższe wartości fosforu w kiszonce z kukurydzy odnotowano przy optymalnej dawce nawożenia i przy zastosowaniu 30% popiołu, osiągając średnio 2,37 mg P · kg⁻¹ s.m. W 2022 roku poziom fosforu w kiszonce spadł, niezależnie od konfiguracji nawożenia. W 2023 roku wartości były zbliżone, osiągając średnią około 1,85 g P · kg⁻¹ s.m. Wpływ dawki nawożenia oraz zawartości popiołu był statystycznie istotny w 2021 i 2022 roku, co wskazuje, że te czynniki miały znaczenie dla zawartości fosforu w kiszonce.

W Krynicy średnia zawartość fosforu w kiszonce z kukurydzy była niższa niż w Czesławicach, wynosząc od 1,42 (kontrola) do 1,89 g P·kg⁻¹ s.m. (2023). We wszystkich latach zawartości fosforu w kiszonce były narastające, a różnice między poszczególnymi wariantami nawożenia były nieistotne statystycznie.

Porównując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że zawartość fosforu w kiszonce z kukurydzy była wyższa w Czesławicach, szczególnie w pierwszym roku badań, gdy stosowano optymalną dawkę nawożenia. W Krynicy zawartości fosforu w kiszonce z kukurydzy były bardziej stabilne, co może świadczyć o mniejszej podatności gleb na zmienne warunki nawożenia. W obu przypadkach wyższa zawartość popiołu w nawozach nie zawsze przekładała się na wyższe zawartości fosforu w kiszonce, co wskazuje na złożoną interakcję między nawożeniem a przyswajalnością fosforu przez rośliny.

6.6.3. Zawartość potasu w kiszonce z kukurydzy

W Czesławicach średnia zawartość potasu w kiszonce z kukurydzy wahała się od 9,67 do 11,58 g K·kg⁻¹ s.m., w zależności od warunków nawożenia (tab. 60). W 2021 roku

zawartość potasu w kiszonce z kukurydzy była wyższa przy stosowaniu obniżonej dawki nawożenia, osiągając średnio $10,79 \text{ g K} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, przy 30% popiołu. W 2022 roku zawartości potasu w kiszonce z kukurydzy były nieco niższe, oscylując wokół $9,67 - 9,86 \text{ g K} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ W 2023 roku zaobserwowano wzrost zawartości potasu w kiszonce z kukurydzy, szczególnie przy obniżonej dawce nawożenia, z wartościami dochodzącymi do $12,18 \text{ g K} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ W Krynicach zawartość potasu w kiszonce była zbliżona do tej w Czesławicach, a średnie wartości wahały się od $9,65 \text{ g}$ do $11,52 \text{ g K} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, z nieco wyższymi wartościami przy nawożeniu z 40% popiołu w 2 pierwszych latach badań (tab.61). W 2023 roku, podobnie jak w Czesławicach, zawartość potasu w kiszonce z kukurydzy wzrosła, osiągając maksymalnie $11,72 \text{ g K} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m}$ przy zastosowaniu CaCO_3 i proporcji wapnia do potasu 50/10, co wskazuje na korzystny wpływ wyższej zawartości popiołu oraz optymalnych proporcji nawożenia.

Porównując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że zawartość potasu w kiszonce z kukurydzy była zbliżona w Czesławicach i Krynicach, z nieco wyższymi wartościami, gdy stosowano obniżoną dawkę nawożenia. Wyższa zawartość popiołu w nawozach sprzyjała większej akumulacji potasu w kiszonce, co było szczególnie widoczne w 2023 roku. Wpływ różnych wariantów nawożenia na poziom potasu w kiszonce z kukurydzy nie był istotny statystycznie w obu miejscach.

6.6.4. Zawartość magnezu w kiszonce z kukurydzy

W tabelach 62 i 63 przedstawiono zawartość magnezu w kiszonce z kukurydzy w dwóch lokalizacjach: Czesławicach i Krynicach, w latach 2021-2023. Średnia zawartość magnezu w kiszonce z kukurydzy w Czesławicach wahała się od $0,86$ do $1,20 \text{ g Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, w zależności od zastosowanych nawozów. W 2021 roku wyższe wartości odnotowano przy stosowaniu obniżonej dawki nawożenia, zwłaszcza przy nawozach z 40% popiołu, co pozwoliło osiągnąć średnią zawartość magnezu w kiszonce z kukurydzy na poziomie $1,08 \text{ g Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. W 2022 roku zawartości magnezu w kiszonce z kukurydzy były niższe, a różnice między wariantami nawożenia były mniej wyraźne. W 2023 roku ponownie zaobserwowano nieznaczny wzrost zawartości magnezu w kiszonce z kukurydzy. Źródło wapnia, proporcje między wapniem i magnezem oraz dawka nawożenia statystycznie istotnie wpływały na osiągnięte rezultaty w pierwszym i trzecim roku badań.

W Krynicach średnia z trzech lat zawartość magnezu w kiszonce z kukurydzy była generalnie wyższa niż w Czesławicach. Średnia zawartość magnezu w kiszonce

z kukurydzy wahała się od 0,88 do 1,20 g Mg · kg⁻¹, a wyższe wartości odnotowano przy nawożeniu z 40% udziałem popiołu. W 2022 roku, podobnie jak w Czesławicach, zawartość magnezu w kiszonce z kukurydzy zmniejszyła się do poziomu odpowiednio 0,88 i 0,93 g Mg · kg⁻¹, następnie w 2023 roku wartości te wyraźnie wzrosły. Różnice w wartościach po zastosowaniu badanych źródeł wapnia była niewielka, co wskazuje na stabilność zawartości magnezu w kiszonce przy stosowaniu odpowiednich dawek nawożenia. Wpływ niektórych z badanych czynników w pierwszym i drugim roku badań był istotny statystycznie.

Analiza wyników z obu lokalizacji pokazuje, że zawartość magnezu w kiszonce z kukurydzy była wyższa w Krynicach, zwłaszcza w latach 2021 i 2023. Różnice między wariantami nawożenia były bardziej widoczne w Czesławicach, natomiast w Krynicach wyniki były bardziej stabilne. Wskazuje to na potrzebę dostosowania strategii nawożenia do lokalnych warunków, aby utrzymać odpowiedni poziom magnezu w kiszonce, co jest istotne dla jakości paszy i zdrowia zwierząt.

6.6.5. Zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy

Średnia zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy w Czesławicach wahała się od 1,98 do 2,43 g Ca · kg⁻¹, zależnie od zastosowanych warunków nawożenia (tab.64). Średnie zawartości wapnia w kiszonce niewiele różniły się między różnymi wariantami dawki popiołu. W 2021 roku wyższe zawartości wapnia w kiszonce z kukurydzy odnotowano przy obniżonej dawce nawożenia i 30% popiołu - 2,47 g Ca · kg⁻¹. W 2022 roku zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy była stabilna, z podobnymi wynikami dla optymalnej i obniżonej dawki nawożenia. W 2023 roku zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy była niższa niż w latach poprzednich. Różnice między zastosowanymi wariantami nawożenia były istotne, co wskazuje na wpływ dawki nawożenia na zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy.

W Krynicach zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy była nieco wyższa niż w Czesławicach, osiągając wartości od 2,35 do 2,51 g Ca · kg⁻¹ (tab.65). W poszczególnych latach wartości były stabilne, a najwyższe poziomy wapnia zazwyczaj uzyskiwano przy nawożeniu 40% popiołem i źródle wapnia CaSO₄. W Krynicach nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy wariantami nawożenia.

Analizując wyniki z obu miejscowości, można zauważyć, że zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy była wyższa w Krynicach, szczególnie przy zastosowaniu wyższej zawartości popiołu i źródła wapnia w formie CaSO₄. W Czesławicach obniżona dawka

nawożenia również sprzyjała zwiększeniu zawartości wapnia w kiszonce z kukurydzy, ale różnice były wyraźne tylko w pierwszym roku. W obu lokalizacjach wyższa zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy była związana z nawożeniem zawierającym 40% popiołu, co może wskazywać na pozytywny wpływ takiego nawożenia na akumulację wapnia w kiszonce. Wyniki te podkreślają znaczenie precyzyjnego doboru dawek nawożenia i źródeł wapnia, co może korzystnie wpłynąć na jakość kiszonki.

6.7. Zawartość makroelementów w glebie

6.7.1. Zawartość azotu ogólnego w glebie

Zawartość azotu ogólnego w glebie po uprawie kukurydzy w Czesławicach przedstawiono w tabeli 66. Średnie wartości we wszystkich latach oscylowały na zbliżonym poziomie, przy 30% udziale popiołu wynosiły około $1,35 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, a przy 40% popiołu $1,27 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ We wszystkich latach wyższe wartości odnotowano przy obniżonej dawce nawożenia oraz przy zastosowaniu siarczanu potasu jako źródło wapnia. Różnice te były istotne statystycznie, co sugeruje, że zarówno dawka nawożenia, jak i zawartość popiołu miały wpływ na zawartość azotu w glebie.

W Krynicach zawartość azotu ogólnego w glebie była niższa niż w Czesławicach, wahając się od $0,86 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m}$ w kontroli w 2021 roku do $1,09 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m}$ w drugim roku badań przy 30% popiołu, CaSO_4 i stosunku wapnia i potasu 50/20 (tab. 67). Wpływ różnych czynników był mniej wyraźny niż w Czesławicach i widoczny był w trzecim roku badań. Porównując wyniki z obu lokalizacji, można stwierdzić, że zawartość azotu ogólnego w glebie była wyższa w Czesławicach, szczególnie przy zastosowaniu obniżonej dawki nawożenia i popiołu.

6.7.2. Zawartość azotu mineralnego w glebie

W tabelach 68 i 69 przedstawiono zawartość azotu mineralnego (N_{min}) w glebie po uprawie kukurydzy w dwóch lokalizacjach: Czesławicach i Krynicach, analizując lata 2021-2023. W Czesławicach średnia zawartość azotu mineralnego w glebie wynosiła od 70,71 do $84,65 \text{ kg N}_{\text{min}} \cdot \text{ha}^{-1}$, zależnie od roku i zastosowanego nawożenia. W 2021 roku najwyższe zawartości N_{min} odnotowano przy obniżonej dawce nawożenia, 30% zawartości popiołu, CaSO_4 i proporcji wapnia do popiołu 50/20, jednak porównując wyniki pod względem zawartości popiołu w glebie wyższe średnie uzyskano w obiektach nawożonych nawozami zawierającymi 40% popiołu. W pozostałych latach przy 30% popiołu wyższe średnie

zawartości azotu mineralnego w glebie uzyskano stosując siarczan wapnia, natomiast przy 40% popiołu węglan wapnia. Wpływ zawartości popiołu, źródła wapnia i proporcji wapnia do potasu oraz dawki nawożenia był istotny statystycznie, co sugeruje, że te czynniki znacząco wpływały na zawartość N_{min} w glebie.

W Krynicach średnia zawartość azotu mineralnego w glebie była bardziej zróżnicowana i wynosiła od 89,87 kg do 243,72 kg N_{min} · ha⁻¹. Najwyższe wartości odnotowano w pierwszym roku przy CaCO₃, 30% udziale popiołu, z wynikiem 274,77 kg N_{min} · ha⁻¹. W 2022 roku poziomy N_{min} były bardziej wyrównane, z najwyższą wartością wynoszącą 104,50 kg N_{min} · ha⁻¹ (40% popiołu, CaCO₃, 40/20). W 2023 roku wartości wzrosły, osiągając maksymalnie 264,80 kg N_{min}/ha przy 40% popiołu i CaSO₄ i proporcji wapnia do potasu 40/20. Wpływ zastosowanych wariantów nawożenia, w tym zawartości popiołu, źródła wapnia i proporcji wapnia do potasu, był istotny statystycznie, wskazując na znaczenie tych czynników w akumulacji N_{min} w glebie.

Porównując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że zawartość azotu mineralnego była wyższa w Krynicach, zwłaszcza w 2021 roku. W Czesławicach obniżone dawki nawożenia sprzyjały wyższej zawartości N_{min} w glebie, co wskazuje na ich korzystny wpływ na dostępność azotu. Różnice te sugerują, że odpowiednie dostosowanie dawek i rodzaju nawożenia może istotnie wpłynąć na akumulację azotu mineralnego, co jest niezwykle ważne dla utrzymania żyzności gleby i efektywności uprawy kukurydzy.

6.7.3. Zawartość fosforu w glebie

W tabelach 70 i 71 przedstawiono zawartość fosforu w glebie po uprawie kukurydzy w dwóch lokalizacjach: Czesławicach i Krynicach. W Czesławicach średnia zawartość fosforu w glebie wahała się od 32,25 mg P · 100 g⁻¹ (przy 40% popiołu) do 40,02 mg P · 100 g⁻¹ (przy 30% popiołu). W każdym roku różnice pomiędzy różnymi wariantami nawożenia były stosunkowo wyraźne, a wyższe zawartości fosforu w glebie odnotowano przy mniejszej zawartości popiołu i zastosowaniu CaSO₄ w nawozach. We wszystkich przypadkach, zarówno w kombinacjach, jak i badaniach kontrolnych wyższe wartości odnotowano przy 30% popiołu. Średnia zawartość fosforu w glebie utrzymywała się na dość stabilnym poziomie, choć wpływ dawki nawożenia i proporcji wapnia do potasu pozostawał istotny statystycznie także w interakcjach.

W Krynicach zawartość fosforu w glebie była znacznie niższa w porównaniu do Czesławic, ze średnimi wartościami oscylującymi w przedziale od 3,90 mg P · 100 g⁻¹

(dla 30% popiołu w 2021 roku) do $7,86 \text{ mg P} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (przy 40% popiołu w 2023 roku). W wszystkich latach badań zauważono wyraźny wzrost zawartości fosforu w glebie po zastosowaniu nawozów o 40% zawartości popiołu, a w 2022 i 2023 roku wyższe wartości uzyskano w nawozach zawierających CaCO_3 . Wpływ tych proporcji wapnia do potasu był statystycznie istotny każdym roku oraz w średnich z lat, a w 2023 roku w interakcji ze źródłem wapnia.

Porównując wyniki z obu lokalizacji, można stwierdzić, że gleby w Czesławicach miały wyższą zawartość fosforu niż gleby w Krynicach, niezależnie od zastosowanych wariantów nawożenia. W obu przypadkach wyższa zawartość fosforu była powiązana z zastosowaniem nawozów zawierających 40% popiołu, co może sugerować lepszą efektywność tego typu nawożenia w dostarczaniu fosforu do gleby. Wpływ różnych czynników, takich jak proporcje wapnia do potasu oraz dawka nawożenia, był bardziej wyraźny w Czesławicach, natomiast w Krynicach większe znaczenie miały zmiany związane z zawartością popiołu. Zastosowane metody nawożenia skutecznie podniosły zawartość fosforu w glebach, co wskazuje na ich efektywność w poprawie zasobności gleb pod względem tego pierwiastka.

6.7.4. Zawartość potasu w glebie

W Czesławicach średnia zawartość potasu w glebie wahała się od 23,22 do 24,63 $\text{mg K}_2\text{O} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (tab. 72). w zależności od warunków nawożenia. W kolejnych latach wyniki były zbliżone, a wyższa zawartość potasu występowała przy obniżonej dawce nawożenia. Wpływ wszystkich badanych czynników był wyraźny, co potwierdza udział obserwowanej zmienności w każdym roku, zwłaszcza w interakcjach między źródłem wapnia, proporcją wapnia do potasu i dawką nawożenia.

W Krynicach zawartość potasu w glebie była niższa w porównaniu do Czesławic, ale charakteryzowała się większą zmiennością (tab. 73). Średnie wartości wahały się od 15,08 $\text{mg K}_2\text{O} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ s.m. (przy niższej 30% popiołu w 2021 r.) do 22,62 $\text{mg K}_2\text{O} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ s.m. (przy 40% popiołu w 2023 r.). W 2022 roku zaobserwowano wzrost zawartości potasu, szczególnie w próbach nawożonych z 40% popiołu i optymalnymi proporcjami wapnia do potasu. W 2023 roku wyniki były stabilne, a różnice między wariantami nawożenia były wyraźniejsze, z wpływem proporcji nawożenia oraz zawartości popiołu.

Porównując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że zawartość potasu w glebie była wyższa w Czesławicach, szczególnie przy obniżonych dawkach nawożenia.

W Krynicach większe znaczenie miała zawartość popiołu i proporcje wapnia do potasu, co sugeruje wrażliwość gleb na te czynniki. Wpływ różnych wariantów nawożenia był istotny statystycznie, co sugeruje, że odpowiednie zarządzanie nawożeniem może znacząco wpłynąć na poziom potasu w glebie. Efektywne nawożenie potasem jest kluczowe dla utrzymania zasobności gleby i poprawy jakości upraw, co może przyczynić się do lepszych wyników plonowania kukurydzy.

6.7.5. Zawartość wapnia w glebie

W Czesławicach średnie wartości wapnia w glebie wynosiły od 817,3 mg Ca · kg⁻¹ (przy nawożeniu 40% w 2021 r.) do 939,7 mg Ca · kg⁻¹ (przy 30% popiołu w 2023 roku) (tab. 74). W kolejnych latach zauważono wzrost zasobności gleby w wapń, a we wszystkich latach wyższe zawartości wapnia otrzymano w obiektach przy 30% popiołu, nawożonych węglanem wapnia i przy optymalnej dawce nawożenia. Wpływ źródła wapnia, dawki nawożenia i proporcji wapnia do potasu na zawartość wapnia w glebie był statystycznie istotny i widoczny także w interakcjach.

W Krynicach zawartość wapnia w glebie była niższa niż w Czesławicach (tab. 75). W średnie wartości mieściły się w przedziale od 486,2 mg Ca · kg⁻¹ (dla nawożenia z 30% popiołu w 2021 roku) do 561,8 mg Ca · kg⁻¹ (przy 40% popiołu w 2023). Podobnie jak w Czesławicach w kolejnych latach nastąpił stopniowy wzrost zawartości wapnia. przy wyższe zasobności wapnia otrzymano w nawożeniu z 40% popiołu. Również tutaj różnice między źródłami wapnia i zawartością popiołu były istotne statystycznie, choć analiza nie wykazała udziału zmienności.

Porównując wyniki z obu miejsc można zauważyć, że gleby w Czesławicach wykazywały wyższą zawartość wapnia w porównaniu do gleb w Krynicach, niezależnie od zastosowanego nawożenia. Wpływ zawartości popiołu oraz źródła wapnia (CaCO₃ i CaSO₄) na poziom wapnia w glebie był wyraźniejszy w Czesławicach, gdzie notowano większe różnice między różnymi wariantami nawożenia. W Krynicach różnice te były mniej wyraźne, choć wzrost zawartości wapnia z upływem lat wskazuje na pozytywny efekt długoterminowego nawożenia. Zastosowane nawozy efektywnie podniosły poziom wapnia w glebie, przy czym bardziej intensywne efekty odnotowano w Krynicach przy 40% popiołu, a w Czesławicach przy niższej zawartości popiołu oraz optymalnych dawkach nawożenia.

6.7.6. Zawartość magnezu w glebie

W Czesławicach średnia zawartość magnezu w glebie we wszystkich latach badań była wyrównana i wahała się od 10,56 do 10,94 mg Mg · 100g⁻¹ (tab. 76). Nieznacznie wyższe wartości odnotowano przy 40% popiołu i przeważnie przy zastosowaniu CaCO₃ oraz we wszystkich latach przy obniżonej dawce nawożenia. Ogólnie wpływ badanych czynników nawożenia był istotny statystycznie, choć różnice między wyniki były stosunkowo niewielkie. W Krynicach zawartość magnezu w glebie była wyższa niż w Czesławicach, średnie wartości oscylowały w przedziale od 11,94 do 13,35 mg Mg · 100g⁻¹ (tab. 77). We wszystkich latach wyższe zawartości magnezu w glebie odnotowano przy nawożeniu 30% popiołem oraz niezależnie od dawki popiołu przy dodatku siarczanu wapnia w nawozach. Wpływ różnych czynników nawożenia był tutaj bardziej mniej widoczny niż w Czesławicach, co sugeruje większą wrażliwość gleby na nawożenie.

Analizując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że gleby w Krynicach charakteryzowały się niższą zawartością magnezu niż w Czesławicach, szczególnie w przypadku stosowania nawozów o wyższej zawartości popiołu. W obu lokalizacjach wyższa zawartość popiołu oraz stosowanie optymalnych proporcji wapnia i potasu przyczyniły się do wzrostu zawartości magnezu w glebie. Wpływ tych czynników był bardziej wyraźny w Krynicach, co może wynikać z różnic w składzie gleby. Zastosowane metody nawożenia w obu lokalizacjach efektywnie zwiększyły poziom magnezu w glebie, co może pozytywnie wpływać na plonowanie kukurydzy i ogólną zasobność gleb.

6.7.7. Zawartość siarki w glebie

W Czesławicach średnia zawartość siarki siarczanowej wynosiła od 1,81 do 1,95 mg S-SO₄ · 100 g⁻¹ (tab. 78). Zawartość siarki w glebie była wyższa przy stosowaniu nawozów z udziałem CaSO₄ i optymalnej dawce nawożenia. Co ciekawe, zarówno przy 30%, jak i przy 40% popiołu w nawozach zawierających siarczan wapnia zawartości siarki były zbliżone, a wyższe średnie zawartości uzyskano w obiektach z 30% popiołu we wszystkich latach. Różnice pomiędzy różnymi wariantami nawożenia były istotne statystycznie, co wskazuje na wpływ zarówno źródła wapnia, jak i stosowanej dawki nawożenia.

W Krynicach zawartość siarki w glebie była ogólnie niższa niż w Czesławicach, ale wykazywała niewielki wzrost w większości lat badań przy nawożeniu o wyższej zawartości popiołu i optymalnych proporcjach wapnia do potasu. Podobnie jak w Czesławicach z zastawianiem w mieszankach nawozowych CaSO₄ zwiększyło zasobność siarki w glebie

(tab.79). Średnie wartości siarki były zbliżone w poszczególnych latach i wahały się od 1,72 do 1,87 mg S-SO₄ · 100 g⁻¹. Różnice w osiągniętych rezultatach były statystycznie istotne, szczególnie w zakresie źródła wapnia i stosunku nawożenia, na co wskazuje udział obserwowanej zmienności.

Porównując obie lokalizacje, w obu przypadkach zastosowanie w nawozach siarczanu wapnia sprzyjało podwyższonej zawartości siarki w trzech latach prowadzonych badań. Wpływ różnych czynników, takich jak źródło wapnia oraz stosunek wapnia do potasu, był bardziej wyraźny w Czesławicach, podczas gdy w Krynicach zauważono stabilniejszy wpływ nawożenia testowanymi nawozami na poziom siarki, w porównaniu do próbek z poletek kontrolnych.

6.8. Zawartość mikroelementów i innych metali w glebie

6.8.1. Zawartość cynku w glebie

W Czesławicach średnia zawartość cynku w glebie wynosiła od 53,20 do 75,42 mg Zn· kg⁻¹ s.m., zależnie od wariantów nawożenia i roku (tab. 80). We wszystkich latach wyższe zawartości cynku w glebie odnotowano przy zastosowaniu 40% popiołu, gdzie średnia zawartość cynku z trzech lat wyniosła 74,22 mg Zn· kg⁻¹ s.m. W obiektach z 30% zawartością popiołu wyższe zawartości cynku w glebie wykazano po zastosowaniu w nawozach węglanu wapnia, z kolei przy 40% udziale popiołu przy użyciu siarczanu wapnia. Przeważnie wyższe zawartości oznaczono po zastosowaniu optymalnej dawki nawożenia. We wszystkich latach badań wpływ badanych czynników były statystycznie istotny, a udział obserwowanej zmienności dla proporcji między zawartością wapnia i potasu oraz źródła wapnia w nawozach wynosił blisko 90%.

W Krynicach zawartość cynku w glebie była niższa niż w Czesławicach (tab.81). Średnie zawartości cynku kształtowały się w przedziale od 39,31 do 42,12 mg Zn· kg⁻¹ s.m. W analizowanych latach wyższe wartości zanotowano przy 40% popiołu, natomiast przy obu dawkach popiołu wyższe zawartości cynku w glebie były przy zastosowaniu w nawozach CaCO₃. W latach 2022 i 2023 zawartość cynku w glebie wzrosła w stosunku do 2021 roku, z niewielkimi wahaniami zależnymi od stosowanych proporcji wapnia i potasu oraz źródła wapnia. Zmienność wyników była istotnie związana z rodzajem nawozu, szczególnie w zakresie zawartości popiołu i rodzaju wapnia.

Porównując wyniki z obu miejscowości, można zauważyć, że zawartość cynku w glebie była wyższa w Czesławicach, szczególnie przy nawożeniu z większą zawartością popiołu i optymalnej dawce. W Krynicach wartości cynku były bardziej stabilne, lecz niższe. Czynniki takie jak rodzaj wapnia i proporcja nawożenia miały znaczący wpływ na wyniki. Wyniki wskazują na znaczenie precyzyjnego doboru nawozów pod względem zawartości popiołu i dawki, co może korzystnie wpłynąć na zawartość cynku w glebie i wspierać jej żyzność.

6.8.2. Zawartość manganu w glebie

W Czesławicach zawartość manganu w glebie była zbliżona w poszczególnych latach badań, a średnie kształtowały się w przedziale od 270,3 do 280,6 mg Mn ·kg⁻¹ s.m. (tab.82). Wyższe wartości uzyskano przy stosowaniu optymalnej dawki nawożenia i 30% popiołu. W obiektach nawożonych mieszankami zawierającymi 40% popiołu wyższe wartości były przy zastosowaniu obniżonej dawki nawożenia. Wyniki wskazują na istotny wpływ wszystkich badanych czynników na poziom manganu w glebie, co potwierdza wysoki udział obserwowanej zmienności, szczególnie względem proporcji wapnia do potasu i interakcji między badanymi czynnikami.

W Krynicach średnie zawartości manganu w glebie były na podobnym poziomie jak w Czesławicach i wynosiły od 271,5 do 284,9 mg Mn ·kg⁻¹ s.m. (tab. 83). Najwyższe wartości odnotowano przy nawożeniu 30% popiołu, źródle wapnia CaSO₄ i proporcji wapnia do potasu 40/30, osiągając średnią z lat na poziomie 306,2 mg Mn ·kg⁻¹ s.m. W poszczególnych kombinacjach wartości były zbliżone, co sugeruje stabilność wyników przy wyższym udziale popiołu i optymalnych dawkach nawożenia. W Krynicach wpływ zawartości popiołu oraz źródła wapnia również okazał się statystycznie istotny.

Porównując obie lokalizacje, można zauważyć, że zawartość manganu była nieco wyższa w Krynicach, choć w obu miejscowościach wzrost zawartości manganu w glebie odnotowano przy niższej zawartości popiołu i przeważnie CaSO₄ jako źródło wapnia. Wyniki wskazują, że zawartość popiołu i źródło wapnia miały znaczący wpływ na akumulację manganu w glebie, co podkreśla potrzebę dostosowania nawożenia, aby efektywnie zarządzać poziomami tego mikroelementu w glebie.

6.8.3. Zawartość miedzi w glebie

W Czesławicach średnia zawartość miedzi w glebie wynosiła od 7,08 do 8,08 mg Cu·kg⁻¹ s.m., w zależności od roku badań i wariantów nawożenia (tab. 84). Przy 40% popiołu w nawozach, wyższe poziomy miedzi w glebie stwierdzono w przypadku nawozów zawierających CaCO₃, natomiast przy 30% popiołu wyższe wartości były najczęściej obserwowane przy zastosowaniu CaSO₄. W analizowanych latach wyższe wartości odnotowano przy obniżonej dawce nawozu. Czynniki takie jak dawka nawożenia oraz źródło wapnia i współdziałanie czynników miały statystycznie istotny wpływ na wyniki.

W Krynicach zawartość miedzi w glebie była wyższa niż w Czesławicach i oscylowała w zakresie od 9,49 do 11,54 mg Cu·kg⁻¹ s.m. (tab. 85). Wyższe średnie zawartości miedzi w glebie występowały przy 30% zawartości popiołu, a także niezależnie od ilości popiołu przy zastosowaniu w nawozach węgla wapnia. W Krynicach szczególnie widoczny był wpływ zawartości popiołu i źródła wapnia, co miało istotny wpływ na poziom miedzi w glebie.

Porównanie wyników z obu lokalizacji pokazuje, że zawartość miedzi w glebie była wyższa w Krynicach, szczególnie przy nawożeniu z mniejszą zawartością popiołu. Obie lokalizacje wykazały, że zawartość popiołu, rodzaj stosowanego wapnia oraz proporcja wapnia do potasu są istotnymi czynnikami wpływającymi na poziom miedzi w glebie. Wyniki sugerują, że odpowiednie zarządzanie nawożeniem może korzystnie wpływać na dostępność miedzi.

6.8.4. Zawartość żelaza w glebie

Średnie zawartości żelaza w glebie w Czesławicach wynosiły od 1425,9 do 1458,2 mg Fe · kg⁻¹ s.m. (tab.86). W analizowanych latach wyższe zawartości żelaza w glebie odnotowano przy stosowaniu nawozów z 30% popiołu, gdzie średnia wartość z trzech lat osiągnęła 1452,6 mg Fe · kg⁻¹ s.m. Przy 30% popiołu w nawozach wyższe zawartości żelaza w glebie odnotowano po zastosowaniu nawozów zawierających CaCO₃, natomiast przy 40% popiołu wyższe zawartości w przypadku nawozów z siarczanem wapnia. W 2022 i 2023 roku przy 30% udziale popiołu zawartości żelaza w glebie były nieco wyższe przy stosowaniu obniżonej dawki nawożenia (w odróżnieniu od nawozów z 40% popiołu). Wszystkie badane czynniki były statystycznie istotne, co wskazuje na ich znaczący wpływ na poziom żelaza w glebie.

W Krynicach zawartość żelaza w glebie była wyższa, w przedziale od 1556,1 do 1634,6 mg Fe · kg⁻¹ s.m. (tab.87). Podobnie jak w Czesławicach wyższe wartości zaobserwowano przy nawożeniu z 30% popiołu oraz niezależnie od dawki popiołu przy zastosowaniu CaCO₃. Węglan wapnia działał identycznie w przypadku nawozów z 40% popiołu. Zmienność wyników była wyraźnie zależna od zawartości popiołu, źródła wapnia i proporcji wapnia do potasu.

Porównując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że zawartość żelaza w glebie była ogólnie wyższa w Krynicach niż w Czesławicach, zwłaszcza przy stosowaniu nawozów z 30% popiołu. W obu lokalizacjach wyższe zawartości żelaza w glebie były związane z zastosowaniem węglanu wapnia, co sugeruje, że ten czynnik może sprzyjać akumulacji żelaza w glebie. Wyniki te podkreślają znaczenie odpowiedniego doboru nawozów oraz ich dawek w celu kontrolowania zawartości mikroelementów w glebie, co może wpływać na jakość gleby i efektywność uprawy kukurydzy.

6.8.5. Zawartość chromu w glebie

Średnia zawartość chromu w glebie w Czesławicach wahała się od 24,29 do 27,80 mg Cr · kg⁻¹ s.m. (tab.88) w zależności od zastosowanych warunków nawożenia. We wszystkich latach badań wyższe zawartości chromu odnotowano w obiektach z 30% popiołu i CaCO₃, a także przy proporcji wapnia do potasu 40/30. Na poletkach gdzie testowano nawozy z 40% udziałem popiołu wyższe zawartości chromu w glebie otrzymano przy stosowaniu CaSO₄. We wszystkich kombinacjach wyższe zawartości chromu w glebie stwierdzono przy optymalnej dawce nawożenia. Warto zauważyć, że w obiekcie kontrolnym, niezależnie od roku badań oraz zastosowanej dawki, zawartości chromu były wyższe niż w testowanych nawozach.

W Krynicach średnia zawartość chromu w glebie była zbliżona, choć nieco bardziej zróżnicowana niż w Czesławicach, z wartościami od 26,91 do 33,71 mg Cr · kg⁻¹ s.m. (tab. 89). Wyższe zawartości chromu w glebie również zaobserwowano przy nawożeniu 30% popiołem oraz źródle wapnia CaCO₃. CaCO₃ działała analogicznie także w serii z 40% popiołu. Wyniki z Krynic, podobnie jak z Czesławic, wskazują, że wpływ czynników, takich jak zawartość popiołu i źródło wapnia, a także proporcja wapnia do potasu i dawka nawożenia były istotne statystycznie, co potwierdza znaczący wpływ tych zmiennych na poziom chromu w glebie.

Analizując wyniki z obu lokalizacji, można stwierdzić, że zawartość chromu w glebach była porównywalna, z nieco wyższymi średnimi wartościami odnotowanymi w Krynicach. W obu lokalizacjach wyższe zawartości chromu w glebie były związane z zastosowaniem węgla wapnia, szczególnie przy 30% popiołu. Zmienność wyników była istotna, co potwierdza znaczenie odpowiedniego doboru nawożenia w kształtowaniu zawartości metali ciężkich w glebie. Wskazuje to na konieczność monitorowania poziomów chromu, szczególnie przy intensywniejszym nawożeniu, aby zapobiec nadmiernej akumulacji tego pierwiastka w glebie.

6.8.6. Zawartość kadmu w glebie

W przeprowadzonych badaniach zawartość kadmu w glebie była na poziomie poniżej $0,5 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, co oznacza, że mieściła się poniżej granicy wykrywalności metody. Wyniki te wskazują na bardzo niski poziom akumulacji kadmu, co sugeruje brak znaczącego wpływu upraw i stosowanych nawozów na wzrost zawartości tego pierwiastka w glebie. Utrzymanie tak niskiej zawartości kadmu jest korzystne dla środowiska glebowego oraz roślin, zapewniając ich bezpieczeństwo pod względem toksyczności kadmu. Uzyskane dane potwierdzają, że gleby w badanych lokalizacjach nie są narażone na nadmierne zanieczyszczenie kadmem, co jest ważne dla długoterminowej jakości środowiska glebowego.

6.8.7. Zawartość ołowiu w glebie

W Czesławicach średnia zawartość ołowiu w glebie wynosiła od 9,26 do 10,24 $\text{mg Pb} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ (tab.90). Wyższe zawartości ołowiu w glebie odnotowano przy optymalnej dawce nawożenia i 30% zawartości popiołu, szczególnie przy proporcji wapnia do potasu 40/30. W 2022 roku zawartość ołowiu była podobna do poprzedniego roku. Wpływ badanych czynników był istotny statystycznie, co sugeruje, że te czynniki znacząco wpływają na akumulację ołowiu w glebie.

W Krynicach zawartość ołowiu w glebie była nieco wyższa niż w Czesławicach, mieszcząc się w przedziale od 11,50 do 12,15 $\text{mg Pb} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ (tab.91). Najwyższe wartości zanotowano przy 40% udziału popiołu, CaCO_3 i proporcji wapnia do potasu 40/20 w nawozach. W 2022 roku zawartość ołowiu w glebie była wyższa niż w 2021 roku, a w 2023 roku wyniki były zbliżone. W Krynicach wpływ różnych wariantów nawożenia, szczególnie zawartości popiołu i proporcji wapnia do potasu, był istotny.

Porównując wyniki z obu miejscowości, można zauważyć, że zawartość ołowiu w glebie była nieco wyższa w Krynicach, zwłaszcza przy wyższej zawartości popiołu. W obu lokalizacjach zastosowanie węgla wapnia do mieszanek nawozowych sprzyjało wyższej akumulacji ołowiu. Wyniki sugerują, że odpowiednie dostosowanie dawek i rodzaju nawożenia może mieć znaczący wpływ na poziom ołowiu w glebie, co może być kluczowe dla zarządzania jakością gleby w długoterminowej uprawie.

6.8.8. Zawartość arsenu w glebie

Średnia zawartość arsenu w glebie w Czesławicach wahała się od 3,79 mg Ar kg^{-1} s.m. w pierwszym roku badań przy 30% popiołu do 4,41 mg Ar kg^{-1} s.m. w trzecim roku przy 40% udziale popiołu (tab. 92). Wyższe zawartości arsenu w glebie odnotowano przy optymalnej dawce nawożenia i 40% popiołu. We wszystkich latach badań zawartości arsenu w glebie w obiektach z 30% popiołu były wyższe po zastosowaniu CaCO_3 oraz proporcji wapnia do potasu 40/30, a przy 40% popiołu wzrost odnotowano przy nawozach zawierających w swoim składzie CaSO_4 i w proporcji 50/10. W każdym kolejnym roku zawartość arsenu w glebie nieznacznie wzrastała, osiągając maksymalnie 5,78 mg As $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. przy optymalnej dawce nawożenia.

W Krynicach zawartość arsenu w glebie była niższa niż w Czesławicach, ze średnimi zawartościami w przedziale od 2,02 do 2,81 mg Ar kg^{-1} s.m. (tab. 93). We wszystkich latach wyższe wartości zanotowano przy nawożeniu z 40% popiołu i podobnie jak w Czesławicach, przy 30% popiołu więcej arsenu było w glebach nawożonych mieszankami z CaCO_3 , a przy 40% popiołu przy CaSO_4 .

Wartości te wskazują, że zarówno w Czesławicach, jak i Krynicach poszczególne czynniki miały istotny wpływ na zawartość arsenu w glebie. Porównując wyniki z obu lokalizacji można zauważyć, że zawartość arsenu w glebie była wyższa w Czesławicach, szczególnie przy stosowaniu wyższej dawki nawożenia i 40% popiołu. W Krynicach zawartość arsenu w glebie była bardziej stabilna, z najwyższymi wartościami uzyskanymi przy 40% popiołu. Wyniki sugerują, że odpowiednie dostosowanie składu nawozu może wpływać na zawartość arsenu w glebie, co jest istotne dla długoterminowego zarządzania jakością gleby oraz bezpiecznej produkcji rolniczej.

6.8.9. Zawartość rtęci w glebie

Średnie zawartość rtęci w glebie w Czesławicach wynosiła od 0,016 do 0,022 mg Hg/kg s.m. (tab. 94). W analizowanych latach wartości były stosunkowo niskie, a różnice między wariantami nawożenia były niewielkie, ze średnią zawartością z trzech lat badań wynoszącą 0,018 mg Hg · kg⁻¹ s.m. przy 30% popiołu i 0,020 mg Hg · kg⁻¹ s.m. przy nawozach zawierających 40% popiołu. W 2022 i następnie w 2023 roku zauważono minimalny wzrost zawartości rtęci w glebie, zwłaszcza przy nawożeniu z 40% popiołem. W obiektach z 30% udziałem popiołu niższe zawartości rtęci odnotowano przy zastosowaniu CaSO₄, natomiast przy 40% popiołu przy użyciu CaCO₃. Najwyższe wartości rtęci otrzymano w obiektach gdzie zastosowano nawozy zawierające 40% popiołu, CaCO₃ oraz proporcję wapnia do potasu 40/20. Wpływ zastosowanej dawki nawożenia na różnice w zawartości rtęci w glebach był minimalny. Różnice między zastosowanymi wariantami były istotne we wszystkich latach.

W Krynicach zawartość rtęci w glebie była nieco niższa w stosunku do wyników z Czesławic, ze średnimi wartościami w przedziale od 0,012 do 0,016 mg Hg · kg⁻¹ s.m (tab. 95). Wyższe wartości rtęci zaobserwowano przy zastosowaniu w nawozach 40% popiołu oraz jako źródło wapni CaCO₃ we wszystkich latach. Podobnie jak w Czesławicach, wpływ zawartości popiołu, źródła wapnia i proporcji między wapniem i potasem był istotny statystycznie.

Porównując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że zawartość rtęci w glebie była porównywalna. W obu przypadkach największe znaczenie źródło wapnia, stosunek wapnia do potasu oraz zawartość popiołu, co sugeruje, że te czynniki mają istotny wpływ na akumulację rtęci w glebie. Wskazuje to na potrzebę ostrożnego doboru ilości i rodzaju nawozów, aby uniknąć nadmiernej akumulacji rtęci w glebie. W ogólnym ujęciu, wyniki sugerują, że regularne monitorowanie zawartości rtęci jest ważne, szczególnie w przypadku długoterminowego stosowania nawozów.

6.8.10. Zawartość niklu w glebie

W Czesławicach zawartość niklu w glebie wahała się od 10,78 do 12,76 mg Ni · kg⁻¹ s.m. w zależności od warunków nawożenia i roku (tab. 96). W Krynicach zawartość niklu w glebie była zbliżona, lecz nieco wyższa niż w Czesławicach, z wartościami od 14,11 do 17,44 mg Ni · kg⁻¹ s.m (tab. 97). W obu lokalizacjach i latach wyższe wartości zanotowano przy zastosowaniu 30% popiołu i węglanu wapnia oraz optymalnej dawce nawożenia.

Wpływ dawki nawożenia i zawartości popiołu oraz źródła wapnia i proporcji wapnia do potasu był istotny statystycznie, co podkreśla ich znaczenie dla zawartości niklu w glebie. Porównując wyniki z obu lokalizacji, można zauważyć, że zawartość niklu w glebie była wyższa w Krynicach, zwłaszcza przy nawożeniu 30% popiołem i optymalnej dawce. Czesławice wykazały podobne tendencje, choć wartości były bardziej stabilne. Wyniki wskazują na istotny wpływ zawartości popiołu i źródła wapnia na akumulację niklu w glebie, co sugeruje, że odpowiednie dostosowanie nawożenia może pomóc w kontrolowaniu poziomu niklu, co jest kluczowe dla zarządzania jakością gleby w długotrwałych uprawach.

7. Dyskusja wyników

7.1. Ocena efektywności nawozów na bazie popiołu

W badaniach własnych zaobserwowano korzystny wpływ zastosowanych w nawozach popiołów ze spalania biomasy na plonowanie i parametry jakościowe kukurydzy przeznaczonej na kiszonkę.

Podobnie w przeprowadzonych przez Buneviciene i in. (2021) badaniach wykazano, że wykorzystanie popiołu lotnego ma pozytywny wpływ na wzrost i rozwój roślin, takich jak kukurydza, słonecznik, rzepak, szparagi, jęczmień. Z kolei roślinami umiarkowanie tolerującymi zasolenie spowodowane nawożeniem popiołem są wyka, lucerna, len, ziemniaki, melon i dynia. Popiół lotny może jednak niekorzystnie wpływać na rozwój roślin preferujących gleby kwaśne i lekko kwaśne (Stavridou i in. 2020). Ze względu na to, że popiół zmienia kwaśny odczyn gleby na zasadowy lub obojętny, rozwój niektórych roślin może zostać ograniczony, jak to ma miejsce w przypadku krzewów iglastych, azalii, jagód goi, jagody kamczackiej, borówki czy różanecznika (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2018).

W badaniach prowadzonych w Krynicach istotny wpływ dawki popiołu na zawartość suchej masy kukurydzy zaobserwowano tylko w drugim roku badań, i było 8% wyższy przy zastosowaniu w mieszankach nawozowych 30% popiołu.

Według Wierzbowskiej i in. (2020) popiół lotny pochodzący ze spalania biomasy ma pozytywny wpływ na plonowanie gatunków traw *Festilolium* w porównaniu do traw nienawożonych. Tempo wzrostu traw było porównywalne do innych nawozów mineralnych. Popioły w swoim składzie zawierają Fe, co poprawia kondycję i barwę trawy. Wykazano, że popiół lotny zwiększył plony trawy bermudzkiej (*Cynodon dactylon*), trawy sabajskiej (*Eulaiopsis binata*), trawy mung (*Vigna unguiculata*), koniczyny białej (*Trifolium repens*), pszenicy (*Tritium aestivum*), lucerny (*Medicago sativa*) i jęczmienia (*Hordeum vulgare*), poprawiając również stan fizyczny i właściwości chemiczne gleby (Garg i in. 2005; Basu i in. 2009; Paul 2020; Usmani i in. 2019).

Basu i in. (2009) stwierdzili, że po zastosowaniu dawki popiołu wynoszącej 125 MT · ha⁻¹ na glebie o pH 6,0 rośliny takie jak lucerna, sorgo (*Sorghum bicolor*), kukurydza (*Zea mays*), proso (*Echinochloa crusgalli*), marchew (*Daucus carota*), cebula (*Allium cepa*), fasola (*Phaseolus vulgaris*), kapusta (*Brassica oleracea*), ziemniaki (*Solanum tuberosum*) i pomidory (*Lycopersicon esculentum*) wykazały wyższe poziomy As, B, Mg i Se. Zastosowanie popiołu lotnego poprawiło również plony nasion oleistych, np. sezamu (*Sesamum indicum*) lub słonecznika (*Helianthus* sp.). Zastosowanie różnych dawek popiołu

lotnego zwiększyło plon traw aromatycznych, zwłaszcza palmarosy (*Cymbopogon martini*) i citronelli (*Cymbopogon nardus*), ze względu na zwiększoną dostępność głównych składników odżywczych w glebie, niezbędnych do wzrostu i rozwoju roślin (Basu i in. 2009).

Zapałowska i in. (2017) zbadali wpływ ubocznych produktów spalania różnych biomas roślinnych na plon zbóż. Do badań wykorzystano popiół ze spalania zrębków drzewnych, zrębków drzewnych + kukurydza + słoma, zrębków drzewnych + wierzba, ziaren owsa, słomy kukurydzy oraz zrębków dębowych, odpowiednio w dawkach 3 i 6 t · ha⁻¹. W każdym przypadku zastosowanie popiołu skutkowało wzrostem plonu średnio o 3–19%, w zależności od rodzaju użytego materiału. Najlepsze efekty uzyskano w przypadku nawożenia zbóż popiołem ze spalania owsa, natomiast najmniej efektywny był popiół ze spalania mieszanki zrębków drzewnych i wierzby (Zapałowska i in. 2017; Uliasz-Bocheńczyk i in. 2018).

Przedstawiane w pracy wyniki badań bardzo dobrze wpisują się w aktualne trendy badawcze dotyczące wykorzystania odpadów przemysłowych dla celów rolniczych. Niemniej jednak nadal istnieje potrzeba doprecyzowania składu nawozów na bazie popiołów ze spalania biomasy oraz ich wpływu na plonowanie i parametry jakościowe roślin, a także właściwości gleby. Ważnym zagadnieniem jest również ustalenie wpływu nawozów zawierających popiół z biomasy na bezpieczeństwo ekologiczne gleb i produktów pochodzenia roślinnego.

W ciągu ostatnich czterech dekad globalna produkcja kukurydzy znacząco wzrosła, głównie dzięki intensywnemu stosowaniu nawozów azotowych (N). Wiele krajów stosowało nawozy N w nadmiarze, aby zwiększyć plony ziarna. Na przykład średnia dawka nawozu N używana przez rolników wynosiła ponad 300 kg ha⁻¹ (288 ± 113 kg ha⁻¹), co znacznie przewyższa optymalne dawki N określone w badaniach polowych. Na Nizinie Północnochińskiej stosowanie nawozów azotowych przekraczało 350–600 kg ha⁻¹ rocznie w celu maksymalizacji plonów. Jednak nadmierne nawożenie azotem negatywnie wpływa na uprawy, znacznie obniżając efektywność wykorzystania azotu (NUE) i prowadząc do dużych strat w wyniku wymywania azotanów (ponad 50% N trafia do środowiska) oraz zanieczyszczenia wód gruntowych (Suchy i in. 2018; McBratney, Field 2015; Wang i in. 2014; Erisman i in. 2013). Zredukowanie dawek nawozu N do poziomów „umiarkowanych” w uprawach kukurydzy może poprawić NUE, pozwolić na utrzymanie odpowiedniego poziomu plonów oraz zredukować negatywne skutki dla środowiska. Zastosowane w doświadczeniu polowym w Czesławicach obniżone o 25% nawożenie, gdzie uzyskano

wyższe zawartości azotu ogółem, potwierdza zasadność niższych dawek azotu. Konieczna jest jednak ocena w jakim stopniu te dawki odpowiadają zapotrzebowaniu roślin na azot, co pozwoli na efektywniejsze wykorzystanie zasobów i utrzymanie stosunkowo wysokich plonów (Zhang i in. 2015b; Robertson, Vitousek 2009).

Zwiększenie efektywności wykorzystania azotu można osiągnąć poprzez stosowanie odpowiednich dawek P, K, Mg, S i Zn (Boliłowa i in. 2011; Szulc 2010; Fotyma 2003). Badania Barczak i współpracowników wykazały, że nawożenie siarką prowadzi do zwiększenia zawartości azotu i siarki w ziarnie kukurydzy (Barczak i in. 2011). Zarówno w Czesławicach, jak i Krynicy przeważnie wyższe zawartości azotu, fosforu, potasu i siarki w roślinach otrzymano przy zastosowaniu nawozów zawierających w swoim składzie siarkę. Kulczycki również potwierdził wzrost zawartości siarki w roślinach (a także jej pobrania) w wyniku nawożenia siarką, jednak nie zaobserwowano jednoczesnego wzrostu zawartości azotu w tych roślinach (Kulczycki 2003). Szulc i Waligóra nie zauważyli zmian w zawartości azotu w kukurydzy w fazie 5–6 liści w odpowiedzi na nawożenie siarką i azotem, chociaż przy zwiększaniu dawek azotu rośliny pobierały go więcej (Szulc, Waligóra 2010). Barczak i współautorzy sugerują, że brak zmian w zawartości azotu w roślinach w wyniku nawożenia siarką, wskazywanych przez niektórych badaczy, może wynikać z uprawy kukurydzy na glebach z przynajmniej średnią zawartością siarki przyswajalnej, co prowadzi do braku reakcji roślin na dodatkowe nawożenie tym składnikiem (Barczak i in. 2011).

W badaniach przeprowadzonych przez Filipek-Mazur i współpracowników, zastosowanie nawozu zawierającego 26% azotu w formie azotanowej i amonowej oraz 13% siarki w formie siarczanowej skutkowało zwiększeniem zawartości azotu w ziarnie kukurydzy. Najwyższe pobranie azotu uzyskano z obiektów nawożonych tym nawozem w dawce $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Z kolei najwyższą średnią zawartość siarki stwierdzono w ziarnie kukurydzy z obiektów nawożonych tym samym nawozem, niezależnie od zastosowanej dawki azotu (Filipek-Mazur i in. 2013).

Omar i współpracownicy zauważają, że ogólnie plon ziarna kukurydzy rośnie w odpowiedzi na zastosowanie azotu, co jest ściśle związane z jakością ziarna, taką jak zawartość wilgoci, oleju, białka i skrobi (Omar i in. 2022). Jednak w badaniach Omara nie zaobserwowano istotnego związku między jakością ziarna a poziomem azotu, w przeciwieństwie do wyników uzyskanych przez Eltelib i in. (2006), gdzie azot znacząco zwiększył zawartość białka w kukurydzy pastewnej. Ostatnie badania wskazują, że wyższe poziomy azotu zwiększają zawartość białka w nasionach kukurydzy. Z drugiej strony, niskie

warunki azotu nie tylko ograniczają plon ziarna, ale także jego jakość, w tym zawartość wilgoci i białka (Hammad i in. 2011; Tsai i in. 1992).

Badania wpływu stosowania wapna, popiołu z biomasy i kompostu na plonowanie i komponenty plonu pszenicy prowadził Stankowski i in. (2014). Uzyskany w doświadczeniu średni plon pszenicy jarej odmiany Bombona wahał się w granicach od 5,93 do 6,18 Mg · ha⁻¹. Zastosowanie zróżnicowanych wariantów nawozowych nie spowodowało istotnego zróżnicowania plonu pszenicy jarej. Pewną tylko tendencję do podwyższenia plonu zaobserwowano przy łącznym zastosowaniu wszystkich czynników nawozowych. Stosunkowo wysoki plon uzyskany w kontrolnym wariacie nawozowym tłumaczy w pewnym stopniu brak istotnego wpływu zastosowanego nawożenia. Kołodziejczyk i in. (2007) realizując doświadczenie z pszenicą odmiany Bombona uzyskali plon w szerszym zakresie od 3,40 do 7,02 Mg · ha⁻¹. Autorzy podkreślają, że czynnikiem ograniczającym efektywność dużych dawek azotu jest naturalna żyzność gleb. Zmniejszający się wpływ w miarę wzrostu dawek azotu udokumentowany jest w szeregu pracach: Fotyma (1997), Wróbel (1999), López-Bellido i López-Bellido (2001). Zastosowanie preparatu Efektywne Mikroorganizmy (EM) przyczyniło się do niewielkiego wzrostu plonu, jednakże nie był on istotny. Nie stwierdzono jednoznacznego wyraźnego wpływu zastosowanego nawożenia na komponenty plonu. Największą obsadę kłosów stwierdzono po zastosowaniu nawożenia zawierającego popiół z biomasy oraz popiół w połączeniu kompostem, jednakże ta zależność nie znalazła potwierdzenia po wykonaniu obliczeń statystycznych. Frant i Bujak (2007), podkreślają, że poziom nawożenia azotem najsilniej oddziałuje na obsadę kłosów. Liczba ziaren w kłosie i masa 1000 ziaren zmieniały się w niewielkim stopniu. Zmiany miały charakter przypadkowy i nie odnotowano istotnych prawidłowości. Analogiczne wyniki uzyskali Kołodziejczyk i in. (2012). W pewnym stopniu, wyjaśnienie uzyskanych wyników może stanowić fakt, że przeprowadzone doświadczenie realizowane było w czasie jednego okresu wegetacyjnego, a zmiany odczynu gleby na skutek zastosowania nawozów odkwaszających odnotowuje się w dalszych latach badań (Gibczyńska i in. 2007).

W badaniach Shiuai i współpracowników, które trwały przez sześć lat, zbadano kluczowe cechy mikrobiologiczne gleby oraz fizykochemiczne właściwości gleb wierzchnich (0–20 cm), a także parametry plonów i wegetacji roślin. W porównaniu do zastosowania niskiej dawki azotu (LD), plon ziarna kukurydzy przy wysokiej dawce (HD) wzrósł o 10,8% w latach 2012–2017 ($P < 0,05$). Natomiast nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy dawkami N200 i N400. Wyższa dawka azotu znacząco zwiększyła

zawartość węgla biomasy mikrobiologicznej (MBC), azotu biomasy mikrobiologicznej (MBN) oraz różnorodność mikroorganizmów, w tym bakterii i grzybów. (Hou i in. 2023).

W innych badaniach Autorów (Piekarczyk i in. 2011a) zastosowanie popiołu ze słomy jęczmienia jarego w doświadczeniu wazonowym spowodowało istotny wzrost wartości pH gleby lekkiej i zawartości w niej przyswajalnych form makro- i mikroelementów. Znaczące podniesienie odczynu gleby i koncentracji przyswajalnych form składników pokarmowych wymagało aplikacji popiołu ze słomy w ilości co najmniej $8,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, ale już po zastosowaniu $1,0\text{--}2,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ich zawartość zwiększyła się o kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt procent. Wniosek ten potwierdzają wyniki analiz doświadczenia prowadzonego w Krynicach, gdzie odczyn gleby na początku wynosił pH 4,5, a po zakończeniu kształtował się w przedziale pH 6,5-6,8. Przy zastosowaniu nawozów komercyjnych nie odnotowano zmian odczynu.

Produkty uboczne spalania są doskonałym substytutem dla wysoce skutecznych nawozów mineralnych. Badania Mohammadiego i in. (2022) wykazały, że zastosowanie popiołu w dawce $60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ pozwoliło na uzyskanie plonów kukurydzy wyższych o około 10%, w porównaniu do roślin nawożonych powszechnie dostępnymi nawozami mineralnymi. Dodatkowo zastosowanie popiołu spowodowało wzrost zawartości Mg i P w ziarnie kukurydzy, przy czym najlepsze wyniki uzyskano dla najwyższych testowanych dawek popiołu, tj. 60 i $120 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. W prowadzonym doświadczeniu własnym w obu lokalizacjach polny kukurydzy utrzymywały się na zbliżonym poziomie do roślin nawożonych nawozami komercyjnymi. Jednak w przypadku zawartości magnezu, wapnia, siarki, cynku i miedzi wyższe zawartości w roślinach uzyskano obiektach z nawozami zawierającymi popiół z biomasy. Mohammadi i in. (2022) odnotowali również wzrost zawartości K, Ca i Na w ziarnie kukurydzy, w porównaniu do próby kontrolnej. Jednakże nie stwierdzono wyraźnego związku pomiędzy zawartością pierwiastków w ziarnie zbóż a zastosowaną dawką popiołu, podczas gdy zawartość Mn, Zn i Cu w zielonej masie kukurydzy była wyższa dla większych ilości zastosowanych materiałów pylistych.

Reasumując popioły ze spalania biomasy (czyli pozostałości po spalaniu drewna, słomy, odpadów roślinnych) są coraz częściej wykorzystywane jako komponent nawozów, ponieważ mogą zawierać cenne składniki mineralne, takie jak wapń, potas, magnez, fosfor oraz mikroelementy. Niemniej jednak ich zastosowanie ma zarówno liczne korzyści, jak i pewne ograniczenia, które należy brać pod uwagę, szczególnie w kontekście ochrony środowiska oraz zdrowia roślin. Popioły zawierają wapń, który działa jak środek odkwaszający, podnosząc pH gleby, co jest korzystne w przypadku gleb kwaśnych. Popioły

z biomasy są bogate w potas, który wspiera fotosyntezę i zwiększa odporność roślin na stresy biotyczne i abiotyczne. Zawartość w nich pierwiastków, takich jak magnez, miedź czy cynk, poprawia skład chemiczny gleby, korzystnie wpływając na wzrost roślin.

Regularne stosowanie popiołów może pomóc w uzupełnianiu niedoborów fosforu i potasu w glebie, co poprawia jej żyzność oraz wpływa na wyższe plonowanie roślin. Minerale z popiołów są stopniowo uwalniane do gleby, co zapewnia długotrwały efekt nawozowy.

Według Fosu-Mensah i in. (2012), zastosowanie $30 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ znacząco zwiększyło reakcję kukurydzy na zastosowanie azotu w przybrzeżnych sawannach Ghany. Mengel i in. (2006) podali, że w przypadku nie stosowania fosforu i potasu, zmiana plonu ziarna kukurydzy w efekcie zastosowanego azotu była umiarkowana. Według Onasanya i in. (2009) kukurydza skutecznie reaguje na nawożenie azotem i fosforem, co skutkuje zwiększeniem jej plonów. Autorzy zalecają dawki $120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ i $40 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$, w celu uzyskania optymalnej wydajności ziarna kukurydzy w południowej Nigerii.

W badaniach Tofy i in. (2022) występowały istotne interakcyjne oddziaływanie azotu i fosforu na fizjologię, efektywność wykorzystania składników odżywczych i reakcję plonu kukurydzy w Iburu i Zaria w strefie GS w Nigerii. Generalnie wyższe plony uzyskano przy łącznym zastosowaniu $120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ i $26 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$. Niższa efektywność wykorzystania składników odżywczych przez kukurydzę obserwowana przy najwyższej dawce stosowanego azotu wskazuje na potencjalną utratę i/lub akumulację azotu w roślinie.

W badaniach Zhanga i in. (2023) zastosowanie nawozu azotowego znacznie zwiększyło plon kukurydzy o 50,64%, emisję N_2O o 64,39% i ulatnianie się NH_3 o 69,25% (Zhang i in. 2023). Zaobserwowano „efekt huśtawki” między plonami N_2O i NH_3 w tych samych warunkach naturalnych (średnie roczne opady i parametry glebowe). Stwierdzono, że dawka azotu, termin aplikacji azotu i rodzaj nawozu są kluczowymi czynnikami wpływającymi na zmiany emisji N_2O i NH_3 . W północno-wschodnich Chinach średnie współczynniki emisji dla N_2O i NH_3 wynosiły odpowiednio 0,72% i 8,21%, a optymalna dawka azotu dla kukurydzy wynosiła $205 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, przy czym szybkość utraty azotu (N_2O i NH_3) stanowiła 8,37%. Stosowanie nawozów o powolnym/kontrolowanym uwalnianiu może skutkować szybszym wzrostem plonów i niższą emisją gazów (N_2O i NH_3).

Zhang i in. przeprowadzili 2-letnie doświadczenie polowe z odmianami Suyu29 (SY29) lub Suyu30 (SY30) przy użyciu projektu działki podzielonej (Li i in. 2020). Zastosowano trzy poziomy zagęszczenia ($6,0, 7,5$ i $9,0 \times 10^4$ roślin na ha) i trzy sposoby nawożenia (0F — brak nawozu, SF — jednorazowe zastosowanie nawozu o powolnym

uwalnianiu i CF — dwukrotne zastosowanie nawozu konwencjonalnego). Wyniki wskazały, że plony ziarna i NUE SF poniżej $7,5 \times 10^4$ roślin na ha były najwyższe zarówno w SY29, jak i SY30 w porównaniu z CF poniżej $7,5 \times 10^4$ roślin na ha. SF może poprawić pobieranie azotu oraz wpływać na translokację azotu z łodygi i liści do ziarna, co zwiększa jego efektywność wkładu w zawartość azotu w ziarnie i zapewnia wyższe NUE. Średnia częściowa produktywność azotu, jego agronomiczna efektywność, efektywność odzyskiwania azotu i efektywność absorpcji azotu SF były odpowiednio o 5,3, 9,9, 20,1 i 11,4% wyższe niż CF poniżej $7,5 \times 10^4$ roślin na ha. Zwiększając zagęszczenie roślin, uzyskano początkowe wzrosty plonu ziarna, całkowitej akumulacji azotu i NUE, a następnie stwierdzono spadek zarówno w SF, jak i CF. Wyniki te wskazują, że jednorazowe zastosowanie SF w połączeniu z odpowiednią gęstością może zwiększyć plon kukurydzy i NUE.

W Holandii prowadzono eksperymenty z różnymi odmianami kukurydzy na kiszonkę w latach 50. XX wieku uzyskując plony suchej masy w zakresie od 12,4 do 14,3 ton \cdot ha⁻¹ (Becker 1962). W latach 80. XX wieku nastąpił coroczny wzrost plonów suchej masy o 1%, co przypisywano zarówno bardziej produktywnym odmianom, jak i bardziej efektywnym metodom uprawy roślin (Sibma 1987). Średni plon suchej masy kukurydzy na kiszonkę wzrósł z około 11–12 ton \cdot ha⁻¹ w latach 80. XX wieku i na początku lat 90. XX wieku do ponad 15 ton \cdot ha⁻¹ około 2005 roku. Plon kukurydzy na kiszonkę wzrastał rocznie o 0,9% na glebach piaszczystych i o 0,6% na glebach gliniastych w okresie 2000–2015 (Velthof i in. 2017).

Nawozy azotowe zwiększają zawartość białka w kukurydzy, co wpływa korzystnie na jakość kiszonki. Nadmierna ilość azotu może jednak prowadzić do zbyt wysokiej zawartości azotanów w kiszonce, co może być niebezpieczne dla zwierząt. Fosfor i potas wpływają na lepszy rozwój korzeni oraz poprawiają efektywność fotosyntezy, co prowadzi do wyższej zawartości skrobi w kiszonce. Fosfor wspomaga także rozwój kolb, które są głównym źródłem skrobi, istotnej dla wartości energetycznej kiszonki. Z kolei wapń i magnez są ważne dla stabilności struktury roślin oraz jakości plonu. Wpływają na lepszą strawność włókna w kiszonce oraz na poprawę parametrów zdrowotnych roślin, co z kolei przekłada się na wyższą wydajność kiszonki (Jamroz i in. 2001).

Zawartość N w kukurydzy kiszonkowej znacznie zmniejszyła się z ponad 13 g N \cdot kg⁻¹ s.m. w latach 80. i 90. XX wieku do 12–13 g N \cdot kg⁻¹ s.m. w okresie 2000–2012 i 10–11 g \cdot kg⁻¹ s.m. w okresie po 2012 roku. Zawartość fosforu spadła z około 2,5 g P \cdot kg⁻¹ s.m. pod koniec lat 80 XX wieku do około 2,0 g P \cdot kg⁻¹ s.m. w ostatnich latach (Van Bruggen,

Gosselink 2018). To zmniejszenie zawartości azotu i fosforu jest prawdopodobnie związane z mniejszymi stosowanymi dawkami obornika i nawozów, ze względu na politykę zarządzania składnikami odżywczymi, a także ze wzrostem plonu, dzięki któremu azot i fosfor w roślinach ulegają rozcieńczeniu (Ruijter i in. 2020). W badaniach własny zawartość azotu w kukurydzy kształtowała się na poziomie około $10 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w doświadczeniu w Czesławicach, natomiast w Krynicach na poziomie około $11 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. Zawartość fosforu w Czesławicach wynosiła średnio $1,8 \text{ g P} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m i nieco mniej w Krynicach ($1,7 \text{ g P} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m).

Prawidłowe nawożenie zwiększa plon kukurydzy, zarówno pod względem ilości świeżej masy, jak i zawartości skrobi. Wysoka zawartość skrobi, będąca wynikiem właściwego nawożenia, wpływa na lepszą fermentację kiszonki i jej wyższą wartość energetyczną.

W przeprowadzonych doświadczeniach w obu lokalizacjach w większości przypadków różnice w nawożeniu nawozami zawierającymi popiół z biomasy w porównaniu do nawożenia nawozami komercyjnymi były niewielkie, przeważnie wypadały na korzyść testowanych mieszanek. Tym samym badania własne dowodzą, że stosowanie popiołów w nawozach jest nie tylko tak samo skuteczne jak klasyczne nawożenie, ale może także dać lepsze od niego rezultaty.

7.2. Analiza ryzyka związanego z zawartością metali ciężkich

Wyniki badań zawartości metali ciężkich w roślinach i glebach, zarówno w doświadczeniu polowym w Czesławicach, jak i w Krynicach potwierdzają bezpieczeństwo ekologiczne testowanych mieszanek nawozowych. Zaobserwowano wprawdzie tendencje wzrostów w badaniach rtęci, arsenu, ołowiu i kadmu, jednak w żadnym przypadku wyniki analizy nie przekroczyły dopuszczalnych zawartości zanieczyszczeń zarówno w roślinie jak i glebie. Wskazuje to jedynie na konieczność monitorowania poziomu metali ciężkich, aby nie dopuścić akumulacji w glebach, a następnie w roślinach.

7.3. Wnioski praktyczne dla rolnictwa

W ramach wniosków praktycznych należy stwierdzić, że:

- Nadmierne stosowanie nawozów azotowych prowadzi do obniżenia efektywności ich wykorzystania i zanieczyszczenia środowiska. Rolnicy powinni skupić się na dostosowywaniu dawek nawozów N do rzeczywistych potrzeb roślin, co pozwoli na zwiększenie efektywności wykorzystania azotu (NUE) oraz utrzymanie zadowalających plonów.
- Użycie nawozów zawierających nie tylko azot, ale również inne składniki, takie jak siarka, fosfor, potas, magnez i cynk, może pozytywnie wpływać na wzrost plonów.
- W analizowanych przypadkach badań dotyczących obecności metali ciężkich w roślinach i glebie, wyniki wskazują, że pola doświadczalne mają korzystniejsze wyniki w porównaniu do pola kontrolnego. W związku z tym można stwierdzić, że nawozy zawierające popiół są równie bezpieczne jak tradycyjne nawozy, a w niektórych sytuacjach mogą być nawet bezpieczniejsze.
- W każdym przypadku, w którym badania ujawniły statystycznie istotne różnice w zawartości mikro- i makroelementów w roślinach, kiszonkach oraz glebie, wyniki były korzystniejsze w obiektach nawożonych popiołem. W związku z tym, badania własne wskazują, że stosowanie popiołów w nawozach jest nie tylko równie skuteczne jak tradycyjne nawożenie, ale może także przynieść lepsze efekty.

8. Podsumowanie i wnioski

W badaniach nad uprawą kukurydzy przeprowadzonych w latach 2021-2023 stwierdzono, że zawartość popiołu w nawozie, źródło wapnia oraz proporcje wapnia do potasu miały istotny wpływ na plon kukurydzy oraz akumulację niektórych pierwiastków i metali w roślinie.

Z podsumowania wyników badań polowych nad wpływem nawozów zawierających popiół z biomasy na plonowanie i parametry jakościowe kukurydzy wynika, że:

- Zwiększenie zawartości popiołu w nawozie nie wpłynęło istotnie na plony kukurydzy w Czesławicach, natomiast w Krynicach w drugim roku wyższe plony uzyskano przy 30% popiołu.
- Wysokość roślin w Krynicach w 2021 była porównywalna z tą z Czesławic. Najwyższe wartości odnotowano przy stosowaniu nawozów z 40% popiołu przy optymalnej dawce.
- Niewielkie różnice między analizowanymi wariantami w większości lat wskazują, że stosunek masy zielonej do masy kolb kukurydzy wykazywał niską wrażliwość na zmiany wynikające z nawożenia i warunków pogodowych.
- W wynikach ilości kolb i rzędów ziarniaków w kukurydzy nie zaobserwowano istotnych różnic w Czesławicach, natomiast w Krynicach we wszystkich latach więcej rzędów ziarniaków w kolbach uzyskano przy zastosowaniu 40% popiołu w mieszankach nawozowych.
- Zwiększenie zawartości popiołu w nawozie w Czesławicach ograniczyło zawartość azotu ogółem w kukurydzy w latach 2021–2022, ale w 2023 roku odnotowano odwrotną zależność. We wszystkich latach na wzrost zawartości azotu w kukurydzy wpływ miała optymalna dawka nawożenia. W Krynicach nawożenie 40% popiołem zwiększyło zawartość azotu w kukurydzy w 2021 i 2023 roku.
- Wpływ na zawartość fosforu w kukurydzy był zróżnicowany w Czesławicach oraz w Krynicach. W obu lokalizacjach średnia zawartość fosforu z lat była nieco wyższa przy 30% udziale popiołu.
- Wzrost zawartości potasu w kukurydzy w obu lokalizacjach przeważnie związany był z 40% udziałem popiołu w nawozach, a w Czesławicach również z obniżonym

- o 25% nawożeniem. Proporcje wapnia do potasu w nawozach były czynnikiem wpływającym na zawartość potasu w kukurydzy w obu lokalizacjach.
- W obu miejscowościach zawartość magnezu w kukurydzy w 2022 roku była niższa w porównaniu do 2021 roku, w 2023 roku zawartości magnezu ponownie wzrosły, najczęściej przy nawożeniu zawierającym 40% popiołu i CaSO_4 , co sugeruje korzystny wpływ tej kombinacji na dostępność magnezu.
 - W obu lokalizacjach, zawartość popiołu w nawozie (30% i 40%) miała ograniczony wpływ na zawartość wapnia w kukurydzy. Wpływ źródła wapnia i proporcji wapnia do potasu były bardziej zauważalne w Czesławicach niż w Krynicach, wyższe wartości przy 30% popiołu wystąpiły po zastosowaniu CaCO_3 , a przy 40% popiołu przy CaSO_4 .
 - Nie wykazano istotnych różnic w zawartości siarki w kukurydzy w obu lokalizacjach.
 - W Czesławicach zawartość sodu w kukurydzy były nieistotne statystycznie, natomiast w Krynicach wyższe wartości przeważnie były przy 30% popiołu i siarczanie wapnia.
 - Wyższe średnie zawartości żelaza, w kukurydzy otrzymano przy 40% i CaSO_4 w Czesławicach, z kolei w Krynicach przy 40% popiołu i CaCO_3 .
 - W obu lokalizacjach najniższe wartości cynku w kukurydzy odnotowano w 2021 roku, ostatecznie średnie z lat były na zbliżonym poziomie i nie różniły się istotnie.
 - W Czesławicach wyższy poziom manganu w kukurydzy uzyskano przy 40% popiołu, natomiast w Krynicach przy 30%. Istotne różnice odnotowano w drugim roku badań w obu lokalizacjach i w trzecim roku w Krynicach. W Krynicach CaCO_3 z 30% popiołu i CaSO_4 z 40% popiołu zwiększały zawartość manganu, a proporcje wapnia do potasu miały wpływ na jego zawartość tylko w Krynicach.
 - Zawartość miedzi w kukurydzy była zbliżona w obu lokalizacjach. Wyższe poziomy miedzi w kukurydzy obserwowano przy 40% udziale popiołu, szczególnie po zastosowaniu CaCO_3 w Czesławicach oraz CaSO_4 w Krynicach. W Czesławicach różnice te były istotne statystycznie w pierwszym roku badań, a w Krynicach w drugim i trzecim roku.
 - Badane czynniki nie wpływały istotnie na zawartość kadmu w kukurydzy w badanych lokalizacjach. Różnice między średnimi zawartościami kadmu były niewielkie, a poziom tego metalu pozostawał stabilny, niezależnie od dawki nawożenia czy warunków badań. W żadnym z przypadków zawartość kadmu nie

przekroczyła dopuszczalnych norm, co sugeruje, że zastosowane metody nawożenia są bezpieczne pod względem akumulacji kadmu w roślinach.

- Zawartość ołowiu w kukurydzy była stabilna i nie wykazała istotnych różnic. Zarówno w Czesławicach, jak i Krynicach, zawartości ołowiu były porównywalne, a ich poziom nie przekraczał norm bezpiecznych dla upraw. Zastosowane metody nawożenia nie wpłynęły znacząco na akumulację ołowiu, co świadczy o ich odpowiedniej kontroli środowiskowej.
- Zawartość arsenu w kukurydzy była wyższa w Krynicach, szczególnie w pierwszym roku badań. W obu lokalizacjach większe zawartości arsenu w kukurydzy obserwowano przy stosowaniu niższych dawek nawożenia. W długoterminowej uprawie kukurydzy konieczne jest monitorowanie poziomu arsenu, zwłaszcza przy zmiennych dawkach nawożenia, aby uniknąć nadmiernej akumulacji tego pierwiastka w roślinach.
- W obu lokalizacjach zawartość rtęci w kukurydzy była stabilna i generalnie niska, co świadczy o tym, że zastosowane metody nawożenia nie wpływały znacząco na akumulację rtęci w roślinach. Wartości te nie przekraczały norm bezpieczeństwa, co wskazuje na brak zagrożeń związanych z gromadzeniem się rtęci w kukurydzy w tych warunkach uprawy. Wzrosty zawartości rtęci w niektórych próbach w 2022 roku mogły być spowodowane czynnikami zewnętrznymi, ale nie miały trwałego wpływu na wyniki w kolejnych latach. Badane nawozy można uznać za bezpieczne pod względem wpływu na poziom rtęci w roślinach.

Podsumowanie analizy kiszzonek

- Zawartość suchej masy w kiszonce w obu miejscowościach była zbliżona. W Czesławicach zawartość popiołu nie wpływała istotnie na wyniki. W obu lokalizacjach źródło wapnia miały istotny wpływ na wyniki, choć różnice między nimi były niewielkie. Efektywne zarządzanie nawożeniem pozwalało na uzyskanie wysokiej jakości kiszonki, co jest kluczowe dla zapewnienia odpowiedniego poziomu suchej masy, istotnego dla przechowywania i wartości odżywczej paszy.
- Niezależnie od lokalizacji, można stwierdzić, że zawartość włókna w kiszonce z kukurydzy była wyższa w Czesławicach, szczególnie przy stosowaniu obniżonej dawki nawożenia i wyższej zawartości popiołu. W Krynicach zmienność wyników była większa, co może wynikać z różnic w składzie gleby i jej reakcji na nawożenie.

W obu lokalizacjach czynniki takie jak zawartość popiołu i rodzaj stosowanego nawozu miały znaczący wpływ na poziom włókna w kiszonce kukurydzy. Wyniki te sugerują, że dostosowanie dawek nawożenia i składników odżywczych jest kluczowe dla uzyskania odpowiedniej jakości kiszonki, co wpływa na wartość paszy dla zwierząt.

- Zawartość azotu ogółem w kiszonce z kukurydzy była zbliżona, z wyższymi wartościami w Krynicach, szczególnie w 2022 roku. W obu przypadkach wyższa zawartość popiołu i optymalne dawki nawożenia sprzyjały zwiększonej zawartości azotu. Różnice między wariantami nawożenia były istotne statystycznie, co wskazuje na konieczność precyzyjnego doboru nawozów w celu osiągnięcia optymalnej jakości paszy.
- Zawartość fosforu w kiszonce z kukurydzy była wyższa w Czesławicach, szczególnie w pierwszym roku badań, gdy stosowano optymalną dawkę nawożenia. W Krynicach zawartości fosforu w kiszonce z kukurydzy były bardziej stabilne, co może świadczyć o mniejszej podatności gleb na zmienne warunki nawożenia. W obu przypadkach wyższa zawartość popiołu w nawozach nie zawsze przekładała się na wyższe zawartości fosforu w kiszonce, co wskazuje na złożoną interakcję między nawożeniem a przyswajalnością fosforu przez rośliny.
- Zawartość potasu w kiszonce była podobna w obu lokalizacjach, wyższa przy obniżonej dawce nawożenia i większej zawartości popiołu, zwłaszcza w 2023 roku. Wpływ nawożenia był bardziej widoczny w Czesławicach. Wyniki wskazują, że odpowiednie zarządzanie nawożeniem potasem stabilizuje jego poziom w kiszonce, co korzystnie wpływa na jakość paszy.
- Zawartość magnezu w kiszonce była wyższa w Krynicach, zwłaszcza w latach 2021 i 2023, co może wynikać z lepszej retencji magnezu. W obu lokalizacjach większa ilość popiołu i obniżone dawki nawożenia sprzyjały wyższemu poziomowi magnezu w kiszonce, przy czym w Czesławicach różnice były bardziej widoczne. Wyniki podkreślają potrzebę dostosowania nawożenia do lokalnych warunków dla jakości paszy.
- Zawartość wapnia w kiszonce była wyższa w Krynicach, szczególnie przy podwyższonej zawartości popiołu. W obu lokalizacjach obniżona dawka nawożenia i siarczan wapnia sprzyjały większej dostępności wapnia. Choć różnice między wariantami były niewielkie, zastosowane nawożenie

zapewniło stabilne poziomy wapnia w kiszonce, co jest istotne dla jakości paszy.

Podsumowanie analizy gleby

- W Krynicach zawartość azotu ogólnego była niższa niż w Czesławicach. Wpływ czynników był mniej wyraźny i widoczny dopiero w trzecim roku badań. Zawartość azotu była wyższa w Czesławicach, szczególnie przy obniżonej dawce nawożenia, 30% popiołu i siarczanu wapnia.
- Zawartość azotu mineralnego w glebie była wyższa w Krynicach, szczególnie w 2021 roku, przy optymalnych dawkach nawożenia. W Czesławicach większa zawartość popiołu i obniżone dawki nawożenia przeważnie zwiększały akumulację N_{min}, co podkreśla znaczenie dostosowania dawek dla żyzności gleby i efektywności uprawy kukurydzy.
- Gleby w Czesławicach miały wyższą zawartość fosforu niż w Krynicach, niezależnie od nawożenia. Wyższy poziom fosforu w Czesławicach wiązał się z nawozami zawierającymi 30% popiołu i CaSO₄, natomiast w Krynicach z 40% popiołu i CaCO₃. Metody nawożenia skutecznie podniosły poziom fosforu w glebie.
- Zawartość potasu w glebie była wyższa w Czesławicach, zwłaszcza przy niższych dawkach nawożenia i CaSO₄, a w Krynicach większy wpływ miała zawartość popiołu i proporcje wapnia do potasu.
- Gleby w Krynicach miały wyższą zawartość magnezu niż w Czesławicach, zwłaszcza przy mniejszej ilości popiołu. Wyższy udział popiołu i odpowiednie proporcje Ca zwiększały zawartość magnezu w obu lokalizacjach, szczególnie w Krynicach, co poprawiało jakość gleby.
- Gleby w Czesławicach charakteryzowały się wyższą zawartością wapnia niż w Krynicach, niezależnie od nawożenia. Wpływ popiołu i źródła wapnia był wyraźniejszy w Czesławicach, gdzie różnice między wariantami nawożenia były większe. W Krynicach wzrost wapnia wskazuje na pozytywny efekt długoterminowy.
- W Czesławicach odnotowano wyższą zawartość siarki niż w Krynicach, zwłaszcza przy większej zawartości popiołu i optymalnych dawkach nawożenia. W Czesławicach bardziej wpływały też źródło wapnia i stosunek wapnia do potasu niż w Krynicach.

- Zawartość cynku w glebie była wyższa w Czesławicach, zwłaszcza przy większej ilości popiołu i optymalnej dawce. W Krynicach poziomy cynku były niższe, lecz stabilniejsze. Rodzaj wapnia i dawka nawożenia miały znaczący wpływ, podkreślając potrzebę precyzyjnego doboru nawozów dla zwiększenia zawartości cynku i żyzności gleby.
- Zawartość manganu w glebie była nieco wyższa w Krynicach, przy czym w obu lokalizacjach wzrost akumulacji manganu notowano przy niższej zawartości popiołu i głównie CaSO_4 jako źródle wapnia. Wyniki podkreślają znaczący wpływ popiołu i źródła wapnia na poziom manganu oraz potrzebę dostosowania nawożenia.
- Zawartość miedzi w glebie była wyższa w Krynicach, szczególnie przy niższej zawartości popiołu. Popiół, rodzaj wapnia i proporcja wapnia do potasu znacząco wpływały na poziom miedzi, co wskazuje na korzyści z precyzyjnego zarządzania nawożeniem.
- Zawartość żelaza w glebie była wyższa w Krynicach niż w Czesławicach, szczególnie przy 30% popiołu. W obu lokalizacjach węglan wapnia sprzyjał akumulacji żelaza, co podkreśla znaczenie doboru nawozów i ich dawek dla jakości gleby i efektywności uprawy kukurydzy.
- Zawartość chromu w glebie była podobna w obu lokalizacjach, nieco wyższa w Krynicach, zwłaszcza przy węglanie wapnia i 30% popiołu. Wyniki podkreślają znaczenie doboru nawożenia dla kontroli metali ciężkich, sugerując potrzebę monitorowania chromu przy intensywnym nawożeniu.
- Zawartość kadmu w glebie była poniżej $0,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m., co wskazuje na brak akumulacji tego metalu. Niski poziom kadmu jest korzystny dla gleby i roślin, zapewniając ich bezpieczeństwo i potwierdzając brak zanieczyszczenia w badanych lokalizacjach.
- Zawartość ołowiu w glebie była nieco wyższa w Krynicach, szczególnie przy większej ilości popiołu. Węglan wapnia sprzyjał wyższej akumulacji ołowiu w obu lokalizacjach, co podkreśla znaczenie odpowiedniego dostosowania nawożenia dla jakości gleby.
- Czynniki w obu lokalizacjach istotnie wpływały na zawartość arsenu w glebie. Była ona wyższa w Czesławicach, zwłaszcza przy większej dawce nawożenia i 40% popiołu, podczas gdy w Krynicach poziom arsenu był stabilniejszy. Wyniki podkreślają znaczenie dostosowania nawożenia dla jakości gleby i bezpiecznej produkcji rolnej.

- Zawartość rtęci w glebie była podobna w obu lokalizacjach. Źródło wapnia, zawartość wapnia i potasu oraz zawartość popiołu miały największy wpływ na jej akumulację, co wskazuje na potrzebę ostrożnego doboru nawozów, by uniknąć nadmiaru rtęci. Wyniki podkreślają znaczenie monitorowania rtęci przy długotrwałym nawożeniu.
- W żadnym przypadku wyniki analizy gleby nie przekroczyły dopuszczalnych zawartości mikroelementów zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska Dz.U z 2016r. Poz. 1395

Wnioski

Nawozy z 30% zawartością popiołu i źródłem wapnia w formie CaCO_3 sprzyjały wyższym poziomom azotu ogółem, fosforu i wapnia oraz sodu i żelaza, z kolei niższym zawartościom potasu, magnezu, cynku, manganu i miedzi w roślinach, co wpłynęło pozytywnie na plonowanie kukurydzy. W Czesławicach dodatkowo analizowano wpływ obniżonej dawki nawożenia, co pozwoliło wykazać, że w niektórych przypadkach mniejsze dawki również umożliwiają osiąganie zadowalających wyników, jednocześnie ograniczając potencjalne ryzyko zanieczyszczenia gleby.

W przypadku kiszonki z kukurydzy zawartość popiołu i rodzaj źródła wapnia miały istotne znaczenie dla składu mineralnego materiału kiszonkowego. Warianty nawożenia z 40% popiołu wykazały lepsze wyniki pod względem zawartości azotu, wapnia i magnezu w kiszonce, co może korzystnie wpływać na jakość pokarmową kiszonki dla zwierząt. W lokalizacji Krynice zawartość mikroelementów w kiszonce była bardziej wyrównana w porównaniu do Czesławic, co może świadczyć o stabilnych warunkach glebowych przy wyższym udziale popiołu w nawozie.

Analiza gleby wskazuje na wyraźne różnice zależne od lokalizacji i wariantów nawożenia. Gleby nawożone popiołem wykazały wzrost zawartości makro- i mikroelementów, szczególnie cynku, manganu oraz miedzi, które są kluczowe dla żyzności gleby i jej właściwości sorpcyjnych. W Czesławicach wyższa dawka nawożenia przyczyniła się do większego wzbogacenia gleby w metale, jednakże wariant z obniżoną dawką nawożenia również okazał się efektywny. Zastosowanie popiołu z biomasy, zwłaszcza w wyższej zawartości, wpłynęło korzystnie na właściwości gleby, prawdopodobnie na poprawę struktury

i pojemności sorpcyjnej, co sprzyjało retencji składników odżywczych. Powyższe wyniki wskazują na istotny wpływ wyższego udziału popiołu na zawartość wybranych pierwiastków w glebie, a uzyskane dane mogą być przydatne do dalszych analiz i optymalizacji nawożenia, uwzględniających odpowiednie proporcje składników odżywczych i ich wpływ na żyzność gleby.

Po przeprowadzeniu badań własnych należy stwierdzić, że:

- Popiół ze spalania biomasy ma potencjał jako surowiec do produkcji nawozów wieloskładnikowych. Jego stosowanie może przyczynić się do poprawy efektywności nawożenia oraz wzrostu plonów roślin paszowych.
- Analiza obecności metali ciężkich w glebie oraz roślinach jest bardzo ważna; nawozy oparte na popiele są bezpieczne dla środowiska. Wyniki badań sugerują, że nawozy te mogą być równie, a w niektórych przypadkach nawet bardziej, bezpieczne niż tradycyjne nawozy, co wspiera ich zastosowanie w rolnictwie.
- Nadmierne stosowanie nawozów azotowych prowadzi do negatywnych skutków dla środowiska. Dlatego zaleca się dostosowanie dawek nawozów azotowych do rzeczywistych potrzeb roślin, co może zwiększyć efektywność ich wykorzystania i zredukować zanieczyszczenie.
- Badania wykazały, że w przypadkach, gdzie zauważono istotne różnice w zawartości mikro- i makroelementów, pola doświadczalne, stosujące popiół, osiągały lepsze wyniki w porównaniu do pola kontrolnego. To potwierdza, że nawozy oparte na popiele są skuteczne i mogą przynieść lepsze efekty w porównaniu do tradycyjnych metod nawożenia.
- Badania wskazują, że popiół ze spalania biomasy może być wartościowym i bezpiecznym składnikiem nawozów, wspierającym zrównoważony rozwój w produkcji rolnej

9. Bibliografia

- Åbo Akademi University. Chemical Fractionation Database. Available online: <https://web.abo.fi/fak/tkf/ook/bransle> (accessed on 12 April 2021).
- Alderete, N. M., Joseph, A. M., Van den Heede, P., Matthys, S., & De Belie, N. (2021). Effective and sustainable use of municipal solid waste incineration bottom ash in concrete regarding strength and durability. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105356.
- Alinnor, I. J. (2017). Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by fly ash. *Fuel*, 86(5–6), 853–857.
- Atkins, A., Bignal, K. L., Zhou, J. L., & Cazier, F. (2010). Profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls from the combustion of biomass pellets. *Chemosphere*, 78, 1385–1392.
- Aziz, T., Maqsood, M. A., Kanwal, S., et al. (2015). Fertilizers and environment: Issues and challenges. In *Crop Production and Global Environmental Issues* (pp. 575–598).
- Barbu, C. H., Pavel, P. B., Moise, C. M., Sand, C., Pop, M. R., & Ignat, E. G. (2012). The possibility of using wood ash as a neutralizing agent for acid mine drainage. *Energy Environmental and Structural Engineering Series (Advances in Environment, Ecosystems and Sustainable Tourism)*, 11, 187–190.
- Barczak, B., Murawska, B., & Szychaj-Fabisiak, E. (2011). Zawartość siarki i azotu w ziarnie kukurydzy w zależności od typu gleby i zastosowanego nawożenia. *Fragmenta Agronomica*, 28(1), 7–14.
- Barišić, I., Netinger Grubeša, I., Hackenberger, D. K., Palijan, G., Glavić, S., & Trkmić, M. (2022). Multidisciplinary approach to agricultural biomass ash usage for earthworks in road construction. *Materials*, 15, 4529.
- Basu, M., Mahapatra, S. C., & Bhadoria, P. B. S. (2006). Exploiting fly ash as soil ameliorant to improve productivity of Sabai grass (*Eulaliopsis binata* (Retz.) C. E. Hubb.) under acid lateritic soil of India. *Asian Journal of Plant Sciences*, 5, 1027–1030.
- Basu, M., Pande, M., Bhadoria, P. B. S., & Mahapatra, S. C. (2009). Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. *Progress in Natural Science*, 19, 1173–1186.
- Becker, W. R. (1962). *De Maisteelt in praktijk*. Publication No. 19. Proefstation voor de Akker-en Weidebouw.

- Belviso, C. (2018). State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass: A focus on zeolite synthesis processes and issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 65, 109–135.
- Bernardi, A. C., Souza, G., Polidoro, J. C., Paiva, P. R. P., & Monte, M. B. (2022). Yield, quality components, and nitrogen levels of silage corn fertilized with urea and zeolite. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(11), 1266–1275.
- Bertato, V. (2019). Digestate and compost as fertilizers: Risk assessment and risk management options. In Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited. (p. 463). Retrieved from https://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/pdf/40039%20Digestate%20and%20Compost%20RMOA%20-%20Final%20report%20i2_20190208.pdf
- Bhaskara Rao, B., & Kumar, V. (2019). Use of fly ash in mining sector. In *Waste Valorisation and Recycling* (pp. 167–178). Springer.
- Bian, Y., Gu, X., Sun, D., Wang, Y., Yin, Z., Deng, D., et al. (2015). Mapping dynamic QTL of stalk sugar content at different growth stages in maize. *Euphytica*, 205, 85–94.
- Boligłowa, E., Filipek-Mazur, B., & Lepiarczyk, A. (2011). *Kukurydza – zboże z wigorem*. Wyd. Azoty-Tarnów.
- Braghiroli, F. L., Calugaru, I. L., Gonzalez-Merchan, C., Neculita, C. M., Bouafif, H., & Koubaa, A. (2020). Efficiency of eight modified materials for As(V) removal from synthetic and real mine effluents. *Minerals Engineering*, 151, Article 106310.
- Buentello-Montoya, D. A., Zhang, X., & Li, J. (2019). The use of gasification solid products as catalysts for tar reforming. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 399–412.
- Buneviciene, K., Drapanauskaite, D., Mazeika, R., Tilvikiene, V., & Baltrusaitis, J. (2021). Granulated biofuel ash as a sustainable source of plant nutrients. *Waste Management & Research*, 39, 806–817.
- Burg, P., Ludín, D., Rutkowski, K., Krakowiak-Bal, A., Trávníček, P., Zemánek, P., Turan, J., & Višacki, V. (2016). Calorific evaluation and energy potential of grape pomace. *International Agrophysics*, 30, 261–265.
- Cabrera, M., Rosales, J., Ayuso, J., Estaire, J., & Agrela, F. (2018). Feasibility of using olive biomass bottom ash in the sub-bases of roads and rural paths. *Construction and Building Materials*, 181, 266–275.

- Cai, J. (2018). Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility. *Soil & Tillage Research*, 189, 168. <https://doi.org/10.1016/j.str.2018.03.016>
- Çakmak, I., & Kutman, U. Á. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review. *European Journal of Soil Science*, 69, 172–180.
- Calugaru, I. L., Neculita, C. M., Genty, T., & Zagury, G. J. (2018). Metals and metalloids treatment in contaminated neutral effluents using modified materials. *Journal of Environmental Management*, 212, 142–159.
- Calugaru, I. L., Neculita, C. M., Genty, T., Bussiere, B., & Potvin, R. (2017). Removal of Ni and Zn in contaminated neutral drainage by raw and modified wood ash. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 52(2), 117–126.
- Camberato, J., Gagnon, B., Angers, D., Chantigny, M., & Pan, W. (2006). Pulp and paper mill by-products as soil amendments and plant nutrient sources. *Canadian Journal of Soil Science*, 86(5), 641–653.
- Canizares, G., Goncalves, H. C., Costa, C., Rodrigues, L., Menezes, J. J. L., & Gomes, H. F. B. (2011). Use of high moisture corn silage replacing dry corn on intake, apparent digestibility, production and composition of milk of dairy goats. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40, 860–865.
- Central Statistical Office. (2022). *Statistical Yearbook of Agriculture*.
- Chakraborty, R., Das, S., & Bhattacharjee, S. K. (2015). Optimization of biodiesel production from Indian mustard oil by biological tri-calcium phosphate catalyst derived from turkey bone ash. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 455–463.
- Chang, Y. L., Liu, J. M., Li, Y. H., Sun, B. H., Zhang, S. L., & Yang, X. Y. (2014). Investigation and evaluation of nutrient input under winter wheat and summer maize rotation system in Guanzhong Plain of Shaanxi Province. *Journal Northwest A & F University*, 42, 51–61.
- Cherian, C., & Siddiqua, S. (2019). Pulp and paper mill fly ash: A review. *Sustainability*, 11(16), 4394.
- Chocyk, D., Gładyszewska, B., Ciupak, A., Oniszczyk, T., Mościcki, L., & Rejak, A. (2015). Influence of water addition on mechanical properties of thermoplastic starch foils. *International Agrophysics*, 29, 267–273.

- Chojnacka, K., Mikula, K., Skrzypczak, D., et al. (2022). Practical aspects of biowastes conversion to fertilizers. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/S13399-022-02477-2/TABLES/5>
- Chojnacka, K., Moustakas, K., & Witek-Krowiak, A. (2020). Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. *Bioresource Technology*, 295, 122223. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122223>
- Chojnacka, K., Skrzypczak, D., Mikula, K., et al. (2021). Progress in sustainable technologies of leather wastes valorization as solutions for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127902. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127902>
- Ciesielczuk, T., Rosik-Dulewska, C., & Kochanowska, K. (2014). The influence of biomass ash on the migration of heavy metals in the flooded soil profile—Model experiment. *Archives of Environmental Protection*, 40, 3–15.
- Correa, C. E. S., Shaver, R. D., Pereira, M. N., Lauer, J. G., & Kohn, K. (2002). Relationship between corn vitreousness and ruminal in situ starch degradability. *Journal of Dairy Science*, 85, 3008–3012.
- Coutinho, N. C., Paes, H. R., & Holanda, J. N. F. (2022). Effect of firewood ash waste on the densification behavior of electrical siliceous porcelain formulations. *Silicon*, 14, 10591–10601.
- Cruz, N. C., Rodrigues, S. M., Carvalho, L., Duarte, A. C., Pereira, E., Römken, P. F. A. M., & Tarelho, L. A. C. (2017). Ashes from fluidized bed combustion of residual forest biomass: Recycling to soil as a viable management option. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 14770–14781.
- Cruz, N., Avellan, A., Ruivo, L., Silva, F. C., Römken, P. F. A. M., Tarelho, L. A. C., & Rodrigues, S. M. (2023). Biomass ash-based soil improvers: Impact of formulation and stabilization conditions on materials' properties. *Journal of Cleaner Production*, 391, 136049. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136049>
- Cuenca, J., Rodríguez, J., Martín-Morales, M., Sánchez-Roldán, Z., & Zamorano, M. (2013). Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 702–709.
- Cui, Z. L., Zhang, F. S., Mi, G. H., Chen, F. J., Li, F., Chen, X. P., Li, J. L., & Shi, L. F. (2009). Interaction between genotypic difference and nitrogen management strategy in determining nitrogen use efficiency of summer maize. *Plant and Soil*, 317(1–2), 267–276.

- De La Casa, J. A., & Castro, E. (2014). Recycling of washed olive pomace ash for fired clay brick manufacturing. *Construction and Building Materials*, 61, 320–326.
- Dean, J. F., & Eriksson, K. E. L. (1994). Laccase and the deposition of lignin in vascular plants. *Holzforschung*, 48, 21–33.
- Demis, S., Tapali, J. G., & Papadakis, V. G. (2014). An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*, 68, 291–300.
- Diacono, M., Persiani, A., Testani, E., Montemuro, F., & Ciaccia, C. (2019). Recycling agricultural wastes and by-products in organic farming: Biofertilizer production, yield, performance and carbon footprint analysis. *Sustainability*, 11(14), 3824.
- Dijen, F., & Pels, J. (2020). Classification of ashes and identification of possible future utilisations; Bioefficiency project report D 6.1., EU HORIZON 2020. <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c4c6c430&appId=PPGMS>
- Dołżyńska, M., & Obidziński, S. (2017). Effect of used cooking oil additive on sewage sludge combustion. *Przemysł Chemiczny*, 96, 1848–1851.
- Doudart de la Grée, G. C. H., Florea, M. V. A., Keulen, A., & Brouwers, H. J. H. (2016). Contaminated biomass fly ashes—Characterization and treatment optimization for reuse as building materials. *Waste Management*, 49, 96–109.
- Dragicevic, I., Sogn, T. A., & Eich-Greatorex, Z. (2018). Recycling of biogas digestate in crop production—Soil and plant trace metals content and variability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 45.
- Drakakaki, G., Marcel, S., Glahn, R. P., Lund, E. K., Pariagh, S., Fischer, R., et al. (2005). Endosperm-specific co-expression of recombinant soybean ferritin and *Aspergillus* phytase in maize results in significant increases in the levels of bioavailable iron. *Plant Molecular Biology*, 59, 869–880.
- Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Plaza-Úbeda, J. A., & Camacho-Ferre, F. (2020). The management of agricultural waste biomass in the framework of circular economy and bioeconomy: An opportunity for greenhouse agriculture in Southeast Spain. *Agronomy*, 10(4), 489.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2008/98/WE w sprawie odpadów (Tekst mający znaczenie dla EOG) Dz.U.U.E.L.2018.150.109

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy (Tekst mający znaczenie dla EOG) Dz.U.U.E.L.2008.312.3
- Eltelib, H. A., Hamad, M. A., & Ali, E. E. (2006). The effect of nitrogen and phosphorus fertilization on growth, yield, and quality of forage maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agronomy*, 5(3), 515–518.
- Enestam, S., Boman, C., Niemi, J., Boström, D., Backman, R., Mäkelä, K., & Hupa, M. (2011). Occurrence of zinc and lead in aerosols and deposits in the fluidized-bed combustion of recovered waste wood. Part 1: Samples from boilers. *Energy & Fuels*, 25(4), 1396–1404. <https://doi.org/10.1021/ef101478n>
- Eriksson, A. C., Nordin, E. Z., Nyström, R., Pettersson, E., Swietlicki, E., Bergvall, C., Westerholm, R., Boman, C., & Pagels, J. H. (2014). Particulate PAH emissions from residential biomass combustion: Time-resolved analysis with aerosol mass spectrometry. *Environmental Science & Technology*, 48, 7143–7150.
- Erisman, J. W., Galloway, J. N., Seitzinger, S., Bleeker, A., Dise, N. B., Petrescu, A. M. R., Leach, A. M., & De Vries, W. (2013). Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130116.
- Etle, T., Lebzien, P., Flachowsky, G., & Schwarz, F. J. (2001). Effect of harvest date and variety on ruminal degradability of ensiled maize grains in dairy cows. *Archives of Animal Nutrition*, 55, 69–84.
- EU Fertilizer Regulation 2019/1009, Regulation laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32019R1009>).
- Fallah, S., & Neisani, S. (2017). The effects of nitrogen source on nutritive value of irrigated silage corn. *Notulae Scientia Biologicae*, 9(1), 116–123. <https://doi.org/10.15835/nsb9210205>
- FAO. (2018). *FAO FAOSTAT-agriculture database*. <http://faostat.fao.org/site/>
- Filipek-Mazur, B., Lepiarczyk, A., & Tabak, M. (2013). Wpływ nawożenia azotem i siarką na plonowanie oraz skład chemiczny ziarna kukurydzy. Część II. Zawartość azotu i siarki. *Fragmenta Agronomica*, 30(4), 29–35.

- Foereid, B. (2019). Nutrients recovered from organic residues as fertilizers: Challenges to management and research methods. *World Journal of Agricultural and Soil Sciences*, 1, 1–7.
- Fosu-Mensah, B. Y., MacCarthy, D. S., Vlek, P. L. G., & Safo, E. Y. (2012). Simulating the impact of seasonal climatic variation on the response of maize (*Zea mays* L.) to inorganic fertilizer in sub-humid Ghana. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94, 255–271.
- Fotyma, E. (1997). Efektywność nawożenia azotem podstawowych roślin uprawy polowej. *Fragmenta Agronomica*, 14, 46–66.
- Fotyma, E. (2003). Wpływ nawożenia siarką na wykorzystanie azotu z nawozów mineralnych przez rośliny uprawy polowej. *Nawożenie, Nawoż./Fert./Fertil*, 4(17), 117–136.
- Frant, M., & Bujak, K. (2007). Wpływ uproszczeń w uprawie roli i poziomów nawożenia mineralnego na plonowanie pszenicy jarej. *Fragmenta Agronomica*, 24, 49–57.
- Gallais, A., & Hirel, B. (2004). An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize. *Journal of Experimental Botany*, 55(396), 295–306. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh014>
- Galvín, A. P., López-Uceda, A., Cabrera, M., Rosales, J., & Ayuso, J. (2021). Stabilization of expansive soils with biomass bottom ashes for an eco-efficient construction. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28, 24441–24454.
- Garg, R. N., Pathak, H., Das, D. K., & Tomar, R. K. (2005). Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 107, 1–9.
- Gąsiorowski, H. (2008). Kukurydza: Klasyfikacja, pochodzenie i rozpowszechnienie. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, czerwiec, 2008.
- Genty, T., Bussiere, B., Benzaazoua, M., & Zagury, G. J. (2021). Capacity of wood ash filters to remove iron from acid mine drainage: Assessment of retention mechanism. *Mine Water and the Environment*, 31(4), 273–286.
- Gibczyńska, M., Meller, E., & Hury, G. (2007). Oddziaływanie popiołu z węgla brunatnego na wybrane właściwości fizykochemiczne gleby lekkiej. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 518, 53–61.
- Gnatowski, A., Ulewicz, M., & Chyra, M. (2018). Analysis of changes in thermomechanical properties and structure of polyamide modified with fly ash from biomass combustion. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 647–654.

- Grujcic, D., Yazici, A. M., Tutus, Y., Cakmak, I., & Singh, B. R. (2021). Biofortification of silage maize with zinc, iron and selenium as affected by nitrogen fertilization. *Plants*, 10, 391.
- Hajiboland, R., Panda, C. K., Lastochkina, O., Gavassi, M. A., Habermann, G., & Pereira, J. F. (2023). Aluminum toxicity in plants: Present and future. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(4), 3967–3999.
- Hammad, H. M., Ahmad, A., Khaliq, T., Farhad, W., & Mubeen, M. (2011). Optimizing the rate of nitrogen application for higher yield and quality in maize under a semiarid environment. *Crop and Environment*, 2(1), 38–41.
- Hanson, J. L., Manheim, D. C., & Yeşiller, N. (2023). Geoenvironmental assessment of climate impacts from landfill gas emissions. *Soils and Foundations*, 63, 101279. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101279>
- Harika, A. S., & Sharma, D. D. (1994). Quality and yield differences in maize stover due to varieties and stage of harvesting. In *Variation in the quantity and quality of fibrous crop residues* (Pune, India: Proc. National Seminar held at the BAIF Development Research Foundation), 20–28.
- He, Q., Yu, J., Song, X., Ding, L., Wei, J., & Yu, G. (2020). Utilization of biomass ash for upgrading petroleum coke gasification: Effect of soluble and insoluble components. *Energy*, 192, Article 116642.
- Heviánková, S., Bestova, I., & Kyncl, M. (2014). The application of wood ash as a reagent in acid mine drainage treatment. *Minerals Engineering*, 56, 109–111.
- Ho, W. W., Ng, H. K., & Gan, S. (2012). Development and characterisation of novel heterogeneous palm oil mill boiler ash-based catalysts for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 125, 158–164.
- Hooijboer, A., Fraters, D., & Verloop, K. (2017). Het Effect Van Rotatie Van Maïs En Gras Op De Nitraatuitspoeling. *Water Matters: Kenniskatern voor Waterprofessionals-Dutch edition*, 20–23.
- Hou, S., Ren, H., Fan, F., Zhao, M., Zhou, W., Zhou, B., & Li, C. (2023). The effects of plant density and nitrogen fertilization on maize yield and soil microbial communities in the black soil region of Northeast China. *Geoderma*, 430, 116325.
- Hupa, M. (2012). Ash-related issues in fluidized-bed combustion of biomasses: Recent research highlights. *Energy & Fuels*, 26(1), 4–14.

- Huygens, D., Saveyn, H., Tonini, D., Eder, P., & Delgado Sancho, L. (2019). Technical proposals for selected new fertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009) (EUR 29841 EN). Publications Office of the European Union.
- Illikainen, M., Tanskanen, P., Kinnunen, P., Körkkö, M., Peltosaari, O., Wigren, V., Österbacka, J., Talling, B., & Niinimäki, J. (2014). Reactivity and self-hardening of fly ash from the fluidized bed combustion of wood and peat. *Fuel*, 135, 69–75.
- International Energy Agency (IEA). (2022). *World energy outlook 2022*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c282400e-00b0-4edf-9a8e-6f2ca6536ec8/WorldEnergyOutlook2022.pdf>
- IOR PIB, Warszawa 2023, Metodyka integrowanej ochrony i produkcji kukurydzy, opracowanie zbiorowe.
- Irlbeck, N. A., Russell, J. R., Hallauer, A. R., & Buxton, D. R. (1993). Nutritive value and ensiling characteristics of maize stover as influenced by hybrid maturity and generation, plant density and harvest date. *Animal Feed Science and Technology*, 41, 51–64. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(93\)90094-z](https://doi.org/10.1016/0377-8401(93)90094-z)
- Jacobson, S., Högbom, L., Ring, E., & Nohrstedt, H. Ö. (2004). Effects of wood ash dose and formulation on soil chemistry at two coniferous forest sites. *Water, Air, and Soil Pollution*, 158, 113–125.
- Jamroz, D., Podkówka, W., Chachułowska, J. (2021). Żywnienie zwierząt i paszoznastwo. PWN, 84-86
- Jarecki, W., Buczek, J., & Bobrecka-Jamro, D. (2013). Wpływ nawożenia azotem na wielkość plonu ziarna pszenicy twardej (*Triticum durum* Desf.). *Fragmenta Agronomica*, 30, 68–75.
- Javed, B., Katanda, Y., Nadeem, M., Wickremasinghe, T., Farhain, M., Thomas, R., Galagedara, L., Guo, X., & Cheema, M. (2024). Effectiveness of wood ash and paper sludge as liming and nutrient sources for annual ryegrass grown in podzolic soils of Newfoundland. *Soil Science Society of America Journal*, 88(1). <https://doi.org/10.1002/saj2.20648>
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54, 17–46.
- Jung, H. G., & Allen, M. S. (1995). Characteristics of plant cell walls affecting intake and digestibility of forages by ruminants. *Journal of Animal Science*, 73, 2774–2790.

- Kalembasa S., Godlewska A., Wysokiński A. 2008. Skład chemiczny popiołów z węgla brunatnego i kamiennego w aspekcie ich rolniczego zagospodarowania. *Roczniki Gleboznawcze*, Tom LIX Nr 2, Warszawa 93-97.
- Kalembasa S., Symanowicz B., Kalembasa D., Malinowska E. 2003. Możliwości pozyskiwania i przeróbki biomasy z roślin szybko rosnących (energetycznych). Nowe spojrzenie na osady ściekowe – odnawialne źródła energii. Cz.II. *Polit. Częstoch.*, 358-364.
- Kanhar, A. H., Chen, S., & Wang, F. (2020). Incineration fly ash and its treatment to possible utilization: A review. *Energies*, 13, 6681.
- Kanhar, A. H., Chen, S., & Wang, F. (2020). Incineration fly ash and its treatment to possible utilization: A review. *Energies*, 13, 6681.
- Kaplan, M., Baran, O., Unlukara, A., Hasan, K., Arslan, M., Kanber, K., et al. (2016). The effects of different nitrogen doses and irrigation levels on yield, nutritive value, fermentation and gas production of corn silage. *Turkish Journal of Field Crops*, 21, 100–109.
- Kar, G., Kumar, A., Sahoo, N., & Singh, R. (2014). Use of paper mill sludge as an alternative liming material and its impacts on light interception radiation utilization efficiency of groundnut in acid soils of eastern India. *Journal of Agricultural Physics*, 14(1), 10–21.
- Kastner, J. R., Ganagavaram, R., Kolar, P., Xu, C., & Teja, A. (2008). Catalytic ozonation kinetics of propanal using wood fly ash and metal nanoparticle impregnated carbon. *Environmental Science & Technology*, 42(2), 556–562.
- Kedir, A. J., Zhang, M., & Unc, A. (2021). Understanding soil fertility status in Newfoundland from standard farm soil tests. *Canadian Journal of Soil Science*, 101(4), 517–531.
- Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., & Alamri, S. A. (2018). Fertilizers and their contaminants in soils, surface and groundwater. In *Encyclopedia of the Anthropocene* (pp. 225–240).
- Khan, N. A., Cone, J. W., Fievez, V., & Hendriks, W. H. (2012). Causes of variation in fatty acid content and composition in grass and maize silages. *Animal Feed Science and Technology*, 174, 36–45.

- Khan, N. A., Yu, P., Ali, M., Cone, J. W., & Hendriks, W. H. (2015). Nutritive value of maize silage in relation to dairy cow performance and milk quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 238–252.
- Kolar, P., & Kastner, J. R. (2010). Low-temperature catalytic oxidation of aldehyde mixture using wood fly ash: Kinetics, mechanism, and effect of ozone. *Chemosphere*, 78(9), 1110–1115.
- Kołodziejczyk, M., Szmigiel, A., & Kulig, B. (2012). Plonowanie pszenicy jarej w warunkach zróżnicowanego nawożenia azotem oraz stosowania mikrobiologicznych preparatów poprawiających właściwości gleby. *Fragmenta Agronomica*, 29, 60–69.
- Kołodziejczyk, M., Szmigiel, A., & Oleksy, A. (2007). Wpływ intensywności uprawy na plonowanie wybranych odmian pszenicy jarej. *Acta Scientiarum Polonorum, Agricultura*, 6(1), 5–14.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2017.06.041>
- Košnář, Z., Wiesnerová, L., Částková, T., Kroulíková, S., Bouček, J., Mercl, F., & Tlustoš, P. (2019). Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) present in biomass fly ash by co-composting and co-vermicomposting. *Journal of Hazardous Materials*, 369, 79–86.
- Košnář, Z., Wiesnerová, L., Částková, T., Kroulíková, S., Bouček, J., Mercl, F., & Tlustoš, P. (2019). Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) present in biomass fly ash by co-composting and co-vermicomposting. *Journal of Hazardous Materials*, 369, 79–86.
- Kozłowski, M., Kozłowski, M., Gilewska, M., Otremba, K. (2020). Physical and chemical properties of ash from thermal power station combusting lignite: A case study from Central Poland. *Journal of Elementology*, 25, 279–295.
- Kulczycki, G. (2003). Wpływ nawożenia siarką elementarną na plon i skład chemiczny roślin oraz właściwości chemiczne gleby. *Nawożenie, Nawoż./Fert./Fertil*, 4(17), 151–159.
- Kung, L., Shaver, R. D., Grant, R. J., & Schmidt, R. J. (2018). Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of Dairy Science*, 101, 4020–4033.

- Kutman, U. B., Yildiz, B., Ozturk, L., & Cakmak, I. (2010). Biofortification of durum wheat with zinc through soil and foliar applications of nitrogen. *Cereal Chemistry*, 87, 1–9.
- Kuźnia, M., Zygmunt-Kowalska, B., Szajding, A., Magiera, A., Stanik, R., & Gude, M. (2022). Comparative study on selected properties of modified polyurethane foam with fly ash. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 9725.
- Lanzerstorfer, C. (2015). Chemical composition and physical properties of filter fly ashes from eight grate-fired biomass combustion plants. *Journal of Environmental Sciences*, 30, 191–197.
- Lanzerstorfer, C. (2019). Potential of industrial de-dusting residues as a source of potassium for fertilizer production – A mini review. *Resources, Conservation and Recycling*, 143, 68–76. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.12.013>
- Leflaive, X., Witmer, M., Martin-Hurtado, R., Bakker, M., Kram, T., Bouwman, L., Visser, H., Bouwman, A., & Hilderink, H. (2012). *Water*. In *OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction*. OECD Publishing.
- Li, G., Wang, L., Li, L., Lu, D., & Lu, W. (2020). Effects of fertilizer management strategies on maize yield and nitrogen use efficiencies under different densities. *Agronomy Journal*, 112(1), 92–101.
- Li, Y., Liang, G., Chang, L., Zi, C., Zhang, Y., Peng, Z., & Zhao, W. (2021). Conversion of biomass ash to different types of zeolites: A review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43(14), 1745–1758.
- Lindvall, E., Gustavsson, A.-M., Samuelsson, R., Magnusson, T., & Palmberg, C. (2015). Ash as a phosphorus fertilizer to reed canary grass: Effects of nutrient and heavy metal composition on plant and soil. *Global Change Biology Bioenergy*, 7, 553–564.
- Liu, Y., Subhash, C., Yan, J., Song, C., Zhao, J., & Li, J. (2011). Maize leaf temperature responses to drought: Thermal imaging and quantitative trait loci (QTL) mapping. *Environmental and Experimental Botany*, 71, 158–165.
- Löffler, G., Wargadalam, V. J., & Winter, F. (2002). Catalytic effect of biomass ash on CO, CH₄ and HCN oxidation under fluidised bed combustor conditions. *Fuel*, 81(6), 711–717.
- López-Bellido, R. J., & López-Bellido, L. (2001). Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean condition: effect of tillage, crop rotation and N fertilization. *Field Crops Research*, 71, 31–64. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00114-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00114-9)

- Lounate, K., Coudert, L., Genty, T., Mercier, G., & Blais, J. F. (2020). Geochemical behavior and stabilization of spent sulfate-reducing biofilter mixtures for treatment of acid mine drainage. *Science of the Total Environment*, 718, Article 137394.
- Ma, B. L., & Dwyer, L. M. (2012). Changes in kernel characteristics during grain filling in silage-specific and dual-purpose corn hybrids. *Canadian Journal of Plant Science*, 92, 427–439.
- Ma, R., Jiang, C., Shou, N., Gao, W., & Yang, X. (2023). An optimized nitrogen application rate and basal topdressing ratio improves yield, quality, and water- and N-use efficiencies for forage maize (*Zea mays* L.). *Agronomy*, 13, 181.
- Maj, G. (2018). Emission factors and energy properties of agro and forest biomass in aspect of sustainability of energy sector. *Energies*, 11, 1516.
- Martínez-García, R., Jagadesh, P., Zaid, O., Șerbănoiu, A. A., Fraile-Fernández, F. J., de Prado-Gil, J., Qaidi, S. M. A., & Grădinaru, C. M. (2022). The present state of the use of waste wood ash as an eco-efficient construction material: A review. *Materials*, 15(15), 5349. <https://doi.org/10.3390/ma15155349>
- Masto, R. E., Sarkar, E., George, J., Jyoti, K., Dutta, P., & Ram, L. C. (2015). PAHs and potentially toxic elements in the fly ash and bed ash of biomass-fired power plants. *Fuel Processing Technology*, 132, 139–152.
- McBratney, A., & Field, D. (2015). Securing our soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(4), 587–591.
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15(12), 1409–1416.
- Meng, Q. F., Yue, S. C., Hou, P., Cui, Z. L., & Chen, X. P. (2016). Improving yield and nitrogen use efficiency simultaneously for maize and wheat in China: A review. *Pedosphere*, 26(2), 137–147. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60030-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60030-3)
- Mengel, K., Kirkby, C. A., Kosegarten, H., & Appel, T. (2006). *Principles of Plant Nutrition* (5th ed.). Springer Publishers.
- Mercl, F., Tejnecký, V., Száková, J., & Tlustoš, P. (2016). Nutrient dynamics in soil solution and wheat response after biomass ash amendments. *Agronomy Journal*, 108, 2222–2234.
- Michalski T., Bereś K., Sobiech Ł., Szczepaniak W., Kukurydza – publikacja specjalna: magazyn rolniczy Agro Profil wyd. Agro Wydawnictwo Suchy Las k/Poznania 2018

- Mirowski, T. (2016). Utilization of biomass for energy purpose versus reduction of emission of air pollutants from municipal and households sector. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 18, 466–477.
- Mirowski, T., Mokrzycki, E., Filipowicz, M., & Sornek, K. (2018). Charakterystyka wybranych technologii produkcji energii z biomasy w energetyce rozproszonej. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi Polskiej Akademii Nauk*, 105, 63–74.
- Modrzycka, A. (2015). Wstępna charakterystyka popiołów lotnych ze spalania biomasy w aspekcie ich zastosowania w materiałach budowlanych. *Materiały Budowlane*, 1, 82–83.
- Mohammadi, A., Anukam, A. I., Granström, K., Eskandari, S., Zywalewska, M., Sandberg, M., & Aladejana, E. B. (2022). Effects of wood ash on physicochemical and morphological characteristics of sludge-derived hydrochar pellets relevant to soil and energy applications. *Biomass and Bioenergy*, 163, 106531.
- Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 242–257.
- Moore, K. J. (1993). Improving the digestibility of warm-season perennial grasses. In *Proceedings of the 17th International Grassland Congress* (p. 200).
- Moore, K. J., & Hatfield, R. D. (1994). Carbohydrates and forage quality. In *Forage quality, evaluation, and utilization* (pp. 229–280).
- Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2013). Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 494, 390.
- Munawar, M. A., Khoja, A. H., Hassan, M., Liaquat, R., Naqvi, S. R., Mehran, M. T., Abdullah, A., & Saleem, F. (2021). Biomass ash characterization, fusion analysis and its application in catalytic decomposition of methane. *Fuel*, 285.
- Murtić, S., Zahirović, Č., Čivić, H., Karić, L., & Jurković, J. (2018). Uptake of heavy metals by tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) and their distribution inside the plant. *Agriculture and Forestry*, 65(3), 251–261.
- Nanou, P., Gutierrez Murillo, H. E., van Swaaij, W. P. M., van Rossum, G., & Kersten, S. R. A. (2013). Intrinsic reactivity of biomass-derived char under steam gasification conditions-potential of wood ash as catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 217, 289–299.
- Nkoa, R. (2014). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(3), 473–492.

- Norrie, J., & Fierro, A. (2020). Paper sludges as soil conditioners. In A. Wallace & R. E. Terry (Eds.), *Handbook of Soil Conditioners* (pp. 97–115). CRC Press.
- Novais, R. M., Ascensão, G., Tobaldi, D. M., Seabra, M. P., & Labrincha, J. A. (2018). Biomass fly ash geopolymer monoliths for effective methylene blue removal from wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, 171, 783–794.
- Novais, R. M., Carvalheiras, J., Tobaldi, D. M., Seabra, M. P., Pullar, R. C., & Labrincha, J. A. (2019). Synthesis of porous biomass fly ash-based geopolymer spheres for efficient removal of methylene blue from wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, 207, 350–362.
- Oba, M., & Allen, M. S. (1999b). Evaluation of the importance of the digestibility of neutral detergent fiber from forage: Effects on dry matter intake and milk yield of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 82, 589–596.
- Ohenoja, K., Tanskanen, P., Wigren, V., Kinnunen, P., Körkkö, M., Peltosaari, O., Österbacka, J., & Illikainen, M. (2016a). Effect of particle size distribution on the self-hardening property of biomass-peat fly ash from a bubbling fluidized bed combustion. *Fuel Processing Technology*, 148, 60–66.
- Ohenoja, K.; Tanskanen, P.; Wigren, V.; Kinnunen, P.; Körkkö, M.; Peltosaari, O.; Österbacka, J.; Illikainen, M. Self-hardening of fly ashes from a bubbling fluidized bed combustion of peat, forest industry residuals, and wastes. *Fuel* 2016b, 165, 440–446.
- Omar, S., Abd Ghani, R., Khaeim, H., Sghaier, A. H., & Jolánkai, M. (2022). The effect of nitrogen fertilisation on yield and quality of maize (*Zea mays* L.). *Acta Alimentaria*, 51(2), 249–258.
- O'Mara, F. P., Fitzgerald, J. J., Murphy, J. J., & Rath, M. (1998). The effect on milk production of replacing grass silage with maize silage in the diet of dairy cows. *Livestock Production Science*, 55, 79–87.
- Onasanya, R. O., Aiyelari, O. P., Onasanya, A., Oikeh, S., Nwilene, F. E., & Oyelakin, O. O. (2009). Growth and yield response of maize (*Zea mays* L.) to different rates of nitrogen and phosphorus fertilizers in southern Nigeria. *World Journal of Agricultural Sciences*, 5, 400–407.
- Orasche, J., Seidel, T., Hartmann, H., Schnelle-Kreis, J., Chow, J. C., Ruppert, H., & Zimmermann, R. (2012). Comparison of emissions from wood combustion. Part 1: Emission factors and characteristics from different small-scale residential heating appliances considering particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-

- related toxicological potential of particle-bound organic species. *Energy & Fuels*, 26, 6695–6704.
- Panasiewicz, K., Koziara, W., & Sulewska, H. (2009). Reakcja pszenicy ozimej *Triticum durum* Desf. odmiany Komnata na gęstość siewu i nawożenie azotem. *Biuletyn IHAR*, 253, 125–134.
 - Pardo, S. G., Bernal, C., Abad, M. J., Cano, J., & Ares, A. (2014). Fracture and thermal behaviour of biomass ash polypropylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27, 481–497.
 - Parmar, K. (2017). Biomass - An overview on composition characteristics and properties. *IRA-International Journal of Applied Sciences*, 7, 42–51.
 - Pastorelli, R., Valboa, G., Lagomarsino, A., Fabiani, A., Simoncini, S., Zaghi, M., & Vignozzi, N. (2021). Recycling biogas digestate from energy crops: Effects on soil properties and crop productivity. *Applied Sciences*, 11(2), 750.
 - Paul, S. C. (2020). Use of fly ash in agriculture. In *Sustainable Agriculture* (pp. 319–334). Apple Academic Press.
 - Pels J.R., wsp. 2005 – Utylization of ashes from biomass combustion and gasification. Biomass Conference and Exhibition. Paris, France, 17–21 October.
 - Peng, Y., Niu, J., Peng, Z., Zhang, F., & Li, Ch. (2010). Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil. *Field Crops Research*, 115, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.011>
 - Penney, K., Mohamedelhassan, E., & Catalan, L. J. J. (2013). Utilization of coal/biomass fly ash and glacial till soil as a flow-through reactive barrier for the treatment of acid mine drainage. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 39(4), 244–253.
 - Penuelas, J., Coello, F., & Sardans, J. (2023). A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. *Agriculture & Food Security*, 12, 5. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00409-5>
 - Pereira NCM, Galindo FS, Gazola RPD, Dupas E, Rosa PAL, Mortinho ES and Teixeira Filho MCM (2020) Corn Yield and Phosphorus Use Efficiency Response to Phosphorus Rates Associated With Plant Growth Promoting Bacteria. *Front. Environ. Sci.* 8:40. doi: 10.3389/fenvs.2020.00040
 - Petković, K., Manojlović, M., Čabilovski, R., Lončarić, Z., Krstić, Đ., Kovačević, D., & Ilić, M. (2022). Nitrogen fertilisation affected zinc and selenium biofortification in silage maize. *Crop and Pasture Science*, 73(7-8), 781-791.

- Philippeau, C., & Michalet-Doreau, B. (1998). Influence of genotype and ensiling of corn grain on in situ degradation of starch in the rumen. *Journal of Dairy Science*, 81, 2178–2184.
- Phipps, R. H., Sutton, J. D., Beever, D. E., & Jones, A. K. (2000). The effect of crop maturity on the nutritional value of maize silage for lactating dairy cows. 3. Food intake and milk production. *Animal Science*, 71, 401–409.
- Piekarczyk, M., Kotwica, K., & Jaskulski, D. (2011a). Effect of spring barley straw ash on the chemical properties of light soil. *Fragmenta Agronomica*, 28, 91–99.
- Piekarczyk, M., Kotwica, K., & Jaskulski, D. (2011b). The elemental composition of ash from straw and hay in the context of their agricultural utilization. *Acta Scientiarum Polonorum Agricultura*, 10, 97–104.
- Pitman, R. M. (2006). Wood ash use in forestry—A review of the environmental impacts. *Forestry*, 79, 563–588.
- Pollmer, W. G., Eberhard, D., Klein, D., & Dhillon, B. S. (1979a). Genetic control of nitrogen uptake and translocation in maize. *Crop Science*, 19, 82–86.
- Pollmer, W. G., Klein, D., & Dhillon, B. S. (1979b). Differences in reciprocal crosses of maize inbred lines diverse for protein content. *Euphytica*, 28, 325–328.
- Poluszyńska, J. (2013). Possibilities of applications of fly ash from the biomass combustion in the sludge management. *ICIMB*, 6, 49–59.
- Popko, M., Michalak, I., Wilk, R., et al. (2018). Effect of the new plant growth biostimulants based on amino acids on yield and grain quality of winter wheat. *Molecules*, 23(2), 470.
- Porcino, D. D., Mauriello, F., Bonaccorsi, L., Tomasello, G., Paone, E., & Malara, A. (2020). Recovery of biomass fly ash and HDPE in innovative synthetic lightweight aggregates for sustainable geotechnical applications. *Sustainability*, 12, 6552.
- Przygocka-Cyna, K., Grzebisz, W., & Łukowiak, R. (2018). Effect of bio-fertilizer amendment on agrochemical properties of soil cropped with vegetables. *Journal of Elementology*, 23(1), 163–167.
- Qiang, S. C., Zhang, Y., Fan, J. L., Zhang, F. C., Xiang, Y. Z., Yan, S. C., & Wu, Y. (2019). Maize yield, rainwater and nitrogen use efficiency as affected by maize genotypes and nitrogen rates on the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 213, 996–1003.

- Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2010). Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 177, 70–80.
- Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A. C., Allen, G. C., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2009). Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials*, 172, 1049–1060.
- Rakotonimaro, T. V., Neculita, C. M., Bussiere, B., & Zagury, G. J. (2016). Effectiveness of various dispersed alkaline substrates for the pre-treatment of ferriferous acid mine drainage. *Applied Geochemistry*, 73, 13–23.
- Regulation of the Minister of Agriculture and Rural Development on 18 June 2008 on the Implementation of Certain Provisions of the Act on Fertilizers and Fertilization [J. of Laws 2008 No. 119, Item 765, as Amended]. Available online: <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC087385/>
- Regulation of the Minister of the Environment of 9 December 2014 on the Waste Catalog (Journal of Laws of 2013, Item 21, as Amended). Available online: <https://www.global-regulation.com/translation/poland/8302260/act-of-14-december-2012-on-waste.html>
- Reimann, C., Ottesen, T., Andersson, M., Arnoldussen, A., Koller, F., & Englmaier, P. (2008). Element levels in birch and spruce woods ashes—Green energy? *Science of the Total Environment*, 393, 191–197.
- Restle, J., Pacheco, P. S., Alves Filho, D. C., Freitas, A. K. D., Neumann, M., & Brondani, I. L. (2006). Silagem de diferentes híbridos de milho para produção de novilhos superjovens. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 35, 2066–2076.
- Richard, D., Mucci, A., Neculita, C. M., & Zagury, G. J. (2020). Comparison of organic materials for the passive treatment of synthetic neutral mine drainage contaminated by nickel: Short- and medium-term batch experiments. *Applied Geochemistry*, 123, Article 104772.
- Robertson, G. P., & Vitousek, P. M. (2009). Nitrogen in agriculture: Balancing the cost of an essential resource. *Annual Review of Environment and Resources*, 34(1), 97–125.
- Rodríguez, Y., Maudier, B., Zagal, E., & Hernández, P. (2019). Effects of wood ash on nutrients and heavy metal(oid)s mobility in an Ultisol. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(7), 1246.
- Romero, E., Quirantes, M., & Nogales, R. (2017). Characterization of biomass ashes produced at different temperatures from olive-oil-industry and greenhouse vegetable wastes. *Fuel*, 208, 1–9.

- Rosales, J., Cabrera, M., Beltrán, M. G., López, M., & Agrela, F. (2017). Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, 154, 424–435.
- Royer-Tardif, S., Whalen, J., & Rivest, D. (2019). Can alkaline residuals from the pulp and paper industry neutralize acidity in forest soils without increasing greenhouse gas emissions? *Science of the Total Environment*, 663, 537–547.
- Rozporządzenie (WE) Nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH) i utworzenia Europejskiej Agencji Chemikaliów, zmieniające dyrektywę 1999/45/WE oraz uchylające rozporządzenie Rady (EWG) nr 793/93 i rozporządzenie Komisji (WE) nr 1488/94, jak również dyrektywę Rady 76/769/EWG i dyrektywy Komisji 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/WE i 2000/21/WE * (Tekst mający znaczenie dla EOG).
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach, Dz.U. 2015 poz. 1277
- Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu. Dz.U. 2024 poz. 1261.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 maja 2015 r. w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami, Dz.U. 2015 poz. 796.
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 z dnia 5 czerwca 2019 r. ustanawiające przepisy dotyczące udostępniania na rynku produktów nawozowych UE, zmieniające rozporządzenia (WE) nr 1069/2009 i (WE) nr 1107/2009 oraz uchylające rozporządzenie (WE) nr 2003/2003.
- Ruijter, F. J., van Dijk, W., van Geel, W. C. A., Holshof, G., Postma, R., & Wilting, P. (2020). Actualisatie Van Stikstof-En Fosfaatgehalten Van Akkerbouwgewassen Met Een Groot Areaal. Report WPR No. WPR-957. Wageningen Plant Research.
- Rutkowska, G., Wiśniewski, K., Chalecki, M., Górecka, M., & Miłosek, K. (2016). Influence of fly ashes on properties of ordinary concretes. *Annals of Warsaw University of Life Sciences—SGGW Land Reclamation*, 48, 79–94.
- Sadhukhan, J., Dugmore, T. I. J., Matharu, A., et al. (2020). Perspectives on “game changer” global challenges for sustainable 21st century: Plant-based diet, unavoidable food waste biorefining, and circular economy. *Sustainability*, 12(5), 1976.

- Sarkkinen, M., Kujala, K., Kemppainen, K., & Gehör, S. (2018). Effect of biomass fly ashes as road stabilisation binder. *Road Materials and Pavement Design*, 19, 239–251.
- Savci, S. (2012). Investigation of effect of chemical fertilizers on environment. *APCBEE Procedia*, 1, 287–292. <https://doi.org/10.1016/J.APCBEE.2012.03.047>
- Sayehi, M., Tounsi, H., Garbarino, G., Riani, P., & Busca, G. (2020). Reutilization of silicon- and aluminum-containing wastes in the perspective of the preparation of SiO₂-Al₂O₃ based porous materials for adsorbents and catalysts. *Waste Management*, 103, 146–158.
- Schröder, J. J., Aarts, H. F. M., Middelkoop, V. J. C., Velthof, G. L., Reijs, J. W., & Fraters, B. (2009). Nitrates Directive Requires Limited Inputs of Manure and Mineral Fertilizer in Dairy Farming Systems. Report 222. Plant Research International.
- Schröder, J. J., Visser, D. W., Assinck, F. B. T., & Velthof, G. L. (2013). Effects of short-term nitrogen supply from livestock manures and cover crops on silage maize production and nitrate leaching. *Soil Use and Management*, 29, 151–160.
- Schröder, J., & Dilz, K. (1987). Cattle slurry and farmyard manure as fertilizers for forage. In H. G. van der Meer, R. J. Unwin, & T. A. van Dijk (Eds.), *Animal manure on grassland and fodder crop: Fertilizer or waste?* Proceedings of an International Symposium of the European Grassland Federation (pp. 137–156). Nijhoff.
- Shao, Y., Wang, J., Preto, F., Zhu, J., & Xu, C. (2012). Ash deposition in biomass combustion or co-firing for power/heat generation. *Energies*, 5, 5171–5189.
- Sharma, M., Khan, A. A., Puri, S. K., & Tuli, D. K. (2012). Wood ash as a potential heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis. *Biomass and Bioenergy*, 41, 94–106.
- Shi, R., Li, J., Jiang, J., Mehmood, K., Liu, Y., Xu, R., & Qian, W. (2017). Characteristics of biomass ashes from different materials and their ameliorative effects on acid soils. *Journal of Environmental Sciences*, 55, 294–302.
- Shuai Hou, Hong Ren, Fenliang Fan, Ming Zhao, Wenbin Zhou, Baoyuan Zhou, Congfeng Li, The effects of plant density and nitrogen fertilization on maize yield and soil microbial communities in the black soil region of Northeast China, *Geoderma*, Volume 430,2023, 116325,
- Sibma, L. (1987). *Ontwikkeling en Groei van Maïs (Zea mays L.) Onder Nederlandse Omstandigheden*. Pudoc.

- Silva, R. V., de Brito, J., Lynn, C. J., & Dhir, R. K. (2017). Use of municipal solid waste incineration bottom ashes in alkali activated materials, ceramics and granular applications: A review. *Waste Management*, 68, 207–220.
- Skels, P., Haritonovs, V., & Pavlovskis, E. (2021). Wood fly ash stabilized road base layers with high recycled asphalt pavement content. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 16, 1–15.
- Smalberger, S. A., Singh, U., Chien, S. H., Henao, J., & Wilkens, P. W. (2006). Rozwój i walidacja systemu wspomaganie decyzji w odniesieniu do skał fosforanowych. *Agronomy Journal*, 98, 471–483.
- Smol, M. (2021). Transition to circular economy in the fertilizer sector—Analysis of recommended directions and end-users' perception of waste-based products in Poland. *Energies*, 14(14), 4312.
- Sornek, K., Filipowicz, M., & Rzepka, K. (2017). Study of clean combustion of wood in a stove-fireplace with accumulation. *Journal of Energy Institute*, 90, 613–623.
- Stan środowiska w Polsce. Raport 2018.
- Stankowski S., Bielińska E. 2009. Popioły z biomasy a możliwości wykorzystania do celów nawozowych. Tereny zdegradowane i rekultywowane – możliwości ich zagospodarowania, Szczecin.
- Stankowski, S., Hury, G., Gibczyńska, M., & Jurgiel-Małecka, G. (2014). Impact of lime, biomass ash and compost as well as preparation of em applications on grain yield and yield components of wheat. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 38, 17–25. <https://doi.org/10.12912/2081139X.29>
- Stasi, E., Giuri, A., La Villetta, M., Cirillo, D., Guerra, G., Maffezzoli, A., Ferraris, E., & Corcione, C. E. (2019). Catalytic activity of oxidized carbon waste ashes for the crosslinking of epoxy resins. *Polymers*, 11(6), 1011.
- Statista. (2022). Production of corn for silage in the U.S. from 2001 to 2021. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/190886/production-of-corn-for-silage-in-the-us-since-2000>
- Stavridou, E., Webster, R. J., & Robson, P. R. H. (2020). The effects of moderate and severe salinity on composition and physiology in the biomass crop *Miscanthus × giganteus*. *Plants*, 9, 1266.

- Stevnebo, A., Sahlström, S., & Svihus, B. (2006). Starch structure and degree of starch hydrolysis of small and large starch granules from barley varieties with varying amylose content. *Animal Feed Science and Technology*, 130, 23–38.
- Stolarski, M. J., Krzyżaniak, M., Warmiński, K., Tworkowski, J., & Szczukowski, S. (2015). Willow biomass energy generation efficiency and greenhouse gas reduction potential. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24, 2627–2640.
- Straka, P., & Havelcová, M. (2012). Polycyclic aromatic hydrocarbons and other organic compounds in ashes from biomass combustion. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 9, 481–490.
- Subedi, K., & Ma, B. (2005). Nitrogen uptake and partitioning in stay-green and leafy maize hybrids. *Crop Science*, 45, 740–747. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0156>
- Suchy, M., Wassenaar, L. I., Graham, G., & Zebarth, B. (2018). High-frequency NO₃-isotope (delta N-15, delta O-18) patterns in groundwater recharge reveal that short-term changes in land use and precipitation influence nitrate contamination trends. *Hydrology and Earth System Science*, 22(8), 4267–4279.
- Sulewska H., Koziara W., Panasiewicz K., Jazic P. (2007). Efekty stosowania nawozów naturalnych w uprawie kukurydzy na ziarno i kiszonkę. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 52(4), 75-79.
- Sulewska, H., Koziara, W., Bojarczuk, J. (2007). Kształtowanie plonu i jakości ziarna wybranych genotypów *Triticum durum* Desf. w zależności od nawożenia azotem i gęstości siewu. *Biuletyn IHAR*, 245, 17–28.
- Supancic, K., Obernberger, I., Kienzl, N., & Arich, A. (2014). Conversion and leaching characteristics of biomass ashes during outdoor storage—Results of laboratory tests. *Biomass and Bioenergy*, 61, 211–226.
- Sutrisno, B., & Hidayat, A. (2017). Upgrading of bio-oil from the pyrolysis of biomass over the rice husk ash catalysts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 162.
- Sutton, J. D., Cammell, S. B., Phipps, R. H., Beever, D. E., & Humphries, D. J. (2000). The effect of crop maturity on the nutritional value of maize silage for lactating dairy cows. 2. Ruminant and post-ruminant digestion. *Animal Science*, 71, 391–400.
- Szcześniak, A., Zychowicz, J., & Stolarski, A. (2017). Assessment of the influence of fly ash additive on the tightness of concrete with furnace cement CEM IIIA 32,5N. *Bulletin of the Military University of Technology*, 66, 153–164.

- Szulc, P. (2010). Effects of differentiated levels of nitrogen fertilization and the method of magnesium application on the utilization of nitrogen by two different maize cultivars for grain. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19(2), 407–412.
- Szulc, P., & Waligóra, H. (2010). Response of maize hybrid (*Zea mays* L.), stay-green type to fertilization with nitrogen, sulphur, and magnesium. Part II. Plant development and the uptake of mineral components. *Acta Scientiarum Polonorum, Agricultura*, 9(1), 41–54.
- Szyszlak-Bargłowicz, J., Zając, G., Kuranc, A., Słowik, T., Dudziak, A., Stoma, M., & Wasilewski, J. (2018). Chemical properties of selected agri-food industry waste products in the aspect of their use for energetics purposes. *Przemysł Chemiczny*, 97, 779–783.
- Tavano, O. L. (2013). Protein hydrolysis using proteases: An important tool for food biotechnology. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 90, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.MOLCATB.2013.01.011>
- Tofa, A. I., Kamara, A. Y., Babaji, B. A., Aliyu, K. T., Ademulegun, T. D., & Bebeley, J. F. (2022). Maize yield as affected by the interaction of fertilizer nitrogen and phosphorus in the Guinea savanna of Nigeria. *Heliyon*, 8(11), e11587. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11587>
- Tran, K.-Q., Kilpinen, P., Eränen, K., Kumar, N., Steenari, B.-M., Moreno, N., & Querol, X. (2009). Fly ash utilization for the development of low NO_x bed materials. *Open Fuels & Energy Science Journal*, 2, 27–30.
- Tsai, C. Y., Dweikat, I., Huber, D. M., & Warren, H. L. (1992). Interrelationship of nitrogen nutrition with maize (*Zea mays*) grain yield, nitrogen use efficiency, and grain quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 58(1), 1–8.
- Uliasz-Bocheńczyk, A., & Mokrzycki, E. (2018). The elemental composition of biomass ashes as a preliminary assessment of the recovery potential. *Mineral Resources Management*, 34, 115–132.
- Uliasz-Bocheńczyk, A., Mazurkiewicz, M., & Mokrzycki, E. (2015). Fly ash from energy production—A waste, byproduct and raw material. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 31, 139–150.
- Uliasz-Bocheńczyk, A., Pawluk, A., & Pyzalski, M. (2016). Characteristics of ash from the combustion of biomass in fluidized bed boilers. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 32, 149–162.

- Usmani, Z., Kumar, V., Gupta, P., Gupta, G., Rani, R., & Chandra, A. (2019). Enhanced soil fertility, plant growth promotion, and microbial enzymatic activities of vermicomposted fly ash. *Scientific Reports*, 9, 10455.
- Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu, Dz.U. 2007 nr 147 poz. 1033
- van Bruggen, C., & Gosselink, M. (2018). *Dierlijke Mest en Mineralen 1990–2018*. CBS.
- Vaneckhaute, C., Meers, E., Michels, E., Buysse, J., & Tack, F. M. G. (2013). Ecological and economic benefits of the application of bio-based mineral fertilizers in modern agriculture. *Biomass and Bioenergy*, 49, 239–248.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., & Vassileva, C. G. (2014). An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. *Fuel*, 117, 152–183.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase—Mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 105, 40–76.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 913–933.
- Velthof, G. L., Koeijer, T., Schröder, J. J., Timmerman, M., Hooijboer, A., Rozemeijer, J., & Bruggen, C. V. (2017). Effecten Van Het Mestbeleid Op Landbouw En Milieu: Beantwoording Van De Ex-Postvragen in Het Kader Van De Evaluatie Van De Meststoffenwet. Report 2782. Wageningen Environmental Research.
- Viktarovich, N., & Czechowska-Kosacka, A. (2016). Production from biomass in a trigeneration system. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 18, 1007–1017.
- Von Pinho, R. G., Borges, I. D., Pereira, J. L. A. R., & Reis, M. C. (2009). Macronutrients absorption and dry matter accumulation in maize. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 8(2), 157–173.
- Wang, G. L., Ye, Y. L., Chen, X. P., & Cui, Z. L. (2014). Determining the optimal nitrogen rate for summer maize in China by integrating agronomic, economic, and environmental aspects. *Biogeosciences*, 11(11), 3031–3041. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3031-2014>
- Wang, P., Hu, Y., & Cheng, H. (2019). Municipal solid waste (MSW) incineration fly ash as an important source of heavy metal pollution in China. *Environmental Pollution*, 252, 461–475.

- Wang, Z., Li, J., & Li, Y. (2014). Effects of drip irrigation system uniformity and nitrogen applied on deep percolation and nitrate leaching during growing seasons of spring maize in semi-humid region. *Irrigation Science*, 32(3), 221–236.
- Wierzbowska, J., Sienkiewicz, S., Żarczyński, P., & Krzebietke, S. (2020). Environmental application of ash from incinerated biomass. *Agronomy*, 10, 482.
- Wójcik, M., Stachowicz, F., & Masłoń, A. (2020). The use of wood biomass ash in sewage sludge treatment in terms of its agricultural utilization. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 753–768.
- Wołejko, E., Wydro, U., Jabłońska-Trypuć, A., Butarewicz, A., & Łoboda, T. (2018). The effect of sewage sludge fertilization on the concentration of PAHs in urban soils. *Environmental Pollution*, 232, 347–357.
- Wróbel, E. (1999). Reakcja pszenicy jarej na dawkę i termin stosowania azotu. *Pamiętnik Puławski*, 118, 448–453.
- Wysokiński, A., & Kozuchowska, M. (2024). Increasing silage maize yield and nitrogen use efficiency as a result of combined rabbit manure and mineral nitrogen fertilization. *Scientific Reports*, 14, 5856.
- Xiao, R., Chen, X., Wang, F., & Yu, G. (2011). The physicochemical properties of different biomass ashes at different ashing temperatures. *Renewable Energy*, 36, 244–249.
- Yang, R., Mitchell, C. C., & Howe, J. A. (2018). Relative neutralizing value as an indicator of actual liming ability of limestone and byproduct materials. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(10), 1144–1156.
- Yang, X. L., Lu, Y. L., Ding, Y., Yin, X. F., Raza, S., & Tong, Y. A. (2017). Optimising nitrogen fertilisation: A key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008–2014). *Field Crops Research*, 206, 1–10.
- Yao, X., Xu, K., & Li, Y. (2016). Physicochemical properties and possible applications of waste corncob fly ash from biomass gasification industries of China. *BioResources*, 11, 3783–3798.
- Yolcu, R., & Cetin, O. (2015). Nitrogen fertigation to improve nitrogen use efficiency and crude protein on silage corn. *Turkish Journal of Field Crops*, 20, 233–241.
- Yu, D., Yu, X., Wu, J., Han, J., Liu, F., & Pan, H. (2021). A comprehensive review of ash issues in oxyfuel combustion of coal and biomass: Mineral matter transformation, ash formation, and deposition. *Energy & Fuels*, 35, 17241–17260.

- Zapałowska, A., Puchalski, C., Hury, G., & Makarewicz, A. (2017). Influence of fertilization with the use of biomass ash and sewage sludge on the chemical composition of Jerusalem artichoke used for energy-related purposes. *Inżynieria Ekologiczna*, 18, 235–245.
- Zhai, J., Burke, I. T., & Stewart, D. I. (2022). Potential reuse options for biomass combustion ash as affected by the persistent organic pollutants (POPs) content. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 5, 100038.
- Zhai, J., Burke, I. T., Mayes, W. M., & Stewart, D. I. (2021). New insights into biomass combustion ash categorisation: A phylogenetic analysis. *Fuel*, 287, 119469.
- Zhang, L., Zhang, X., Gao, Q., & Yan, L. (2023). Nitrogen application effect on maize yield, NH₃, and N₂O emissions in Northeast China by meta-analysis. *Agronomy*, 13(6), 1479. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061479>
- Zhang, S. L., Gao, P. C., Tong, Y. A., Norse, D., Lu, Y. L., & Powlson, D. (2015a). Overcoming nitrogen fertilizer over-use through technical and advisory approaches: A case study from Shaanxi province, northwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 209, 89–99.
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2015b). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528(7580), 51–59.
- Zhao, B. Q., Li, X. Y., Li, X. P., Shi, X. J., Huang, S. M., Wang, B. R., Zhu, P., Yang, X. Y., Liu, H., Chen, Y., Poulton, P. R., Powlson, D. S., Todd, A. D., & Payne, R. W. (2010). Long-term fertilizer experiment network in China: Crop yields and soil nutrient trends. *Agronomy Journal*, 102(1), 216–230.
- Zhou, H., Wu, C., Onwudili, J. A., Meng, A., Zhang, Y., & Williams, P. T. (2015). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) formation from the pyrolysis of different municipal solid waste fractions. *Waste Management*, 36, 136–146.
- Żuchowska-Grzywacz, M. (2021). Chemisation of agriculture in selected legal acts. *Studia Iuridica Lublinensia*, 30, 621.

10. Załączniki – Tabele do omówienia wyników

Tabela 12. Plon suchej masy [t · ha⁻¹] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	40,79 ^a	35,97 ^a	39,27 ^a	34,11 ^a	37,55 ^A	39,75 ^a	40,53 ^a	40,14 ^a	36,67 ^a	39,27 ^A	39,77 ^a
	Obniżona o 25%	39,47 ^a	41,50 ^a	38,87 ^a	40,10 ^a	39,99 ^A	39,48 ^a	40,21 ^a	43,56 ^a	40,13 ^a	40,85 ^A	42,43 ^a
	Średnie	39,43 ^A		38,09 ^A			39,99 ^A		40,13 ^A			41,10 ^A
		38,76 ^A						40,06 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta_p^2 = 11,52\%$										
2022	Optymalna	35,98 ^a	34,77 ^a	36,64 ^a	34,81 ^a	35,55 ^A	35,06 ^a	33,97 ^a	35,69 ^a	34,44 ^a	34,79 ^A	30,40 ^a
	Obniżona o 25%	30,01 ^a	37,00 ^a	33,64 ^a	35,64 ^a	34,07 ^A	35,96 ^a	28,96 ^a	31,28 ^a	31,18 ^a	32,53 ^A	31,74 ^a
	Średnie	34,44 ^A		35,18 ^A			33,42 ^A		33,90 ^A			31,07 ^A
		34,81 ^A						33,66 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
2023	Optymalna	36,24 ^a	30,70 ^a	32,33 ^a	33,31 ^a	33,14 ^A	32,04 ^a	29,21 ^a	38,87 ^a	36,84 ^a	34,24 ^A	30,60 ^a
	Obniżona o 25%	32,60 ^a	35,92 ^a	29,94 ^a	31,30 ^a	32,44 ^A	32,75 ^a	30,32 ^a	36,96 ^a	30,53 ^a	32,65 ^A	30,91 ^a
	Średnie	33,86 ^A		31,72 ^A			31,09 ^A		35,80 ^A			30,75 ^A
		32,79 ^A						33,44 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
Średnia z lat	Optymalna	37,67 ^a	33,81 ^a	36,07 ^a	34,07 ^a	35,40 ^A	35,62 ^a	34,57 ^a	38,23 ^a	35,98 ^a	36,10 ^A	33,59 ^a
	Obniżona o 25%	34,02 ^a	38,14 ^a	34,14 ^a	35,68 ^a	35,50 ^A	36,07 ^a	33,07 ^a	37,27 ^a	34,95 ^a	35,34 ^A	35,02 ^a
	Średnie	35,91 ^A		34,99 ^A			34,83 ^A		36,60 ^A			34,31 ^A
		35,45 ^A						35,72 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A- n.i., B- n.i., C- n.i., D- n.i., A×B- n.i., A×C- n.i., A×D- n.i., B×C- n.i., B×D- n.i., C×D- n.i., A×B×C- n.i., A×B×C×D- n.i., B×C×D- n.i.)

Tabela 13. Plon suchej masy [t · ha⁻¹] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	37,11 ^a	43,87 ^a	37,25 ^a	40,85 ^a	41,61 ^a	39,70 ^a	42,80 ^a	39,95 ^a	41,21 ^a
	Średnie	40,49 ^A		39,05 ^A		40,65 ^A		41,38 ^A		41,21 ^A
		39,77 ^A				41,02 ^A				41,21 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 32,72\%$								
2022	Optymalna	32,50 ^a	38,49 ^a	33,22 ^a	38,19 ^a	31,46 ^a	33,33 ^a	31,76 ^a	33,46 ^a	39,43 ^a
	Średnie	35,49 ^{AB}		35,70 ^{AB}		32,39 ^A		32,62 ^{AB}		39,43 ^A
		35,60 ^{AB}				32,51 ^A				39,43 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 35,32\%$								
2023	Optymalna	29,18 ^a	30,31 ^a	30,89 ^a	32,65 ^a	29,61 ^a	32,10 ^a	31,33 ^a	31,67 ^a	29,35 ^a
	Średnie	29,75 ^A		31,77 ^A		30,94 ^A		31,50 ^A		29,35 ^A
		30,76 ^A				31,22 ^A				29,35 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	32,93 ^a	37,56 ^a	33,78 ^a	37,23 ^a	34,22 ^a	35,09 ^a	35,30 ^a	35,03 ^a	36,67 ^a
	Średnie	35,24 ^A		35,51 ^A		34,66 ^A		35,17 ^A		36,67 ^A
		35,38 ^A				34,91 ^A				36,67 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 14. Wysokość roślin [cm] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia			
2021	Optymalna	306,21 ^{d-g}	316,50 ^{gh}	304,92 ^{b-f}	294,83 ^{ab}	305,61 ^B	307,54 ^{d-h}	310,13 ^{e-h}	318,04 ^h	314,42 ^{f-h}	312,53 ^C	295,17 ^a
	Obniżona o 25%	302,08 ^{a-e}	302,83 ^{a-e}	306,00 ^{c-g}	306,21 ^{d-g}	304,28 ^B	298,17 ^{a-d}	300,33 ^{a-e}	297,00 ^{a-d}	292,96 ^a	297,11 ^A	300,67 ^a
	Średnie	306,91 ^B		302,99 ^{AB}			304,04 ^B		305,60 ^B			297,92 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C \times D - \eta_p^2 = 24,48\%$										
2022	Optymalna	295,29 ^{c-e}	301,75 ^{ef}	311,79 ^g	292,88 ^{a-d}	300,43 ^D	291,75 ^{a-d}	285,13 ^a	295,79 ^{de}	306,00 ^{fg}	294,67 ^C	294,08 ^a
	Obniżona o 25%	288,67 ^{a-d}	292,54 ^{a-d}	289,63 ^{a-d}	291,29 ^{a-d}	290,53 ^{AB}	287,33 ^{a-d}	286,46 ^{ab}	286,83 ^{a-c}	289,46 ^{a-d}	287,52 ^A	289,42 ^a
	Średnie	294,56 ^{BC}		296,40 ^C			287,67 ^A		294,52 ^{CB}			291,75 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C - \eta_p^2 = 16,16\%$										
2023	Optymalna	288,92 ^{b-g}	292,88 ^{d-g}	300,67 ^g	286,08 ^{b-f}	292,14 ^C	297,58 ^{a-e}	278,04 ^{a-c}	288,88 ^{b-g}	298,50 ^{fg}	286,25 ^{BC}	286,92 ^a
	Obniżona o 25%	282,54 ^{a-e}	284,50 ^{a-f}	293,71 ^{e-g}	278,79 ^{a-d}	284,89 ^{AB}	275,33 ^{ab}	270,46 ^a	281,13 ^{a-e}	291,29 ^g	279,55 ^A	280,54 ^a
	Średnie	287,21 ^B		289,81 ^B			275,85 ^B		289,95 ^A			283,73 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C - \eta_p^2 = 16,16\%$										
Średnia z lat	Optymalna	296,81 ^{c-e}	303,71 ^{e-f}	305,79 ^f	291,26 ^{a-c}	299,39 ^C	292,95 ^{a-d}	291,10 ^{a-c}	300,90 ^{d-f}	306,31 ^f	297,82 ^C	292,06 ^{a-c}
	Obniżona o 25%	291,10 ^{a-c}	293,29 ^{a-d}	296,44 ^{b-e}	292,10 ^{a-c}	293,23 ^B	286,94 ^a	285,75 ^a	288,32 ^{ab}	292,24 ^{a-c}	288,06 ^A	290,21 ^a
	Średnie	296,22 ^B		296,39 ^B			289,19 ^A		296,69 ^B			291,13 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 1,58\%$		$D - \eta_p^2 = 6,11\%$		$B \times C - \eta_p^2 = 3,2\%$		$B \times C \times D - \eta_p^2 = 0$				
		304,95 ^B					304,82 ^B					297,92 ^A
		295,48 ^B					291,09 ^A					291,75 ^A
		288,51 ^B					282,90 ^A					283,73 ^{AB}
		296,31 ^B					292,94 ^A					291,13 ^A

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 15. Wysokość roślin [cm] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	290,63 ^{ab}	283,96 ^a	304,21 ^{bc}	289,71 ^a	307,63 ^c	296,75 ^{a-c}	304,08 ^{bc}	292,50 ^{ab}	289,67 ^a
	Średnie	287,29 ^A		296,96 ^{BC}		302,19 ^C		298,29 ^{BC}		289,67 ^{AB}
		292,12 ^A				300,24 ^B				289,67 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 10,39\%$								
2022	Optymalna	288,13 ^a	292,29 ^a	286,54 ^a	288,63 ^a	285,67 ^a	288,17 ^a	283,83 ^a	290,96 ^a	283,67 ^a
	Średnie	290,21 ^A		287,58 ^A		286,92 ^A		287,40 ^A		283,67 ^A
		288,90 ^A				287,16 ^A				283,67 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 3,36\%$								
2023	Optymalna	283,83 ^{ab}	282,63 ^{ab}	275,29 ^a	283,00 ^{ab}	282,83 ^{ab}	285,33 ^{ab}	278,00 ^{ab}	288,13 ^b	284,33 ^{ab}
	Średnie	283,23 ^A		279,15 ^A		284,08 ^A		283,06 ^A		284,33 ^A
		281,19 ^A				283,57 ^A				284,33 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 3,50\%$								
Średnia z lat	Optymalna	287,53 ^a	286,29 ^a	288,68 ^a	287,11 ^a	292,04 ^a	290,08 ^a	288,64 ^a	290,53 ^a	285,89 ^a
	Średnie	286,91 ^A		287,90 ^A		291,06 ^A		289,58 ^A		285,89 ^A
		287,40 ^A				290,32 ^B				285,89 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 16. Ilość kolb kukurydzy – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	1,21 ^a	1,17 ^a	1,04 ^a	1,13 ^a	1,14 ^A	1,17 ^a	1,13 ^a	1,29 ^a	1,21 ^a	1,20 ^A	1,04 ^a
	Obniżona o 25%	1,21 ^a	1,13 ^a	1,21 ^a	1,04 ^a	1,15 ^A	1,13 ^a	1,04 ^a	1,17 ^a	1,08 ^a	1,10 ^A	1,17 ^a
	Średnie	1,18 ^A		1,10 ^A			1,11 ^A		1,19 ^A			1,10 ^A
		1,14 ^A						1,15 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
2022	Optymalna	1,29 ^a	1,17 ^a	1,17 ^a	1,17 ^a	1,20 ^A	1,17 ^a	1,17 ^a	1,38 ^a	1,29 ^a	1,25 ^A	1,04 ^a
	Obniżona o 25%	1,25 ^a	1,29 ^a	1,21 ^a	1,13 ^a	1,22 ^A	1,08 ^a	1,21 ^a	1,13 ^a	1,08 ^a	1,13 ^A	1,21 ^a
	Średnie	1,25 ^A		1,17 ^A			1,16 ^A		1,22 ^A			1,13 ^A
		1,21 ^A						1,19 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
2023	Optymalna	1,21 ^a	1,21 ^a	1,13 ^a	1,17 ^a	1,18 ^A	1,25 ^a	1,21 ^a	1,13 ^a	1,33 ^a	1,23 ^A	1,21 ^a
	Obniżona o 25%	1,13 ^a	1,17 ^a	1,21 ^a	1,21 ^a	1,18 ^A	1,25 ^a	1,29 ^a	1,08 ^a	1,25 ^a	1,22 ^A	1,10 ^a
	Średnie	1,18 ^A		1,18 ^A			1,20 ^A		1,25 ^A			1,16 ^A
		1,18 ^A						1,22 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
Średnia z lat	Optymalna	1,24 ^a	1,18 ^a	1,11 ^a	1,15 ^a	1,17 ^A	1,19 ^a	1,17 ^a	1,26 ^a	1,28 ^a	1,22 ^A	1,10 ^a
	Obniżona o 25%	1,19 ^a	1,19 ^a	1,21 ^a	1,13 ^a	1,18 ^A	1,15 ^a	1,18 ^a	1,13 ^a	1,14 ^a	1,15 ^A	1,17 ^a
	Średnie	1,20 ^A		1,50 ^A			1,17 ^A		1,20 ^A			1,13 ^A
		1,35 ^A						1,18 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 17. Ilość kolb kukurydzy – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	1,21 ^a	1,17 ^a	1,04 ^a	1,17 ^a	1,33 ^a	1,13 ^a	1,29 ^a	1,21 ^a	1,04 ^a
	Średnie	1,19 ^A		1,10 ^A		1,23 ^A		1,25 ^A		1,04 ^A
		1,15 ^A				1,24 ^A				1,04 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	1,21 ^a	1,25 ^a	1,21 ^a	1,33 ^a	1,29 ^a	1,33 ^a	1,29 ^a	1,46 ^a	1,04 ^a
	Średnie	1,23 ^A		1,27 ^A		1,31 ^A		1,38 ^A		1,04 ^A
		1,25 ^A				1,34 ^A				1,04 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	1,29 ^a	1,13 ^a	1,08 ^a	1,21 ^a	1,38 ^a	1,38 ^a	1,33 ^a	1,21 ^a	1,42 ^a
	Średnie	1,21 ^A		1,15 ^A		1,38 ^A		1,27 ^A		1,42 ^A
		1,18 ^A				1,32 ^A				1,42 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	1,24 ^a	1,18 ^a	1,11 ^a	1,24 ^a	1,33 ^a	1,28 ^a	1,30 ^a	1,29 ^a	1,17 ^a
	Średnie	1,21 ^A		1,17 ^A		1,31 ^A		1,30 ^A		1,17 ^A
		1,19 ^B				1,30 ^A				1,17 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 18. Stosunek masy zielonej do masy kolb [%] – Czesławic

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	43,63 ^a	44,29 ^a	45,34 ^a	43,48 ^a	44,19 ^A	44,23 ^a	44,05 ^a	45,13 ^a	44,91 ^a	44,58 ^A	44,25 ^a
	Obniżona o 25%	44,72 ^a	43,84 ^a	45,07 ^a	44,59 ^a	44,55 ^A	45,58 ^a	45,71 ^a	43,10 ^a	44,56 ^a	44,74 ^A	44,98 ^a
	Średnie	42,12 ^A		44,62 ^A			44,89 ^A		44,43 ^A			44,62 ^A
		44,37 ^A						44,66 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
2022	Optymalna	44,35 ^{ab}	44,07 ^{ab}	44,44 ^{ab}	45,67 ^{ab}	44,63 ^B	44,72 ^{ab}	44,86 ^{ab}	44,64 ^{ab}	46,34 ^b	45,14 ^B	42,20 ^a
	Obniżona o 25%	44,10 ^{ab}	43,09 ^{ab}	42,31 ^a	43,09 ^{ab}	43,15 ^A	43,72 ^a	43,42 ^a	42,83 ^a	45,12 ^a	43,77 ^{AB}	43,25 ^{ab}
	Średnie	43,90 ^{AB}		43,88 ^{AB}			44,18 ^{AB}		44,73 ^B			42,73 ^A
		43,89 ^{AB}						44,45 ^B				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta_p^2 = 26,66\%$					$B \times C - \eta_p^2 = 17,67\%$					
2023	Optymalna	39,99 ^a	42,85 ^a	42,41 ^a	45,44 ^a	42,67 ^A	46,88 ^a	43,90 ^a	43,10 ^a	40,60 ^a	43,62 ^A	42,60 ^a
	Obniżona o 25%	43,91 ^a	42,79 ^a	40,03 ^a	39,47 ^a	41,55 ^A	41,05 ^a	46,15 ^a	43,93 ^a	42,32 ^a	43,36 ^A	46,68 ^a
	Średnie	42,38 ^A		41,84 ^A			44,50 ^A		42,49 ^A			44,64 ^A
		42,11 ^A						43,49 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
Średnia z lat	Optymalna	42,66 ^a	43,73 ^a	44,06 ^a	44,86 ^a	43,83 ^A	45,27 ^a	44,27 ^a	44,29 ^a	43,95 ^a	44,45 ^A	43,01 ^a
	Obniżona o 25%	44,24 ^a	43,24 ^a	42,47 ^a	42,38 ^a	43,83 ^A	43,45 ^a	45,10 ^a	43,28 ^a	43,99 ^a	43,96 ^A	44,94 ^a
	Średnie	43,47 ^A		43,45 ^A			45,52 ^A		43,88 ^A			43,99 ^A
		43,46 ^A						44,20 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 19. Stosunek masy zielonej do masy kolb [%] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	44,04 ^a	44,70 ^a	44,81 ^a	44,15 ^a	45,55 ^a	44,12 ^a	43,16 ^a	44,28 ^a	42,80 ^a
	Średnie	44,37 ^A		44,48 ^A		44,83 ^A		43,72 ^A		42,80 ^A
		44,43 ^A				44,28 ^A				42,80 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	43,78 ^a	43,40 ^a	45,08 ^a	43,75 ^a	42,85 ^a	43,96 ^a	43,80 ^a	45,34 ^a	42,14 ^a
	Średnie	43,59 ^A		44,42 ^A		43,41 ^A		44,57 ^A		42,14 ^A
		44,00 ^A				43,99 ^A				42,14 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta_p^2 = 20,04\%$								
2023	Optymalna	45,26 ^a	42,64 ^a	43,58 ^a	43,76 ^a	46,13 ^a	43,20 ^a	45,58 ^a	43,34 ^a	42,26 ^a
	Średnie	43,95 ^A		43,67 ^A		44,66 ^a		44,46 ^A		42,26 ^A
		43,81 ^A				44,56 ^A				42,26 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	44,36 ^{ab}	43,58 ^{ab}	44,49 ^{ab}	43,88 ^{ab}	44,85 ^b	43,78 ^{ab}	44,18 ^{ab}	44,42 ^{ab}	42,40 ^a
	Średnie	43,97 ^{AB}		44,19 ^{AB}		44,30 ^B		44,25 ^B		42,40 ^A
		44,08 ^{AB}				44,27 ^{AB}				42,40 ^a
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta_p^2 = 13,10\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 20. Ilość rzędów ziarniaków w kolbach kukurydzy – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	16,00 ^a	16,00 ^a	15,75 ^a	15,92 ^a	15,92 ^A	15,42 ^a	16,25 ^a	16,08 ^a	16,25 ^a	15,90 ^A	15,58 ^a
	Obniżona o 25%	15,83 ^a	16,08 ^a	16,33 ^a	16,58 ^a	16,21 ^A	16,25 ^a	16,17 ^a	16,00 ^a	16,25 ^a	16,17 ^A	15,92 ^a
	Średnie	15,98 ^A		16,15 ^A			16,02 ^A		16,04 ^A			15,75 ^A
		16,06 ^A						16,03 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta_p^2 = 1,31\%$										
2022	Optymalna	16,83 ^a	16,00 ^a	16,42 ^a	16,58 ^a	16,46 ^A	16,42 ^a	16,25 ^a	16,08 ^a	16,33 ^a	16,27 ^A	16,50 ^a
	Obniżona o 25%	16,08 ^a	16,92 ^a	16,17 ^a	16,67 ^a	16,46 ^A	16,58 ^a	16,00 ^a	16,67 ^a	16,83 ^a	16,52 ^A	15,92 ^a
	Średnie	16,46 ^A		16,46 ^A			16,31 ^A		16,48 ^A			16,2 ^A
		16,46 ^A						16,40 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$CxD - \eta_p^2 = 2,04\%$										
2023	Optymalna	16,33 ^a	16,50 ^a	16,58 ^a	15,92 ^a	16,33 ^A	16,25 ^a	16,42 ^a	16,33 ^a	16,42 ^a	16,35 ^A	16,67 ^a
	Obniżona o 25%	16,17 ^a	16,58 ^a	16,42 ^a	16,50 ^a	16,42 ^A	16,50 ^a	16,17 ^a	16,00 ^a	16,58 ^a	16,31 ^A	16,42 ^a
	Średnie	16,40 ^A		16,35 ^A			16,33 ^A		16,33 ^A			16,54 ^A
		16,38 ^A						16,33 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
Średnia z lat	Optymalna	16,39 ^a	16,17 ^a	16,25 ^a	16,14 ^a	16,24 ^A	16,03 ^a	16,30 ^a	16,16 ^a	16,19 ^a	16,17 ^A	16,25 ^a
	Obniżona o 25%	16,03 ^a	16,52 ^a	16,30 ^a	16,58 ^a	16,36 ^A	16,44 ^a	16,11 ^a	16,22 ^a	16,55 ^a	16,33 ^A	16,08 ^a
	Średnie	16,27 ^A		16,32 ^A			16,22 ^A		16,28 ^A			16,16 ^A
		16,30 ^A						16,25 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$CxD - \eta_p^2 = 5,88\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 21. Ilość rzędów ziarniaków w kolbach kukurydzy – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	14,50 ^{ab}	14,33 ^{ab}	14,25 ^a	14,42 ^{ab}	15,75 ^b	14,25 ^a	13,92 ^a	14,08 ^a	13,42 ^a
	Średnie	14,42 ^{AB}		14,33 ^{AB}		15,00 ^B		14,00 ^A		13,42 ^A
		14,38 ^B				14,50 ^B				13,42 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 2,55\%$				$B \times C - \eta_p^2 = 3,12\%$				
2022	Optymalna	14,50 ^{ab}	15,42 ^{ab}	14,25 ^a	15,75 ^b	15,75 ^b	15,58 ^{ab}	14,83 ^{ab}	14,25 ^a	15,00 ^a
	Średnie	14,96 ^{AB}		15,00 ^{AB}		15,67 ^B		14,54 ^A		15,00 ^{AB}
		14,98 ^A				15,10 ^A				15,00 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 2,68\%$				$C - \eta_p^2 = 6,99\%$				
2023	Optymalna	15,58 ^a	15,50 ^a	14,67 ^a	15,25 ^a	14,92 ^a	14,42 ^a	14,67 ^a	14,92 ^a	15,42 ^a
	Średnie	15,54 ^A		14,96 ^A		14,67 ^A		14,79 ^A		15,42 ^A
		15,25 ^A				14,73 ^A				15,42 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	14,86 ^{ab}	15,08 ^{ab}	14,39 ^a	15,14 ^{ab}	15,47 ^b	14,75 ^{ab}	14,47 ^a	14,42 ^a	14,61 ^a
	Średnie	14,67 ^{AB}		14,76 ^{AB}		15,11 ^B		14,44 ^A		14,61 ^{AB}
		14,86 ^A				14,77 ^B				14,61 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 1,53\%$				$C - \eta_p^2 = 1,55\%$				

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 22. Zawartość azotu ogółem w kukurydzy [g N · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia			
2021	Optymalna	16,10 ^{a-d}	16,10 ^{a-d}	17,55 ^{cd}	14,89 ^{a-d}	16,16 ^B	12,88 ^a	15,40 ^{a-d}	18,15 ^d	16,10 ^{a-d}	15,63 ^{AB}	14,69 ^{a-d}
	Obniżona o 25%	13,91 ^{a-c}	12,88 ^a	15,54 ^{a-d}	15,07 ^{a-d}	14,35 ^A	13,91 ^{a-c}	13,86 ^{a-c}	13,16 ^{ab}	15,87 ^{a-d}	14,20 ^A	16,89 ^{b-d}
	Średnie	14,75 ^{AB}		15,76 ^A			14,01 ^B		15,82 ^A			15,75 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 28,33\%$					$D - \eta_p^2 = 23,94\%$			$B \times C \times D - \eta_p^2 = 28,42\%$		
2022	Optymalna	13,91 ^a	14,09 ^a	14,56 ^a	13,35 ^a	13,98 ^B	12,69 ^a	12,79 ^a	12,97 ^a	13,35 ^a	12,95 ^{AB}	12,32 ^a
	Obniżona o 25%	13,53 ^a	13,35 ^a	13,25 ^a	12,04 ^a	13,04 ^{AB}	12,41 ^a	12,41 ^a	12,13 ^a	13,81 ^a	12,69 ^A	13,25 ^a
	Średnie	13,72 ^B		13,30 ^{AB}			12,58 ^A		13,07 ^{AB}			12,79 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		13,51 ^B					12,82 ^A			12,79 ^{AB}		
2023	Optymalna	12,51 ^{ab}	13,07 ^{ab}	12,97 ^{ab}	13,07 ^{ab}	12,90 ^B	13,16 ^b	13,44 ^b	13,07 ^{ab}	13,07 ^{ab}	13,18 ^B	11,76 ^{ab}
	Obniżona o 25%	11,11 ^{ab}	11,11 ^{ab}	11,76 ^{ab}	11,67 ^{ab}	11,41 ^A	11,95 ^{ab}	10,64 ^a	11,48 ^{ab}	11,67 ^{ab}	11,43 ^A	11,95 ^{ab}
	Średnie	11,85 ^A		12,37 ^A			12,30 ^A		12,32 ^A			11,85 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		12,16 ^A					12,31 ^A			11,85 ^A		
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta_p^2 = 52,68\%$										
Średnia z lat	Optymalna	14,17 ^a	14,42 ^a	15,03 ^a	13,77 ^a	14,35 ^A	12,91 ^a	13,87 ^a	14,73 ^a	14,17 ^a	13,92 ^A	12,90 ^a
	Obniżona o 25%	12,85 ^a	12,44 ^a	13,52 ^a	12,93 ^a	12,93 ^A	12,76 ^a	12,30 ^a	12,26 ^a	13,78 ^a	12,77 ^A	14,03 ^a
	Średnie	13,47 ^A		13,81 ^A			12,96 ^A		13,73 ^A			13,46 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		13,64 ^A					13,35 ^A			13,46 ^A		
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta_p^2 = 8,69\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 23. Zawartość azotu ogółem w kukurydzy [g N · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	9,52 ^a	8,69 ^a	9,38 ^a	8,82 ^a	8,82 ^a	10,08 ^a	9,80 ^a	9,52 ^a	9,52 ^a
	Średnie	9,24 ^A		9,10 ^A		9,45 ^A		9,66 ^A		9,52 ^A
		9,17 ^A				9,56 ^A				9,52 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	9,94 ^a	10,08 ^{ab}	12,88 ^{b-d}	11,84 ^{a-c}	14,84 ^d	14,14 ^{cd}	13,30 ^{cd}	12,74 ^{a-d}	12,04 ^{a-d}
	Średnie	10,01 ^A		12,18 ^B		14,49 ^C		13,02 ^{BC}		12,04 ^{AB}
		11,10 ^A				13,76 ^B				12,04 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	14,42 ^{cd}	14,00 ^{bc}	14,70 ^{cd}	12,74 ^a	13,16 ^{ab}	15,12 ^d	15,12 ^d	14,14 ^c	13,02 ^a
	Średnie	14,21 ^{BC}		13,72 ^B		14,14 ^{BC}		14,63 ^C		13,02 ^A
		13,97 ^B				14,39 ^C				13,02 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 73,80\%$				$B \times C - \eta_p^2 = 82,40\%$				
Średnia z lat	Optymalna	11,29 ^a	11,01 ^a	12,32 ^a	11,01 ^a	12,27 ^a	13,11 ^a	12,74 ^a	12,13 ^a	11,53 ^a
	Średnie	11,15 ^A		11,67 ^A		12,69 ^A		12,44 ^A		11,53 ^A
		11,41 ^A				12,56 ^A				11,53 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 24. Zawartość fosforu w kukurydzy [g P · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	4,00 ^{ab}	3,74 ^{ab}	4,53 ^b	3,74 ^{ab}	4,00 ^A	2,46 ^a	3,62 ^{ab}	3,99 ^{ab}	2,92 ^{ab}	3,25 ^A	4,27 ^a
	Obniżona o 25%	3,01 ^{ab}	3,07 ^{ab}	3,52 ^{ab}	3,77 ^{ab}	3,34 ^A	3,92 ^{ab}	3,06 ^{ab}	3,57 ^{ab}	4,23 ^{ab}	3,69 ^A	4,18 ^a
	Średnie	3,59 ^A		3,76 ^A			3,26 ^A		3,68 ^A			4,22 ^A
		3,67 ^A						3,47 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C \times D - \eta_p^2 = 24,48\%$										
2022	Optymalna	1,29 ^a	1,27 ^a	1,31 ^a	1,73 ^a	1,40 ^A	1,19 ^a	1,44 ^a	1,34 ^a	1,16 ^a	1,28 ^A	1,40 ^a
	Obniżona o 25%	1,25 ^a	1,34 ^a	1,22 ^a	1,45 ^a	1,31 ^A	1,21 ^a	1,40 ^a	1,61 ^a	1,25 ^a	1,37 ^A	1,33 ^a
	Średnie	1,29 ^A		1,42 ^A			1,31 ^A		1,34 ^A			1,36 ^A
		1,36 ^A						1,32 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C - \eta_p^2 = 16,16\%$										
023	Optymalna	1,11 ^a	1,37 ^a	1,36 ^a	1,37 ^a	1,30 ^{AB}	1,35 ^a	1,10 ^a	1,18 ^a	1,21 ^a	1,21 ^A	1,56 ^a
	Obniżona o 25%	1,19 ^a	1,18 ^a	1,36 ^a	1,10 ^a	1,21 ^A	1,39 ^a	1,11 ^a	1,46 ^a	1,35 ^a	1,33 ^{AB}	1,37 ^a
	Średnie	1,21 ^A		1,30 ^{AB}			1,24 ^{AB}		1,30 ^{AB}			1,46 ^B
		1,26 ^A						1,27 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
Średnia z lat	Optymalna	2,30 ^a	2,13 ^a	2,22 ^a	2,28 ^a	2,23 ^A	1,66 ^a	2,05 ^a	2,17 ^a	1,76 ^a	1,91 ^A	2,41 ^a
	Obniżona o 25%	1,81 ^a	1,86 ^a	2,03 ^a	2,11 ^a	1,95 ^A	2,17 ^a	1,85 ^a	2,21 ^a	2,27 ^a	2,13 ^A	2,29 ^a
	Średnie	2,02 ^A		2,16 ^A			1,93 ^A		2,10 ^A			2,35 ^A
		2,09 ^A						2,02 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 25. Zawartość fosforu w kukurydzy [g P · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	3,37 ^b	3,18 ^{ab}	3,03 ^{ab}	3,18 ^{ab}	3,24 ^{ab}	2,82 ^a	3,17 ^{ab}	3,09 ^{ab}	3,18 ^{ab}
	Średnie	3,27 ^A		3,11 ^A		3,03 ^A		3,13 ^A		3,18 ^A
		3,19 ^A				3,08 ^A				3,18 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	1,67 ^a	1,79 ^a	1,61 ^a	1,40 ^a	1,47 ^a	1,62 ^a	1,58 ^a	1,67 ^a	1,43 ^a
	Średnie	1,73 ^A		1,50 ^A		1,55 ^A		1,63 ^A		1,43 ^A
		1,62 ^A				1,59 ^A				1,43 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	2,15 ^{ab}	3,38 ^d	3,28 ^{cd}	2,30 ^{a-c}	1,40 ^a	1,41 ^a	1,40 ^a	2,65 ^{b-d}	1,64 ^{ab}
	Średnie	2,76 ^B		2,79 ^B		1,41 ^A		2,03 ^A		1,64 ^A
		2,78 ^B				1,72 ^A				1,64 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 21,29\%$			C – $\eta^2_p = 34,71\%$			B×C – $\eta^2_p = 67,57\%$		
Średnia z lat	Optymalna	2,39 ^a	2,78 ^a	2,39 ^a	2,29 ^a	2,03 ^a	1,95 ^a	2,05 ^a	2,47 ^a	2,08 ^a
	Średnie	2,58 ^A		2,46 ^A		1,99 ^A		2,26 ^A		2,08 ^A
		2,52 ^A				2,12 ^A				2,08 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 26. Zawartość potasu w kukurydzy [g K · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	23,73 ^a	29,72 ^{ab}	28,08 ^{ab}	29,48 ^{ab}	27,75 ^A	31,32 ^{ab}	27,45 ^{ab}	26,40 ^{ab}	22,93 ^a	27,03 ^A	35,00 ^{ab}
	Obniżona o 25%	37,77 ^b	39,17 ^b	37,80 ^b	25,58 ^{ab}	35,08 ^B	34,42 ^{ab}	26,20 ^{ab}	25,58 ^{ab}	28,63 ^{ab}	28,71 ^A	38,40 ^b
	Średnie	32,60 ^{BC}		30,24 ^{A-C}			29,85 ^{AB}		25,89 ^A			36,70 ^C
		31,42 ^B						27,87 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta^2_p = 13,84\%$					$D - \eta^2_p = 25,80\%$			$B \times C - \eta^2_p = 19,04\%$		
2022	Optymalna	32,33 ^a	35,00 ^a	33,23 ^a	30,98 ^a	32,89 ^A	35,52 ^a	33,45 ^a	33,62 ^a	32,83 ^a	33,85 ^A	38,87 ^a
	Obniżona o 25%	36,30 ^a	37,92 ^a	38,45 ^a	34,65 ^a	36,83 ^{AB}	38,18 ^a	36,90 ^a	36,77 ^a	41,13 ^a	38,25 ^B	35,12 ^a
	Średnie	35,39 ^A		34,33 ^A			36,01 ^A		36,09 ^A			36,99 ^A
		34,86 ^A						36,05 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta^2_p = 25,16\%$										
2023	Optymalna	10,95 ^a	16,65 ^{ab}	17,75 ^{ab}	17,38 ^{ab}	15,68 ^A	21,65 ^b	22,07 ^b	24,60 ^b	18,37 ^{ab}	21,67 ^B	20,10 ^{ab}
	Obniżona o 25%	17,32 ^{ab}	18,15 ^{ab}	19,03 ^{ab}	15,75 ^{ab}	17,56 ^A	21,53 ^b	18,03 ^{ab}	19,23 ^{ab}	18,95 ^{ab}	19,44 ^{AB}	20,45 ^{ab}
	Średnie	15,77 ^A		17,48 ^{AB}			20,82 ^B		20,29 ^B			20,28 ^B
		16,62 ^A						20,55 ^B				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta^2_p = 6,9\%$										
Średnia z lat	Optymalna	22,34 ^a	27,12 ^a	26,35 ^a	25,95 ^a	25,44 ^A	29,49 ^a	27,65 ^a	28,20 ^a	24,71 ^a	27,51 ^A	31,32 ^a
	Obniżona o 25%	30,46 ^a	31,74 ^a	31,76 ^a	25,32 ^a	29,82 ^A	31,37 ^a	27,04 ^a	27,19 ^a	29,57 ^a	28,79 ^A	31,32 ^a
	Średnie	27,91 ^A		27,35 ^A			28,89 ^A		27,42 ^A			31,32 ^A
		27,63 ^A						28,16 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 27. Zawartość potasu w kukurydzy [g K· kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	17,28 ^a	19,38 ^a	19,75 ^a	18,90 ^a	29,45 ^b	18,30 ^a	22,35 ^{ab}	16,48 ^a	19,18 ^a
	Średnie	18,33 ^A		19,33 ^{AB}		23,88 ^B		19,41 ^{AB}		19,18 ^{AB}
		18,83 ^A				21,64 ^A				19,18 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 55,32\%$								
2022	Optymalna	41,90 ^a	49,20 ^b	48,75 ^b	50,73 ^b	53,43 ^b	53,93 ^b	54,73 ^b	54,63 ^b	50,33 ^b
	Średnie	45,55 ^A		49,74 ^B		53,68 ^C		54,68 ^C		50,33 ^{BC}
		47,64 ^A				54,18 ^B				50,33 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 33,84\%$				C – $\eta^2_p = 45,03\%$				
2023	Optymalna	26,20 ^{ab}	24,45 ^{ab}	27,98 ^b	28,40 ^b	21,23 ^a	24,10 ^{ab}	21,30 ^a	28,43 ^b	23,87 ^{ab}
	Średnie	25,33 ^{AB}		28,19 ^B		22,66 ^A		24,86 ^{AB}		23,87 ^A
		26,76 ^B				23,76 ^A				23,87 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 36,85\%$				C – $\eta^2_p = 53,67\%$				
Średnia z lat	Optymalna	28,45 ^a	31,00 ^a	32,15 ^a	32,67 ^a	34,70 ^a	32,10 ^a	32,79 ^a	33,17 ^a	31,12 ^a
	Średnie	29,73 ^A		32,41 ^A		33,40 ^A		32,98 ^A		31,12 ^A
		31,07 ^A				33,19 ^A				31,12 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 28. Zawartość magnezu w kukurydzy [g Mg · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola	
		30% popiołu					40% popiołu						
		Źródło wapnia w nawozie (B)											
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄				
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)											
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia		
2021	Optymalna	2,87 ^a	3,47 ^a	3,58 ^a	2,95 ^a	3,22 ^A	3,31 ^a	3,36 ^a	3,16 ^a	3,59 ^a	3,35 ^A	2,87 ^a	
	Obniżona o 25%	3,24 ^a	3,73 ^a	2,90 ^a	2,77 ^a	3,16 ^A	2,85 ^a	2,82 ^a	3,06 ^a	2,82 ^a	2,89 ^A	2,86 ^a	
	Średnie	3,33 ^A		3,05 ^A			3,08 ^A		3,16 ^A			2,86 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		3,19 ^A						3,12 ^A					2,86 ^A
2022	Optymalna	1,56 ^a	1,53 ^a	1,62 ^a	1,54 ^a	1,56 ^A	1,75 ^a	1,92 ^a	1,42 ^a	1,70 ^a	1,70 ^A	1,44 ^a	
	Obniżona o 25%	1,49 ^a	1,63 ^a	1,43 ^a	1,34 ^a	1,47 ^A	2,20 ^a	1,64 ^a	1,61 ^a	1,53 ^a	1,74 ^A	1,57 ^a	
	Średnie	1,55 ^A		1,48 ^A			1,88 ^A		1,56 ^A			1,50 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		1,52 ^A						1,72 ^A					1,50 ^A
2023	Optymalna	2,05 ^a	3,35 ^b	3,35 ^b	2,70 ^{ab}	2,86 ^{AB}	3,38 ^b	3,63 ^b	3,33 ^b	3,43 ^b	3,45 ^C	3,32 ^a	
	Obniżona o 25%	2,82 ^{ab}	2,72 ^{ab}	2,85 ^{ab}	2,77 ^{ab}	2,79 ^A	3,28 ^{ab}	3,17 ^{ab}	3,62 ^b	3,13 ^{ab}	3,30 ^{BC}	2,77 ^{ab}	
	Średnie	2,73 ^A		2,92 ^{AB}			3,37 ^B		3,38 ^B			3,04 ^{AB}	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		2,83 ^A						3,37 ^B					3,04 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C - \eta^2_p = 19,71\%$						$B \times C \times D - \eta^2_p = 19,35\%$					
Średnia z lat	Optymalna	2,16 ^a	2,78 ^a	2,85 ^a	2,39 ^a	2,54 ^A	2,81 ^a	2,97 ^a	2,63 ^a	2,90 ^a	2,83 ^A	2,53 ^a	
	Obniżona o 25%	2,15 ^a	2,69 ^a	2,39 ^a	2,29 ^a	2,47 ^A	2,77 ^a	2,53 ^a	2,75 ^a	2,59 ^a	2,64 ^A	2,39 ^a	
	Średnie	2,53 ^A		2,48 ^A			2,77 ^A		2,69 ^A			2,46 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		2,51 ^A						2,73 ^A					2,46 ^A

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 29. Zawartość magnezu w kukurydzy [g Mg · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10			
2021	Optymalna	3,55 ^{a-c}	3,16 ^{ab}	3,42 ^{ab}	2,98 ^a	3,74 ^{bc}	4,06 ^c	3,74 ^{bc}	3,45 ^{a-c}	3,15 ^{ab}
	Średnie	3,35 ^{AB}		3,20 ^A		3,90 ^C		3,59 ^{BC}		3,15 ^{AB}
		3,28 ^A				3,74 ^B				3,15 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 26,61\%$				C – $\eta^2_p = 37,42\%$				
2022	Optymalna	1,79 ^a	1,69 ^a	2,03 ^{ab}	1,82 ^a	1,94 ^{ab}	2,06 ^{ab}	2,36 ^b	1,89 ^{ab}	1,63 ^a
	Średnie	1,74 ^A		1,93 ^{AB}		2,00 ^{AB}		2,13 ^B		1,63 ^A
		1,83 ^A				2,06 ^B				1,63 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 21,37\%$				B×C – $\eta^2_p = 32,56\%$				
2023	Optymalna	3,65 ^{a-c}	3,30 ^{ab}	3,75 ^{bc}	3,40 ^{a-c}	3,25 ^{ab}	3,68 ^{bc}	3,88 ^c	3,85 ^c	3,15 ^a
	Średnie	3,48 ^{AB}		3,58 ^{BC}		3,46 ^{AB}		3,86 ^C		3,15 ^A
		3,53 ^B				3,66 ^B				3,15 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 38,96\%$				C – $\eta^2_p = 45,35\%$				
Średnia z lat	Optymalna	2,99 ^a	2,71 ^a	3,06 ^a	2,73 ^a	2,97 ^a	3,26 ^a	3,32 ^a	3,06 ^a	2,64 ^a
	Średnie	2,85 ^A		2,90 ^A		3,11 ^A		3,19 ^A		2,64 ^A
		2,87 ^A				3,15 ^A				2,64 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 30. Zawartość wapnia w kukurydzy [g Ca · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia			
2021	Optymalna	2,59 ^a	4,93 ^a	4,77 ^a	4,59 ^a	4,22 ^A	5,15 ^a	3,73 ^a	3,77 ^a	4,42 ^a	4,27 ^A	4,54 ^a
	Obniżona o 25%	5,73 ^a	3,83 ^a	5,37 ^a	3,33 ^a	4,57 ^A	4,39 ^a	3,41 ^a	4,52 ^a	3,95 ^a	4,07 ^A	3,49 ^a
	Średnie	4,27 ^A		4,52 ^A			4,17 ^A		4,17 ^A			4,02 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C×D – $\eta_p^2 = 20,86\%$										
2022	Optymalna	4,89 ^a	4,10 ^a	3,91 ^a	4,57 ^a	4,37 ^A	4,18 ^a	4,69 ^a	3,12 ^a	4,14 ^a	4,03 ^A	4,33 ^a
	Obniżona o 25%	4,36 ^a	3,85 ^a	4,21 ^a	4,67 ^a	4,27 ^A	3,42 ^a	5,82 ^a	5,70 ^a	3,05 ^a	4,50 ^A	3,57 ^a
	Średnie	4,30 ^A		4,34 ^A			4,53 ^A		4,00 ^A			3,95 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B×C – $\eta_p^2 = 21,13\%$					B×C×D – $\eta_p^2 = 24,19\%$					
2023	Optymalna	1,27 ^a	2,17 ^a	1,61 ^a	1,31 ^a	1,59 ^A	1,64 ^a	1,51 ^a	1,80 ^a	1,45 ^a	1,60 ^A	1,16 ^a
	Obniżona o 25%	0,99 ^a	1,71 ^a	2,28 ^a	1,37 ^a	1,59 ^A	1,29 ^a	1,23 ^a	1,83 ^a	1,23 ^a	1,39 ^A	1,45 ^a
	Średnie	1,54 ^A		1,65 ^A			1,42 ^A		1,58 ^A			1,31 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B×C – $\eta_p^2 = 23,24\%$										
Średnia z lat	Optymalna	2,92 ^a	3,73 ^a	3,43 ^a	3,49 ^a	3,39 ^A	3,65 ^a	3,31 ^a	2,90 ^a	3,34 ^a	3,30 ^A	3,34 ^a
	Obniżona o 25%	3,69 ^a	3,13 ^a	3,95 ^a	3,12 ^a	3,47 ^A	3,03 ^a	3,48 ^a	4,01 ^a	2,74 ^a	3,32 ^A	2,84 ^a
	Średnie	3,37 ^A		3,50 ^A			3,37 ^A		3,25 ^A			3,09 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		3,43 ^A / 3,31 ^A										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 31. Zawartość wapnia w kukurydzy [g Ca · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	3,71 ^a	3,24 ^a	3,80 ^a	1,96 ^a	2,57 ^a	3,65 ^a	3,75 ^a	3,03 ^a	2,44 ^a
	Średnie	3,48 ^A		2,88 ^A		3,11 ^A		3,39 ^A		2,44 ^A
		3,18 ^A				3,25 ^A				2,44 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	3,78 ^a	5,04 ^a	5,06 ^a	4,63 ^a	5,47 ^a	4,71 ^a	4,86 ^a	4,59 ^a	3,89 ^a
	Średnie	4,41 ^A		4,85 ^A		5,09 ^A		4,73 ^A		3,89 ^A
		4,63 ^A				4,91 ^A				3,89 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	1,52 ^{ab}	1,60 ^{ab}	3,00 ^c	2,45 ^{bc}	1,10 ^a	2,26 ^{a-c}	1,15 ^{ab}	1,84 ^{a-c}	1,84 ^{a-c}
	Średnie	1,56 ^A		2,73 ^B		1,68 ^A		1,50 ^A		1,84 ^{AB}
		2,14 ^B				1,59 ^A				1,84 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta^2_p = 27,60\%$				$C - \eta^2_p = 41,97\%$				
Średnia z lat	Optymalna	3,00 ^a	3,29 ^a	3,95 ^a	3,01 ^a	3,05 ^a	3,54 ^a	3,25 ^a	3,15 ^a	2,72 ^a
	Średnie	3,15 ^A		3,48 ^A		3,29 ^A		3,20 ^A		2,72 ^A
		3,31 ^A				3,24 ^A				2,72 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 32. Zawartość siarki w kukurydzy [g SO₄ · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia			
2021	Optymalna	0,129 ^a	0,094 ^a	0,145 ^a	0,094 ^a	0,116 ^A	0,161 ^a	0,103 ^a	0,140 ^a	0,148 ^a	0,138 ^A	0,163 ^a
	Obniżona o 25%	0,133 ^a	0,141 ^a	0,182 ^a	0,140 ^a	0,149 ^A	0,128 ^a	0,132 ^a	0,138 ^a	0,132 ^a	0,132 ^A	0,180 ^a
	Średnie	0,124 ^A		0,140 ^A			0,131 ^A		0,140 ^A			0,172 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		0,132 ^A					0,135 ^{AB}					0,172 ^A
2022	Optymalna	0,133 ^a	0,120 ^a	0,127 ^a	0,130 ^a	0,127 ^A	0,126 ^a	0,134 ^a	0,132 ^a	0,127 ^a	0,130 ^A	0,130 ^a
	Obniżona o 25%	0,119 ^a	0,129 ^a	0,129 ^a	0,131 ^a	0,127 ^A	0,129 ^a	0,128 ^a	0,119 ^a	0,126 ^a	0,125 ^A	0,124 ^a
	Średnie	0,125 ^A		0,129 ^A			0,129 ^A		0,126 ^A			0,127 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		0,127 ^A					0,128 ^A					0,127 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B×C×D- $\eta^2_p = 15,35\%$										
2023	Optymalna	0,162 ^a	0,158 ^a	0,154 ^a	0,147 ^a	0,156 ^A	0,154 ^a	0,145 ^a	0,156 ^a	0,159 ^a	0,154 ^A	0,144 ^a
	Obniżona o 25%	0,139 ^a	0,145 ^a	0,149 ^a	0,131 ^a	0,141 ^A	0,139 ^a	0,160 ^a	0,154 ^a	0,136 ^a	0,147 ^A	0,139 ^a
	Średnie	0,151 ^A		0,145 ^A			0,150 ^A		0,151 ^A			0,141 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		0,148 ^A					0,151 ^A					0,141 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D- $\eta^2_p = 19,62\%$					B×C×D- $\eta^2_p = 16,94\%$					
Średnia z lat	Optymalna	0,141 ^a	0,124 ^a	0,142 ^a	0,124 ^a	0,132 ^A	0,147 ^a	0,127 ^a	0,142 ^a	0,145 ^a	0,140 ^A	0,145 ^a
	Obniżona o 25%	0,130 ^a	0,138 ^a	0,153 ^a	0,134 ^a	0,139 ^A	0,132 ^a	0,139 ^a	0,137 ^a	0,131 ^a	0,135 ^A	0,147 ^a
	Średnie	0,133 ^A		0,138 ^A			0,136 ^A		0,139 ^A			0,146 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		0,136 ^A					0,138 ^A					0,146 ^A

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 33. Zawartość siarki w kukurydzy [g SO₄·kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	0,150 ^a	0,187 ^a	0,149 ^a	0,148 ^a	0,124 ^a	0,138 ^a	0,190 ^a	0,150 ^a	0,154 ^a
	Średnie	0,168 ^A		0,148 ^A		0,131 ^A		0,170 ^A		0,154 ^A
		0,158 ^A				0,151 ^A				0,154 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 32,72\%$								
2022	Optymalna	0,137 ^a	0,151 ^a	0,154 ^a	0,160 ^a	0,150 ^a	0,154 ^a	0,157 ^a	0,149 ^a	0,149 ^a
	Średnie	0,144 ^A		0,157 ^A		0,152 ^A		0,153 ^A		0,149 ^A
		0,150 ^A				0,152 ^A				0,149 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	0,138 ^a	0,112 ^a	0,132 ^a	0,142 ^a	0,143 ^a	0,149 ^a	0,153 ^a	0,138 ^a	0,110 ^a
	Średnie	0,125 ^{AB}		0,137 ^{AB}		0,146 ^B		0,145 ^B		0,110 ^A
		0,131 ^{AB}				0,146 ^B				0,110 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	0,141 ^a	0,149 ^a	0,145 ^a	0,149 ^a	0,139 ^a	0,147 ^a	0,166 ^a	0,145 ^a	0,137 ^a
	Średnie	0,145 ^A		0,147 ^A		0,145 ^A		0,156 ^A		0,137 ^A
		0,146 ^A				0,149 ^A				0,137 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 34. Zawartość sodu w kukurydzy [mg Na · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	0,257 ^{ab}	0,230 ^{ab}	0,373 ^b	0,223 ^a	0,271 ^B	0,217 ^a	0,239 ^{ab}	0,242 ^{ab}	0,208 ^a	0,227 ^{AB}	0,310 ^{ab}
	Obniżona o 25%	0,238 ^{ab}	0,224 ^{ab}	0,295 ^{ab}	0,222 ^a	0,245 ^{AB}	0,233 ^{ab}	0,192 ^a	0,179 ^a	0,210 ^a	0,204 ^A	0,276 ^{ab}
	Średnie	0,237 ^{AB}		0,278 ^B			0,220 ^A		0,210 ^A			0,293 ^B
		0,258 ^B						0,215 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 23,63\%$										
2022	Optymalna	0,036 ^a	0,038 ^a	0,035 ^a	0,033 ^a	0,036 ^A	0,037 ^a	0,034 ^a	0,033 ^a	0,034 ^a	0,035 ^A	0,039 ^a
	Obniżona o 25%	0,039 ^a	0,036 ^a	0,036 ^a	0,034 ^a	0,036 ^A	0,033 ^a	0,042 ^a	0,037 ^a	0,033 ^a	0,036 ^A	0,034 ^a
	Średnie	0,037 ^A		0,035 ^A			0,037 ^A		0,034 ^A			0,037 ^A
		0,036 ^A						0,036 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\eta^2_p = 13,18\%$										
2023	Optymalna	0,368 ^a	0,363 ^a	0,396 ^a	0,348 ^a	0,369 ^A	0,359 ^a	0,371 ^a	0,401 ^a	0,398 ^a	0,382 ^A	0,355 ^a
	Obniżona o 25%	0,286 ^a	0,335 ^a	0,321 ^a	0,346 ^a	0,322 ^A	0,377 ^a	0,332 ^a	0,334 ^a	0,343 ^a	0,346 ^A	0,397 ^a
	Średnie	0,338 ^A		0,353 ^A			0,360 ^A		0,369 ^A			0,376 ^A
		0,346 ^A						0,364 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\eta^2_p = 13,18\%$										
Średnia z lat	Optymalna	0,220 ^a	0,210 ^a	0,268 ^a	0,201 ^a	0,225 ^A	0,204 ^a	0,215 ^a	0,225 ^a	0,213 ^a	0,214 ^A	0,235 ^a
	Obniżona o 25%	0,188 ^a	0,199 ^a	0,217 ^a	0,201 ^a	0,201 ^A	0,214 ^a	0,189 ^a	0,183 ^a	0,195 ^a	0,195 ^A	0,236 ^a
	Średnie	0,204 ^A		0,222 ^A			0,205 ^A		0,204 ^A			0,235 ^A
		0,213 ^A						0,205 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 35. Zawartość sodu w kukurydzy [$\text{mg Na} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	0,185 ^{ab}	0,197 ^b	0,169 ^{ab}	0,175 ^{ab}	0,172 ^{ab}	0,163 ^a	0,186 ^{ab}	0,159 ^a	0,165 ^a
	Średnie	0,191 ^B		0,172 ^{AB}		0,167 ^A		0,172 ^{AB}		0,165 ^A
		0,181 ^A				0,170 ^A				0,165 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 35,11\%$								
2022	Optymalna	0,031 ^{ab}	0,035 ^b	0,032 ^{ab}	0,035 ^b	0,032 ^{ab}	0,033 ^{ab}	0,032 ^{ab}	0,035 ^b	0,029 ^a
	Średnie	0,033 ^B		0,033 ^B		0,032 ^{AB}		0,033 ^B		0,029 ^A
		0,033 ^B				0,033 ^B				0,029 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 50,13\%$								
2023	Optymalna	0,418 ^{de}	0,351 ^{bc}	0,379 ^{cd}	0,434 ^e	0,298 ^a	0,376 ^{cd}	0,329 ^{ab}	0,350 ^{bc}	0,338 ^{a-c}
	Średnie	0,384 ^B		0,407 ^B		0,337 ^A		0,340 ^A		0,338 ^A
		0,395 ^B				0,338 ^A				0,338 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 62,24\%$				$B \times C - \eta_p^2 = 75,01\%$				
Średnia z lat	Optymalna	0,211 ^a	0,194 ^a	0,193 ^a	0,214 ^a	0,167 ^a	0,190 ^a	0,182 ^a	0,181 ^a	0,177 ^a
	Średnie	0,202 ^A		0,204 ^A		0,178 ^A		0,181 ^A		0,177 ^A
		0,203 ^A				0,180 ^A				0,177 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 36. Zawartość cynku w kukurydzy [mg Zn · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	60,67 ^{ab}	45,43 ^{ab}	57,67 ^{ab}	48,40 ^{ab}	53,04 ^A	35,17 ^{ab}	61,47 ^{ab}	22,37 ^a	75,97 ^b	48,74 ^A	56,37 ^{ab}
	Obniżona o 25%	52,73 ^{ab}	53,53 ^{ab}	70,17 ^{ab}	62,57 ^{ab}	59,75 ^A	50,93 ^{ab}	67,13 ^{ab}	53,53 ^{ab}	48,43 ^{ab}	55,01 ^A	55,17 ^{ab}
	Średnie	53,09 ^A		59,70 ^A			53,68 ^A		50,08 ^A			55,77 ^A
		56,40 ^A						51,88 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 26,29\%$					$C \times D - \eta_p^2 = 16,28\%$					
2022	Optymalna	14,53 ^a	6,30 ^a	7,63 ^a	6,83 ^a	8,83 ^A	8,60 ^a	8,13 ^a	5,80 ^a	6,23 ^a	7,19 ^A	10,97 ^a
	Obniżona o 25%	8,73 ^a	13,50 ^a	13,67 ^a	6,37 ^a	10,57 ^A	10,33 ^a	8,73 ^a	35,53 ^a	12,97 ^a	16,89 ^A	5,30 ^a
	Średnie	10,77 ^A		8,63 ^A			8,95 ^A		15,13 ^A			8,13 ^A
		9,70 ^A						12,04 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 27,97\%$										
2023	Optymalna	30,23 ^a	33,33 ^{ab}	34,07 ^{ab}	31,33 ^a	32,24 ^A	42,13 ^b	34,03 ^{ab}	37,30 ^{ab}	32,13 ^{ab}	36,40 ^A	33,00 ^{ab}
	Obniżona o 25%	33,53 ^{ab}	32,57 ^{ab}	34,47 ^{ab}	32,63 ^{ab}	33,30 ^A	38,27 ^{ab}	31,50 ^a	33,60 ^{ab}	32,90 ^{ab}	34,07 ^A	32,17 ^{ab}
	Średnie	32,42 ^A		33,13 ^{AB}			36,48 ^B		33,98 ^{AB}			32,58 ^{AB}
		32,77 ^A						35,23 ^B				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 27,97\%$										
Średnia z lat	Optymalna	35,14 ^a	28,35 ^a	33,12 ^a	28,85 ^a	31,37 ^A	28,63 ^a	34,54 ^a	21,82 ^a	38,11 ^a	30,78 ^A	33,44 ^a
	Obniżona o 25%	31,66 ^a	33,20 ^a	39,43 ^a	33,85 ^a	34,54 ^A	33,17 ^a	35,79 ^a	40,88 ^a	34,43 ^a	35,32 ^A	30,87 ^a
	Średnie	32,09 ^A		33,82 ^A			33,04 ^A		33,06 ^A			32,16 ^A
		32,95 ^A						33,05 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie

Tabela 37. Zawartość cynku w kukurydzy [mg Zn · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	71,0 ^b	60,05 ^{ab}	53,90 ^a	62,90 ^{ab}	59,90 ^{ab}	66,00 ^b	70,75 ^b	67,65 ^b	66,80 ^a
	Średnie	65,58 ^A		58,40 ^B		62,95 ^{AB}		69,20 ^A		66,80 ^{AB}
		61,99 ^A				66,08 ^A				66,80 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C - \eta_p^2 = 55,12\%$								
2022	Optymalna	45,20 ^a	18,25 ^a	15,05 ^a	6,55 ^a	21,45 ^a	24,15 ^a	26,95 ^a	21,35 ^a	14,80 ^a
	Średnie	31,72 ^A		10,80 ^A		22,80 ^A		24,15 ^A		14,80 ^A
		21,26 ^A				23,48 ^A				14,80 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	36,85 ^a	43,95 ^a	45,90 ^a	41,20 ^a	39,35 ^a	38,00 ^a	36,35 ^a	44,40 ^a	52,00 ^a
	Średnie	40,40 ^A		43,55 ^A		38,68 ^A		40,38 ^A		52,00 ^A
		41,98 ^A				39,53 ^A				52,00 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	51,05 ^a	40,75 ^a	38,28 ^a	36,88 ^a	40,23 ^a	42,72 ^a	44,68 ^a	44,47 ^a	44,53 ^a
	Średnie	45,90 ^A		37,78 ^A		41,47 ^A		44,57 ^A		44,53 ^A
		41,74 ^A				43,02 ^A				44,53 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 38. Zawartość manganu w kukurydzy [mg Mn · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia			
2021	Optymalna	29,00 ^a	45,33 ^a	41,33 ^a	40,33 ^a	39,00 ^A	46,67 ^a	35,33 ^a	41,00 ^a	37,67 ^a	40,17 ^A	47,33 ^a
	Obniżona o 25%	39,00 ^a	32,00 ^a	36,67 ^a	33,00 ^a	35,17 ^A	42,00 ^a	37,67 ^a	40,33 ^a	36,33 ^a	39,08 ^A	34,00 ^a
	Średnie	36,33 ^A		37,83 ^A			40,42 ^A		38,83 ^A			40,67 ^A
		37,08 ^A						39,63 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
2022	Optymalna	3,33 ^a	5,33 ^{ab}	3,00 ^a	5,67 ^{ab}	4,33 ^A	7,33 ^{ab}	4,67 ^{ab}	4,00 ^a	3,33 ^a	4,83 ^A	5,33 ^{ab}
	Obniżona o 25%	5,00 ^{ab}	5,00 ^{ab}	4,00 ^a	1,67 ^a	4,92 ^A	5,33 ^{ab}	4,00 ^a	8,67 ^{ab}	5,67 ^{ab}	5,92 ^A	16,70 ^b
	Średnie	4,67 ^A		5,38 ^A			5,33 ^{AB}		5,42 ^{AB}			11,02 ^B
		4,13 ^A						5,38 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
2023	Optymalna	15,33 ^a	17,00 ^a	15,33 ^a	14,67 ^a	15,58 ^A	20,33 ^a	18,33 ^a	20,67 ^a	15,33 ^a	18,67 ^A	17,00 ^a
	Obniżona o 25%	15,00 ^a	16,33 ^a	17,00 ^a	15,00 ^a	15,83 ^A	16,00 ^a	16,00 ^a	15,00 ^a	16,00 ^a	15,75 ^A	17,33 ^a
	Średnie	15,92 ^A		15,50 ^A			17,67 ^A		16,75 ^A			17,17 ^A
		15,71 ^A						17,21 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
Średnia z lat	Optymalna	15,88 ^a	22,55 ^a	19,88 ^a	20,22 ^a	19,63 ^A	24,77 ^a	19,44 ^a	21,88 ^a	18,77 ^a	21,22 ^A	23,22 ^a
	Obniżona o 25%	19,66 ^a	17,77 ^a	19,22 ^a	16,55 ^a	18,30 ^A	21,11 ^a	19,22 ^a	21,33 ^a	19,33 ^a	20,25 ^A	22,67 ^a
	Średnie	18,97 ^A		18,97 ^A			21,14 ^A		20,33 ^A			22,95 ^A
		18,97 ^A						20,74 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 39. Zawartość manganu w kukurydzy [mg Mn · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	155,00 ^b	105,50 ^{ab}	150,00 ^b	92,50 ^{ab}	107,00 ^{ab}	54,00 ^a	101,50 ^{ab}	65,00 ^b	122,50 ^{ab}
	Średnie	130,25 ^B		121,25 ^{AB}		80,50 ^A		83,50 ^A		122,50 ^{AB}
		125,70 ^A				82,00 ^A				122,50 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \Pi_p^2 = 57,56\%$								
2022	Optymalna	47,00 ^{bc}	28,00 ^a	39,50 ^{a-c}	30,00 ^a	30,50 ^a	45,50 ^{bc}	48,00 ^{bc}	51,00 ^c	35,50 ^{ab}
	Średnie	37,50 ^A		34,75 ^A		38,00 ^A		49,50 ^B		35,50 ^A
		36,13 ^A				43,75 ^B				35,50 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \Pi_p^2 = 63,30\%$								
2023	Optymalna	31,00 ^{ab}	36,00 ^b	36,00 ^b	28,50 ^{ab}	23,00 ^a	21,50 ^a	21,50 ^a	28,00 ^{ab}	26,00 ^{ab}
	Średnie	33,50 ^B		32,25 ^B		22,25 ^A		24,75 ^A		26,00 ^{AB}
		32,88 ^B				23,50 ^A				26,00 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C - \Pi_p^2 = 35,85\%$								
Średnia z lat	Optymalna	77,66 ^a	56,50 ^a	75,16 ^a	50,33 ^a	53,50 ^a	40,33 ^a	57,00 ^a	48,16 ^a	61,33 ^a
	Średnie	67,08 ^A		62,75 ^A		46,16 ^A		52,58 ^A		61,33 ^A
		64,91 ^A				49,75 ^A				61,33 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 40. Zawartość miedzi w kukurydzy [$\text{mg Cu} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	4,30 ^a	6,00 ^{ab}	5,63 ^{ab}	5,83 ^{ab}	5,40 ^A	8,17 ^b	5,63 ^{ab}	7,00 ^{ab}	8,37 ^b	7,29 ^B	6,80 ^{ab}
	Obniżona o 25%	4,30 ^a	4,30 ^a	6,10 ^{ab}	5,63 ^{ab}	5,08 ^A	6,33 ^{ab}	5,23 ^{ab}	8,17 ^b	3,80 ^a	5,96 ^{AB}	4,00 ^a
	Średnie	4,73 ^B		5,80 ^{AB}			6,42 ^A		6,83 ^a			5,40 ^{AB}
		5,26 ^A						6,63 ^B				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 11,06\%$		C – $\eta^2_p = 25,93\%$		D – $\eta^2_p = 22,12\%$		Cx D – $\eta^2_p = 15,74\%$		BxCxD – $\eta^2_p = 25,19\%$		
2022	Optymalna	6,80 ^a	5,27 ^a	5,23 ^a	6,13 ^a	5,86 ^A	6,23 ^a	6,73 ^a	5,57 ^a	5,47 ^a	6,00 ^{AB}	7,37 ^a
	Obniżona o 25%	7,93 ^a	6,47 ^a	7,93 ^a	6,37 ^a	7,18 ^B	5,93 ^a	5,33 ^a	5,57 ^a	6,83 ^a	5,92 ^{AB}	6,47 ^a
	Średnie	6,62 ^A		6,42 ^A			6,06 ^A		5,86 ^A			6,92 ^A
		6,52 ^A						5,96 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
2023	Optymalna	13,67 ^a	15,33 ^{ab}	14,67 ^a	14,33 ^a	14,50 ^A	21,00 ^b	14,00 ^a	14,33 ^a	15,00 ^{ab}	16,08 ^A	15,0 ^{ab}
	Obniżona o 25%	14,00 ^a	14,00 ^a	17,00 ^{ab}	13,33 ^a	14,58 ^A	14,00 ^a	13,33 ^a	14,33 ^a	14,67 ^a	14,08 ^A	13,3 ^a
	Średnie	14,25 ^A		14,83 ^A			15,58 ^A		14,58 ^A			14,17 ^A
		14,54 ^A						15,08 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		BxC – $\eta^2_p = 20,85\%$					BxD – $\eta^2_p = 10,30\%$					
Średnia z lat	Optymalna	8,25 ^a	8,86 ^a	8,51 ^a	8,76 ^a	8,60 ^A	11,80 ^a	8,79 ^a	8,97 ^a	9,61 ^a	9,79 ^A	9,72 ^a
	Obniżona o 25%	8,74 ^a	8,25 ^a	10,34 ^a	8,44 ^a	8,95 ^A	8,85 ^a	7,96 ^a	9,35 ^a	8,43 ^a	7,93 ^A	7,93 ^a
	Średnie	8,53 ^A		9,01 ^A			9,35 ^A		9,09 ^A			8,82 ^A
		8,77 ^A						9,22 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *												

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 41. Zawartość miedzi w kukurydzy [mg Cu · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	16,45 ^a	11,20 ^{ab}	11,75 ^{ab}	11,05 ^{ab}	6,31 ^b	11,80 ^{ab}	14,10 ^{ab}	10,80 ^{ab}	15,10 ^a
	Średnie	13,83 ^A		11,40 ^A		9,05 ^A		12,45 ^A		15,10 ^A
		12,61 ^A				10,75 ^A				15,10 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C - \eta_p^2 = 31,09\%$								
2022	Optymalna	10,63 ^a	11,47 ^a	13,60 ^a	13,33 ^a	13,97 ^a	16,83 ^a	17,73 ^a	15,23 ^a	12,70 ^a
	Średnie	11,05 ^A		13,47 ^{AB}		15,40 ^{AB}		16,48 ^B		12,70 ^{AB}
		12,26 ^A				15,94 ^B				12,70 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	16,00 ^{ab}	16,00 ^{ab}	16,33 ^{ab}	16,00 ^{ab}	14,50 ^C	16,50 ^b	15,00 ^{ab}	15,50 ^{a-c}	16,00 ^{ab}
	Średnie	16,00 ^{AB}		16,17 ^B		15,15 ^{AB}		15,25		16,00 ^{AB}
		16,08 ^B				15,38 ^A				16,00 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 53,38\%$				$B \times C - \eta_p^2 = 29,82\%$				
Średnia z lat	Optymalna	14,36 ^a	12,88 ^a	13,89 ^a	13,46 ^a	11,59 ^a	15,04 ^a	15,61 ^a	13,84 ^a	14,60 ^a
	Średnie	13,62 ^A		13,67 ^A		13,32 ^A		14,74 ^A		14,60 ^A
		13,65 ^A				14,02 ^A				14,60 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 42. Zawartość żelaza w kukurydzy [mg Fe · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola	
		30% popiołu					40% popiołu						
		Źródło wapnia w nawozie (B)											
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄				
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)											
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia		
2021	Optymalna	351,3 ^a	392,3 ^a	372,7 ^a	367,3 ^a	370,9 ^A	327,0 ^a	263,6 ^a	339,6 ^a	272,6 ^a	300,7 ^A	303,0 ^a	
	Obniżona o 25%	345,0 ^a	339,0 ^a	507,0 ^a	342,0 ^a	383,2 ^A	302,0 ^a	266,3 ^a	334,0 ^a	332,3 ^a	308,6 ^A	374,0 ^a	
	Średnie	365,9 ^A		397,2 ^A			289,7 ^A		319,6 ^A			338,5 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		377,1 ^B						304,7 ^A					338,5 ^{AB}
2022	Optymalna	122,0 ^{ab}	97,3 ^b	115,0 ^{ab}	124,3 ^{ab}	114,7 ^B	153,3 ^{ab}	116,3 ^{ab}	110,7 ^{ab}	90,7 ^b	117,8 ^B	222,0 ^{ab}	
	Obniżona o 25%	145,0 ^{ab}	133,3 ^{ab}	163,3 ^{ab}	127,3 ^{ab}	142,0 ^B	163,0 ^{ab}	134,0 ^{ab}	132,7 ^{ab}	111,0 ^{ab}	135,2 ^B	143,3 ^b	
	Średnie	124,4 ^B		132,2 ^{AB}			141,6 ^{AB}		111,3 ^B			182,7 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		128,3 ^B						126,4 ^B					182,7 ^A
2023	Optymalna	121,7 ^a	144,0 ^a	167,0 ^a	148,7 ^a	145,3 ^A	327,7 ^b	190,0 ^a	127,00 ^a	187,3 ^a	208,0 ^B	158,0 ^a	
	Obniżona o 25%	138,0 ^a	160,7 ^a	148,6 ^a	140,3 ^a	146,9 ^A	161,0 ^a	132,3 ^a	162,3 ^a	106,3 ^a	140,5 ^A	158,3 ^a	
	Średnie	141,1 ^A		151,2 ^A			202,8 ^B		145,7 ^A			158,2 ^{AB}	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		146,1 ^A						174,3 ^B					158,2 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2 = 11,14\%$		C – $\eta^2 = 15,91\%$		D – $\eta^2 = 17,99\%$	BxC – $\eta^2 = 19,61\%$		BxCxD – $\eta^2 = 26,58\%$				
Średnia z lat	Optymalna	198,3 ^a	211,2 ^a	218,2 ^a	213,4 ^a	210,3 ^A	269,3 ^a	190,0 ^a	192,4 ^a	183,5 ^a	208,8 ^A	227,6 ^a	
	Obniżona o 25%	209,3 ^a	211,0 ^a	272,6 ^a	203,2 ^a	224,1 ^A	208,6 ^a	177,5 ^a	209,6 ^a	183,2 ^a	194,7 ^A	225,2 ^a	
	Średnie	204,4 ^A		226,8 ^A			211,4 ^A		192,2 ^A			226,4 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		217,2 ^A						201,8 ^A					226,4 ^A

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 43. Zawartość żelaza w kukurydzy [$\text{mg Fe} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	266,0 ^a	292,5 ^a	233,3 ^a	223,5 ^a	268,0 ^a	304,0 ^a	297,0 ^a	211,0 ^a	348,7 ^a
	Średnie	279,3 ^{AB}		228,4 ^A		286,0 ^{AB}		254,0 ^{AB}		348,7 ^B
		253,8 ^A				270,0 ^{AB}				348,7 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$A \times D - \eta_p^2 = 0$								
2022	Optymalna	128,0 ^a	142,5 ^a	100,7 ^a	163,5 ^{ab}	256,5 ^{bc}	251,5 ^{bc}	285,5 ^c	170,0 ^{ab}	182,7 ^{ab}
	Średnie	135,3 ^A		132,1 ^A		254,0 ^B		227,8 ^B		182,7 ^{AB}
		133,67 ^A				240,88 ^B				182,7 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 42,58\%$				$B \times C - \eta_p^2 = 34,48\%$				
2023	Optymalna	96,5 ^a	124,5 ^a	75,3 ^a	103,0 ^a	119,0 ^a	97,0 ^a	119,0 ^a	108,5 ^a	94,0 ^a
	Średnie	110,5 ^A		89,2 ^A		108,00 ^A		117,25 ^A		94,0 ^A
		99,8 ^A				112,6 ^A				94,0 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 28,95\%$								
Średnia z lat	Optymalna	163,5 ^a	186,5 ^a	136,4 ^a	163,3 ^a	214,5 ^a	217,5 ^a	236,2 ^a	163,2 ^a	208,4 ^a
	Średnie	175,0 ^A		149,8 ^A		216,0 ^A		199,6 ^A		208,4 ^A
		162,4 ^A				207,8 ^A				208,4 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 44. Zawartość kadmu w kukurydzy [mg Cd · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola		
		30% popiołu					40% popiołu							
		Źródło wapnia w nawozie (B)												
		CaCO ₃		CaSO ₄					CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)												
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia			
2021	Optymalna	0,050 ^a	0,053 ^a	0,050 ^a	0,053 ^a	0,051 ^A	0,053 ^a	0,056 ^a	0,050 ^a	0,050 ^a	0,051 ^A	0,053 ^a		
	Obniżona o 25%	0,050 ^a	0,053 ^a	0,050 ^a	0,053 ^a	0,050 ^A	0,056 ^a	0,050 ^a	0,050 ^a	0,050 ^a	0,051 ^A	0,053 ^a		
	Średnie	0,051 ^A		0,051 ^A				0,054 ^A		0,050 ^A			0,053 ^A	
		0,051 ^A						0,052 ^A					0,053 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 12,32\%$												
2022	Optymalna	0,060 ^a	0,060 ^a	0,056 ^a	0,060 ^a	0,059 ^a	0,056 ^a	0,060 ^a	0,053 ^a	0,060 ^a	0,057 ^A	0,060 ^a		
	Obniżona o 25%	0,060 ^a	0,060 ^a	0,056 ^a	0,063 ^a	0,060 ^a	0,066 ^a	0,060 ^a	0,060 ^a	0,063 ^a	0,062 ^A	0,060 ^a		
	Średnie	0,060 ^A		0,059 ^A				0,061 ^A		0,059 ^A			0,060 ^A	
		0,059 ^A						0,060 ^A					0,060 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta_p^2 = 11,98\%$												
2023	Optymalna	0,060 ^a	0,063 ^a	0,063 ^a	0,060 ^a	0,062 ^A	0,063 ^a	0,060 ^a	0,060 ^a	0,060 ^a	0,061 ^A	0,060 ^a		
	Obniżona o 25%	0,063 ^a	0,060 ^a	0,060 ^a	0,060 ^a	0,061 ^A	0,063 ^a	0,060 ^a	0,063 ^a	0,060 ^a	0,062 ^A	0,060 ^a		
	Średnie	0,062 ^A		0,061 ^A				0,062 ^A		0,061 ^A			0,060 ^A	
		0,061 ^A						0,061 ^A					0,060 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *														
Średnia z lat	Optymalna	0,056 ^a	0,058 ^a	0,056 ^a	0,058 ^a	0,057 ^A	0,058 ^a	0,058 ^a	0,057 ^a	0,056 ^a	0,056 ^A	0,057 ^a		
	Obniżona o 25%	0,057 ^a	0,057 ^a	0,055 ^a	0,057 ^a	0,057 ^A	0,062 ^a	0,056 ^a	0,057 ^a	0,057 ^a	0,058 ^A	0,057 ^a		
	Średnie	0,057 ^A		0,057 ^A				0,058 ^A		0,056 ^A			0,057 ^A	
		0,057 ^A						0,057 ^A					0,057 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *														

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 45. Zawartość kadmu w kukurydzy [mg Cd · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	0,050 ^a	0,050 ^a	0,053 ^a	0,053 ^a	0,050 ^a	0,056 ^a	0,050 ^a	0,053 ^a	0,050 ^a
	Średnie	0,050 ^A		0,053 ^A		0,053 ^A		0,052 ^A		0,050 ^A
		0,052 ^A				0,053 ^A				0,050 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	0,050 ^a	0,050 ^a	0,050 ^a	0,050 ^a	0,050 ^a	0,050 ^a	0,050 ^a	0,050 ^a	0,050 ^a
	Średnie	0,050 ^A		0,050 ^A		0,050 ^A		0,050 ^A		0,050 ^A
		0,050 ^A				0,050 ^A				0,050 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	0,063 ^a	0,060 ^a	0,060 ^a	0,063 ^a	0,060 ^a	0,063 ^a	0,067 ^a	0,063 ^a	0,060 ^a
	Średnie	0,062 ^A		0,062 ^A		0,062 ^A		0,065 ^A		0,060 ^A
		0,062 ^A				0,063 ^A				0,060 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	0,057 ^a	0,056 ^a	0,057 ^a	0,058 ^a	0,056 ^a	0,060 ^a	0,058 ^a	0,058 ^a	0,056 ^a
	Średnie	0,057 ^A		0,058 ^A		0,058 ^A		0,058 ^A		0,056 ^A
		0,057 ^A				0,058 ^A				0,056 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 46. Zawartość arsenu w kukurydzy [mg As · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Ilość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia			
2021	Optymalna	0,025 ^a	0,023 ^a	0,022 ^a	0,025 ^a	0,024 ^A	0,020 ^a	0,020 ^a	0,021 ^a	0,020 ^a	0,020 ^A	0,035 ^a
	Obniżona o 25%	0,041 ^{b-e}	0,044 ^{c-e}	0,042 ^{b-e}	0,046 ^{de}	0,043 ^C	0,037 ^{bc}	0,038 ^{b-d}	0,039 ^{b-e}	0,040 ^{b-e}	0,039 ^B	0,047 ^b
	Średnie	0,033 ^{BC}		0,034 ^C			0,029 ^A		0,030 ^{AB}			0,041 ^D
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\eta^2_p = 94,02\%$										
2022	Optymalna	0,009 ^{ab}	0,009 ^{ab}	0,008 ^{ab}	0,010 ^{ab}	0,009 ^{AB}	0,011 ^{ab}	0,009 ^{ab}	0,009 ^{ab}	0,008 ^a	0,009 ^A	0,010 ^{ab}
	Obniżona o 25%	0,011 ^{ab}	0,010 ^{ab}	0,010 ^{ab}	0,012 ^b	0,011 ^B	0,025 ^c	0,010 ^{ab}	0,010 ^{ab}	0,011 ^{ab}	0,014 ^C	0,011 ^{ab}
	Średnie	0,010 ^A		0,010 ^A			0,014 ^B		0,009 ^A			0,011 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 52,19\%$ C – $\eta^2_p = 67,53\%$ D – $\eta^2_p = 69,83\%$ BxC – $\eta^2_p = 69,47\%$ BxD – $\eta^2_p = 31,36\%$ CxD – $\eta^2_p = 51,90\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 64,95\%$										
2023	Optymalna	0,018 ^{fg}	0,016 ^{ef}	0,016 ^{ef}	0,013 ^{a-c}	0,016 ^C	0,015 ^{c-e}	0,019 ^g	0,016 ^{ef}	0,016 ^{ef}	0,016 ^C	0,013 ^{a-d}
	Obniżona o 25%	0,013 ^{a-c}	0,016 ^{ef}	0,015 ^{c-e}	0,015 ^{de}	0,015 ^B	0,014 ^{b-e}	0,012 ^a	0,014 ^{b-e}	0,013 ^{ab}	0,013 ^A	0,019 ^g
	Średnie	0,016 ^{BC}		0,015 ^{AB}			0,015 ^{AB}		0,015 ^A			0,016 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 17,48\%$ D – $\eta^2_p = 51,03\%$ BxC – $\eta^2_p = 34,43\%$ BxD – $\eta^2_p = 44,45\%$ CxD – $\eta^2_p = 71,36\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 26,89\%$										
Średnia z lat	Optymalna	0,017 ^a	0,016 ^a	0,015 ^a	0,016 ^a	0,016 ^A	0,015 ^a	0,016 ^a	0,015 ^a	0,015 ^a	0,015 ^A	0,020 ^a
	Obniżona o 25%	0,022 ^a	0,023 ^a	0,022 ^a	0,024 ^a	0,023 ^A	0,026 ^a	0,020 ^a	0,021 ^a	0,021 ^a	0,022 ^A	0,026 ^a
	Średnie	0,020 ^A		0,020 ^A			0,019 ^A		0,018 ^A			0,023 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\eta^2_p = 8,7\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 47. Zawartość arsenu w kukurydzy [$\text{mg As} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	0,050 ^{b-d}	0,053 ^{cd}	0,049 ^{b-d}	0,053 ^d	0,047 ^b	0,049 ^{b-d}	0,047 ^{bc}	0,047 ^b	0,011 ^a
	Średnie	0,051 ^c		0,051 ^c		0,048 ^{BC}		0,047 ^B		0,011 ^A
		0,051 ^c				0,048 ^B				0,011 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 40,94\%$								
2022	Optymalna	0,026 ^d	0,016 ^{bc}	0,014 ^b	0,014 ^b	0,011 ^b	0,014 ^b	0,014 ^b	0,017 ^c	0,016 ^{bc}
	Średnie	0,021 ^D		0,014 ^{AB}		0,013 ^A		0,016 ^{BC}		0,016 ^C
		0,018 ^c				0,014 ^A				0,016 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 63,17\%$ $C - \eta_p^2 = 89,72\%$ $B \times C - \eta_p^2 = 85,96\%$								
2023	Optymalna	0,018 ^c	0,015 ^a	0,032 ^d	0,019 ^c	0,015 ^a	0,018 ^{bc}	0,019 ^c	0,017 ^b	0,019 ^c
	Średnie	0,017 ^A		0,026 ^D		0,017 ^A		0,018 ^B		0,019 ^D
		0,021 ^c				0,017 ^A				0,019 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 98,53\%$ $C - \eta_p^2 = 98,87\%$ $B \times C - \eta_p^2 = 97,16\%$								
Średnia z lat	Optymalna	0,031 ^a	0,028 ^a	0,032 ^a	0,029 ^a	0,024 ^a	0,027 ^a	0,027 ^a	0,027 ^a	0,015 ^a
	Średnie	0,029 ^A		0,030 ^A		0,026 ^A		0,027 ^A		0,015 ^A
		0,030 ^B				0,026 ^{AB}				0,015 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 48. Zawartość rtęci w kukurydzy [$\text{mg Hg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Ilość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	0,0050 ^a	0,0053 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^A	0,0056 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0051 ^A	0,0050 ^A
	Obniżona o 25%	0,0063 ^a	0,0056 ^a	0,0063 ^a	0,0050 ^a	0,0058 ^A	0,0070 ^a	0,0053 ^a	0,0066 ^a	0,0050 ^a	0,0060 ^A	0,0053 ^A
	Średnie	0,0055 ^A		0,0053 ^A			0,0057 ^A		0,0054 ^A			0,0051 ^A
		0,0054 ^A					0,0055 ^A					0,0051 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta_p^2 = 12,19\%$										
2022	Optymalna	0,0270 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^A	0,0050 ^a	0,0110 ^a	0,0070 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^A	0,0096 ^A
	Obniżona o 25%	0,0096 ^a	0,0109 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^A	0,0104 ^a	0,0053 ^a	0,0096 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^A	0,0113 ^A
	Średnie	0,0131 ^A		0,0055 ^A			0,0079 ^A		0,0066 ^A			0,0105 ^A
		0,0093 ^A					0,0073 ^A					0,0105 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
2023	Optymalna	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^A	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^A	0,0050 ^A
	Obniżona o 25%	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^A	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^A	0,0050 ^A
	Średnie	0,0050 ^A		0,0050 ^A			0,0050 ^A		0,0050 ^A			0,0050 ^A
		0,0050 ^A					0,0050 ^A					0,0050 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *												
Średnia z lat	Optymalna	0,0123 ^a	0,0051 ^a	0,0050 ^a	0,0051 ^a	0,0068 ^A	0,0052 ^a	0,0070 ^a	0,0056 ^a	0,0050 ^a	0,0057 ^A	0,0065 ^a
	Obniżona o 25%	0,0070 ^a	0,0072 ^a	0,0062 ^a	0,0050 ^a	0,0063 ^A	0,0074 ^a	0,0052 ^a	0,0071 ^a	0,0050 ^a	0,0062 ^A	0,0072 ^a
	Średnie	0,0079 ^A		0,0053 ^A			0,0062 ^A		0,0057 ^A			0,0068 ^A
		0,0066 ^A					0,0059 ^A					0,0068 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *												

Tabela 49. Zawartość rtęci w kukurydzy [$\text{mg Hg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Zawartość wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Ilość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a
	Średnie	0,0050 ^A		0,0050 ^A		0,0050 ^A		0,0050 ^A		0,0050 ^A
		0,0050 ^A				0,0050 ^A				0,0050 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0233 ^a	0,0063 ^a	0,0050 ^a	0,0233 ^a
	Średnie	0,0050 ^A		0,0050 ^A		0,0141 ^A		0,0056 ^A		0,0233 ^A
		0,0050 ^A				0,0099 ^A				0,0233 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a
	Średnie	0,0050 ^A		0,0050 ^A		0,0050 ^A		0,0050 ^A		0,0050 ^A
		0,0050 ^A				0,0050 ^A				0,0050 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0050 ^a	0,0111 ^a	0,0054 ^a	0,0050 ^a	0,0111 ^a
	Średnie	0,0050 ^A		0,0050 ^A		0,0080 ^A		0,0052 ^A		0,0111 ^A
		0,0050 ^A				0,0066 ^A				0,0111 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 50. Zawartość ołowiu w kukurydzy [$\text{mg Pb} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola	
		30% popiołu					40% popiołu						
		Źródło wapnia w nawozie (B)											
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄				
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)											
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia				
2021	Optymalna	0,025 ^a	0,023 ^a	0,014 ^a	0,039 ^a	0,025 ^a	0,031 ^a	0,020 ^a	0,034 ^a	0,022 ^a	0,027 ^a	0,014 ^A	
	Obniżona o 25%	0,039 ^a	0,053 ^a	0,056 ^a	0,042 ^a	0,048 ^a	0,023 ^a	0,051 ^a	0,031 ^a	0,086 ^a	0,048 ^a	0,031 ^A	
	Średnie	0,035 ^A		0,038 ^A				0,031 ^A		0,043 ^A			0,023 ^A
		0,036 ^A					0,037 ^A					0,023 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta^2_p = 15,09\%$											
2022	Optymalna	0,113 ^a	0,376 ^a	0,120 ^a	0,113 ^a	0,181 ^a	0,106 ^a	0,116 ^a	0,110 ^a	0,110 ^a	0,111 ^a	0,123 ^A	
	Obniżona o 25%	0,106 ^a	0,376 ^a	0,126 ^a	0,123 ^a	0,183 ^a	0,126 ^a	0,123 ^a	0,110 ^a	0,143 ^a	0,126 ^a	0,123 ^A	
	Średnie	0,243 ^A		0,121 ^A				0,118 ^A		0,1183 ^A			0,123 ^A
		0,182 ^A					0,118 ^A					0,123 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *													
2023	Optymalna	0,156 ^a	0,150 ^a	0,143 ^a	0,163 ^a	0,150 ^a	0,136 ^a	0,160 ^a	0,140 ^a	0,136 ^a	0,143 ^a	0,146 ^A	
	Obniżona o 25%	0,156 ^a	0,140 ^a	0,166 ^a	0,163 ^a	0,156 ^a	0,160 ^a	0,163 ^a	0,143 ^a	0,153 ^a	0,155 ^a	0,150 ^A	
	Średnie	0,147 ^A		0,159 ^A				0,155 ^A		0,143 ^A			0,148 ^A
		0,153 ^A					0,149 ^A					0,148 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *													
Średnia z lat	Optymalna	0,094 ^a	0,183 ^a	0,092 ^a	0,105 ^a	0,119 ^A	0,091 ^a	0,098 ^a	0,094 ^a	0,089 ^a	0,093 ^A	0,094 ^A	
	Obniżona o 25%	0,100 ^a	0,189 ^a	0,116 ^a	0,109 ^a	0,129 ^A	0,103 ^a	0,112 ^a	0,094 ^a	0,127 ^a	0,109 ^A	0,101 ^A	
	Średnie	0,141 ^A		0,105 ^A				0,101 ^A		0,101 ^A			0,098 ^A
		0,123 ^A					0,101 ^A					0,098 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *													

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 51. Zawartość ołowiu w kukurydzy [$\text{mg Pb} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	0,054 ^a	0,037 ^a	0,081 ^a	0,038 ^a	0,054 ^a	0,054 ^a	0,050 ^a	0,046 ^a	0,073 ^a
	Średnie	0,046 ^a		0,059 ^a		0,054 ^a		0,048 ^a		0,073 ^A
		0,052 ^a				0,051 ^a				0,073 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	0,135 ^a	0,145 ^a	0,153 ^a	0,145 ^a	0,140 ^a	0,125 ^a	0,135 ^a	0,135 ^a	0,153 ^a
	Średnie	0,140 ^a		0,149 ^a		0,132 ^a		0,135 ^a		0,153 ^A
		0,144 ^a				0,133 ^a				0,153 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	0,165 ^a	0,170 ^a	0,157 ^a	0,155 ^a	0,160 ^a	0,155 ^a	0,155 ^a	0,160 ^a	0,153 ^a
	Średnie	0,168 ^a		0,156 ^a		0,158 ^a		0,158 ^a		0,153 ^A
		0,1616 ^a				0,1575 ^a				0,153 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	0,118 ^a	0,117 ^a	0,130 ^a	0,112 ^a	0,118 ^a	0,115 ^a	0,113 ^a	0,113 ^a	0,126 ^a
	Średnie	0,117 ^A		0,121 ^A		0,114 ^A		0,113 ^A		0,126 ^A
		0,119 ^A				0,114 ^A				0,126 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 52. Zawartość suchej masy w kiszonce z kukurydzy [%] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia			
2021	Optymalna	38,71 ^{d-g}	32,58 ^{a-c}	31,33 ^{ab}	33,34 ^{a-d}	33,99 ^A	40,32 ^g	30,63 ^a	37,06 ^{c-g}	33,58 ^{a-e}	35,40 ^{AB}	34,20 ^a
	Obniżona o 25%	34,25 ^{a-f}	38,75 ^{e-g}	36,38 ^{b-g}	33,82 ^{a-e}	35,85 ^B	31,36 ^{ab}	39,36 ^{fg}	33,54 ^{a-e}	37,48 ^{c-g}	35,43 ^{AB}	38,72 ^b
	Średnie	36,12 ^A		33,72 ^B			35,41 ^{AB}		35,42 ^{AB}			36,46 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2 = 13,46\%$					D – $\eta^2 = 17,94\%$		C×D – $\eta^2 = 69,09\%$		B×C×D – $\eta^2 = 52,66\%$	
2022	Optymalna	36,00 ^a	36,48 ^a	35,23 ^a	39,79 ^a	36,88 ^A	39,43 ^a	36,86 ^a	41,51 ^a	36,56 ^a	38,51 ^A	35,67 ^a
	Obniżona o 25%	39,34 ^a	41,82 ^a	39,42 ^a	35,86 ^a	39,11 ^A	37,81 ^a	38,75 ^a	37,46 ^a	35,62 ^a	37,41 ^A	39,23 ^a
	Średnie	38,41 ^A		37,57 ^A			38,21 ^A		37,78 ^A			37,45 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		37,99 ^A					38,00 ^A					
2023	Optymalna	34,96 ^a	38,25 ^a	40,42 ^a	37,85 ^a	37,87 ^A	35,58 ^a	37,66 ^a	37,37 ^a	38,76 ^a	37,34 ^A	39,78 ^a
	Obniżona o 25%	35,69 ^a	39,73 ^a	38,78 ^a	42,15 ^a	39,09 ^A	38,99 ^a	40,20 ^a	37,06 ^a	37,96 ^a	38,55 ^A	37,66 ^a
	Średnie	37,16 ^A		39,80 ^A			38,11 ^A		37,79 ^A			38,72 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		38,48 ^A					37,95 ^A					
Średnia z lat	Optymalna	36,56 ^a	35,77 ^a	35,66 ^a	36,99 ^a	36,24 ^A	38,44 ^a	35,05 ^a	38,64 ^a	36,30 ^a	37,11 ^A	36,55 ^a
	Obniżona o 25%	36,49 ^a	40,10 ^a	38,18 ^a	37,28 ^a	38,01 ^A	36,05 ^a	39,43 ^a	36,02 ^a	37,02 ^a	37,13 ^A	38,54 ^a
	Średnie	37,23 ^A		37,03 ^A			37,24 ^A		36,99 ^A			37,54 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		37,13 ^A					37,12 ^A					
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C×D – $\eta^2 = 6,58\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 53. Zawartość suchej masy w kiszonce z kukurydzy [%] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	36,47 ^{bc}	34,14 ^{a-c}	32,62 ^{ab}	30,00 ^a	38,26 ^c	31,78 ^{ab}	35,36 ^{bc}	38,04 ^c	33,33 ^{a-c}
	Średnie	35,30 ^B		31,31 ^A		35,02 ^B		36,70 ^B		33,33 ^{AB}
		33,31 ^A				35,86 ^B				33,33 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 34,38\%$				B×C – $\eta^2_p = 53,06\%$				
2022	Optymalna	39,00 ^a	39,38 ^a	38,73 ^a	35,55 ^a	39,45 ^a	40,66 ^a	38,55 ^a	40,09 ^a	38,01 ^a
	Średnie	39,19 ^A		37,14 ^A		40,06 ^A		39,32 ^A		38,01 ^A
		38,17 ^A				39,69 ^A				38,01 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	35,59 ^{ab}	39,98 ^b	37,85 ^{ab}	36,83 ^{ab}	36,19 ^{ab}	39,74 ^b	38,52 ^{ab}	36,83 ^{ab}	33,12 ^a
	Średnie	37,78 ^B		37,34 ^{AB}		37,97 ^B		38,56 ^B		33,12 ^A
		37,56 ^B				38,26 ^B				33,12 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B×C – $\eta^2_p = 30,51\%$								
Średnia z lat	Optymalna	37,02 ^a	37,83 ^a	36,40 ^a	34,12 ^a	37,97 ^a	38,91 ^a	37,48 ^a	38,91 ^a	34,82 ^a
	Średnie	37,42 ^A		35,26 ^A		37,68 ^A		38,19 ^A		34,82 ^A
		36,34 ^{AB}				37,94 ^B				34,82 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 54. Zawartość włókna w kiszonce z kukurydzy [%] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola	
		30% popiołu					40% popiołu						
		Źródło wapnia w nawozie (B)											
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄				
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)											
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia				
2021	Optymalna	9,81 ^{b-d}	11,55 ^{c-f}	8,84 ^{a-d}	13,15 ^{e-h}	10,84 ^B	8,06 ^{a-c}	5,85 ^a	5,84 ^a	9,11 ^{a-d}	7,22 ^A	16,44 ^d	
	Obniżona o 25%	16,23 ^{h-j}	15,56 ^{g-j}	17,54 ^j	13,34 ^{e-i}	15,67 ^D	6,94 ^{ab}	12,28 ^{d-h}	13,02 ^{e-h}	16,91 ^{ij}	12,29 ^{BC}	13,56 ^{cd}	
	Średnie	13,29 ^C		13,12 ^C				8,28 ^A		11,22 ^B			15,00 ^D
		13,25 ^B						9,75 ^A					15,00 ^C
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi^2_p = 32,55\%$		C – $\Pi^2_p = 44,08\%$		D – $\Pi^2_p = 81,15\%$		BxD – $\Pi^2_p = 19,48\%$		CxD – $\Pi^2_p = 57,77\%$		BxCxD – $\Pi^2_p = 38,59\%$	
2022	Optymalna	7,21 ^{a-d}	6,05 ^{a-c}	6,24 ^{a-c}	7,65 ^{b-d}	6,79 ^A	7,10 ^{a-d}	5,73 ^{ab}	5,16 ^a	6,51 ^{a-c}	6,12 ^A	6,24 ^a	
	Obniżona o 25%	9,03 ^d	9,36 ^d	8,34 ^{cd}	7,14 ^{a-d}	8,47 ^B	5,98 ^{ab}	6,08 ^{a-c}	7,23 ^{a-d}	7,37 ^{a-d}	6,67 ^A	7,36 ^{ab}	
	Średnie	7,91 ^C		7,34 ^{BC}				6,22 ^A		6,57 ^{AB}			6,80 ^{AB}
		7,63 ^B						6,39 ^A					6,80 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\Pi^2_p = 43,95\%$					BxCxD – $\Pi^2_p = 29,76\%$						
2023	Optymalna	6,38 ^a	5,89 ^a	6,08 ^a	5,46 ^a	5,95 ^A	6,15 ^a	5,57 ^a	5,00 ^a	6,35 ^a	5,77 ^A	6,08 ^A	
	Obniżona o 25%	6,28 ^a	6,24 ^a	5,59 ^a	5,94 ^a	6,01 ^A	5,86 ^a	5,82 ^a	5,78 ^a	6,15 ^a	5,90 ^A	6,29 ^A	
	Średnie	6,20 ^A		5,77 ^A				5,85 ^A		5,82 ^A			6,18 ^A
		5,98 ^A						5,84 ^A					6,18 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *													
Średnia z lat	Optymalna	7,80 ^a	7,83 ^a	7,06 ^a	8,76 ^a	7,86 ^{AB}	7,11 ^a	5,71 ^a	5,33 ^a	7,32 ^a	6,37 ^A	9,59 ^a	
	Obniżona o 25%	10,52 ^a	10,39 ^a	10,14 ^a	8,81 ^a	10,05 ^B	6,26 ^a	8,06 ^a	8,68 ^a	10,14 ^a	8,29 ^{AB}	9,07 ^a	
	Średnie	9,13 ^B		8,78 ^{AB}				6,78 ^A		7,87 ^{AB}			9,33 ^B
		8,95 ^B						7,33 ^A					9,33 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\Pi^2_p = 7,31\%$											

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 55. Zawartość włókna w kiszonce z kukurydzy [%] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	12,51 ^e	5,19 ^a	7,95 ^c	6,24 ^b	13,66 ^f	10,47 ^d	16,39 ^g	12,05 ^e	5,27 ^{ab}
	Średnie	8,85 ^C		7,10 ^B		12,06 ^D		14,22 ^E		5,27 ^A
		7,97 ^B				13,14 ^C				5,27 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \Pi_p^2 = 97,94\%$				$B \times C - \Pi_p^2 = 91,89\%$				
2022	Optymalna	6,31 ^{cd}	4,23 ^b	4,01 ^a	5,28 ^{bc}	7,46 ^d	4,27 ^b	6,70 ^{cd}	5,85 ^c	4,31 ^b
	Średnie	5,27 ^{BC}		4,64 ^A		5,86 ^{CD}		6,27 ^D		4,31 ^A
		4,95 ^A				6,07 ^B				4,31 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \Pi_p^2 = 34,50\%$		$C - \Pi_p^2 = 72,88\%$		$B \times C - \Pi_p^2 = 84,37\%$				
2023	Optymalna	5,82 ^a	4,33 ^a	4,18 ^a	4,61 ^a	5,32 ^a	4,76 ^a	5,69 ^a	5,096 ^a	4,66 ^a
	Średnie	5,07 ^A		4,39 ^A		5,04 ^A		5,39 ^A		4,66 ^A
		4,73 ^A				5,21 ^A				4,66 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \Pi_p^2 = 29,19\%$								
Średnia z lat	Optymalna	8,21 ^{ab}	4,25 ^a	4,29 ^a	5,38 ^{ab}	8,81 ^{ab}	6,50 ^{ab}	9,59 ^b	7,66 ^{ab}	4,74 ^a
	Średnie	6,39 ^{AB}		5,37 ^A		7,65 ^{AB}		8,63 ^B		4,74 ^A
		5,88 ^A				8,14 ^B				4,74 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \Pi_p^2 = 8,07\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 56. Zawartość azotu ogółem w kiszonce z kukurydzy [g N · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)												
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	10,02 ^f	10,46 ^g	9,69 ^{de}	9,99 ^f	10,04 ^C	9,77 ^{d-f}	9,11 ^c	9,84 ^{ef}	9,25 ^d	9,56 ^B	10,60 ^g
	Obniżona o 25%	9,03 ^c	9,08 ^c	10,43 ^g	8,62 ^b	9,29 ^A	11,23 ^h	9,80 ^{ef}	8,20 ^a	11,77 ^h	10,25 ^D	10,41 ^g
	Średnie	9,65 ^A		9,68 ^A				9,98 ^C		9,83 ^B		10,51 ^D
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi^2_p = 11,20\%$			C – $\Pi^2_p = 76,08\%$		B×C – $\Pi^2_p = 97,75\%$		C×D – $\Pi^2_p = 95,53\%$		B×C×D – $\Pi^2_p = 97,06\%$	
2022	Optymalna	12,36 ^a	11,91 ^a	12,15 ^a	12,65 ^a	12,27 ^A	11,74 ^a	11,63 ^a	11,52 ^a	11,46 ^a	11,59 ^A	11,91 ^a
	Obniżona o 25%	11,97 ^a	11,92 ^a	12,51 ^a	12,91 ^a	12,34 ^A	12,41 ^a	12,93 ^a	13,31 ^a	12,40 ^a	12,76 ^A	12,54 ^a
	Średnie	12,05 ^A		12,56 ^A				12,18 ^A		12,17 ^A		12,23 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		12,30 ^A					12,17 ^A					12,23 ^A
2023	Optymalna	9,60 ^{b-e}	10,08 ^{c-e}	8,44 ^{a-d}	9,04 ^{a-e}	9,29 ^B	9,35 ^{b-e}	8,63 ^{a-e}	8,92 ^{a-e}	8,63 ^{a-d}	8,88 ^A	8,98 ^{c-e}
	Obniżona o 25%	7,88 ^{a-c}	8,36 ^{a-d}	9,94 ^{c-e}	7,37 ^{ab}	8,38 ^A	10,24 ^{de}	9,41 ^{b-e}	7,08 ^a	11,12 ^e	9,46 ^B	9,99 ^{c-e}
	Średnie	8,98 ^B		8,69 ^A				9,40 ^C		8,93 ^B		9,45 ^C
Udział obserwowanej zmienności [%] *		8,83 ^A			9,16 ^B					9,45 ^C		
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B×C – $\Pi^2_p = 43,48\%$				C×D – $\Pi^2_p = 36,88\%$			B×C×D – $\Pi^2_p = 35,20\%$			
Średnia z lat	Optymalna	10,66 ^a	10,82 ^a	10,09 ^a	10,56 ^a	10,73 ^A	10,29 ^a	9,79 ^a	10,09 ^a	9,78 ^a	9,98 ^A	10,80 ^a
	Obniżona o 25%	9,63 ^a	9,80 ^a	10,96 ^a	9,64 ^a	9,25 ^A	11,29 ^a	10,71 ^a	9,53 ^a	11,76	10,82 ^A	10,98 ^a
	Średnie	10,22 ^A		10,31 ^A				10,52 ^A		10,29 ^A		10,89 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		10,26 ^A					10,40 ^B					10,89 ^A

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 57. Zawartość azotu ogółem w kiszonce z kukurydzy [g N · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	10,79 ^b	11,62 ^{de}	10,63 ^b	11,90 ^f	11,13 ^c	10,89 ^{bc}	11,81 ^{ef}	11,46 ^d	9,81 ^a
	Średnie	11,20 ^C		11,26 ^C		11,01 ^B		11,64 ^D		9,81 ^A
		11,23 ^B				11,32 ^B				9,81 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 82,11\%$				C – $\Pi_p^2 = 95,84\%$		BxC – $\Pi_p^2 = 51,77\%$		
2022	Optymalna	12,15 ^a	11,05 ^a	12,53 ^a	14,59 ^a	12,80 ^a	12,94 ^a	12,85 ^a	12,02 ^a	12,00 ^a
	Średnie	11,60 ^A		13,56 ^A		12,87 ^A		12,44 ^A		12,00 ^A
		12,58 ^A				12,65 ^A				12,00 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	9,54 ^{ab}	10,66 ^{ab}	10,24 ^{ab}	10,44 ^{ab}	10,21 ^{ab}	10,00 ^{ab}	10,53 ^{ab}	11,04 ^b	8,82 ^a
	Średnie	10,10 ^{AB}		10,34 ^B		10,10 ^{AB}		10,79 ^B		8,82 ^A
		10,22 ^B				10,44 ^A				8,82 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	10,83 ^{ab}	11,11 ^{ab}	11,13 ^{ab}	12,31 ^b	11,38 ^{ab}	11,28 ^{ab}	11,73 ^{ab}	11,51 ^{ab}	10,21 ^a
	Średnie	10,97 ^A		11,72 ^A		11,33 ^A		11,62 ^A		10,21 ^A
		11,34 ^{AB}				11,47 ^B				10,21 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 58. Zawartość fosforu w kiszonce z kukurydzy [g P · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)												
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	2,57 ^c	2,55 ^{bc}	2,46 ^{a-c}	1,92 ^{a-c}	2,37 ^C	1,78 ^{ab}	1,84 ^{a-c}	1,82 ^{a-c}	1,71 ^a	1,79 ^A	1,74 ^a
	Obniżona o 25%	1,71 ^a	2,23 ^{a-c}	2,36 ^{a-c}	2,28 ^{a-c}	2,15 ^{BC}	2,21 ^{a-c}	1,70 ^a	2,21 ^{a-c}	2,33 ^{a-c}	2,11 ^{BC}	1,89 ^{a-c}
	Średnie	2,27 ^B		2,26 ^B				1,88 ^A		2,02 ^{AB}		1,82 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C - \Pi_p^2 = 19,68\%$					$B \times D - \Pi_p^2 = 27,71\%$			$C \times D - \Pi_p^2 = 15,40\%$		
2022	Optymalna	1,70 ^{b-e}	1,72 ^{c-e}	1,67 ^{b-e}	1,68 ^{b-e}	1,69 ^A	1,65 ^{a-e}	1,56 ^{a-d}	1,64 ^{a-e}	1,63 ^{a-e}	1,62 ^{AB}	1,72 ^{c-e}
	Obniżona o 25%	1,53 ^{ab}	1,54 ^{a-c}	1,72 ^{c-e}	1,53 ^{ab}	1,58 ^A	1,76 ^e	1,65 ^{a-e}	1,48 ^a	1,79 ^e	1,67 ^B	1,74 ^{de}
	Średnie	1,62 ^A		1,65 ^{AB}				1,65 ^{AB}		1,64 ^A		1,73 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C - \Pi_p^2 = 44,67\%$					$C \times D - \Pi_p^2 = 27,12\%$			$B \times C \times D - \Pi_p^2 = 30,88\%$		
2023	Optymalna	1,96 ^a	1,90 ^a	1,67 ^a	1,72 ^a	1,81 ^A	1,70 ^a	1,84 ^a	1,91 ^a	1,86 ^a	1,83 ^A	1,94 ^a
	Obniżona o 25%	1,90 ^a	1,84 ^a	1,81 ^a	1,99 ^a	1,88 ^A	1,96 ^a	1,84 ^a	1,77 ^a	1,79 ^a	1,84 ^A	1,88 ^a
	Średnie	1,90 ^A		1,79 ^A				1,84 ^A		1,83 ^A		1,91 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		1,85 ^A					1,83 ^A			1,91 ^A		
Średnia z lat	Optymalna	2,08 ^a	2,05 ^a	1,93 ^a	1,77 ^a	1,96 ^B	1,71 ^a	1,75 ^a	1,79 ^a	1,73 ^a	1,75 ^A	1,80 ^a
	Obniżona o 25%	1,71	1,87 ^a	1,96 ^a	1,93 ^a	1,87 ^{AB}	1,98 ^a	1,73 ^a	1,82 ^a	1,97 ^a	1,87 ^{AB}	1,83 ^a
	Średnie	1,93 ^A		1,90 ^A				1,79 ^A		1,83 ^A		1,82 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		1,91 ^A					1,81 ^A			1,82 ^A		

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 59. Zawartość fosforu w kiszonce z kukurydzy [g P · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10			
2021	Optymalna	1,55 ^a	1,45 ^a	1,51 ^a	1,53 ^a	1,55 ^a	1,50 ^a	1,55 ^a	1,56 ^a	1,42 ^a
	Średnie	1,50 ^A		1,52 ^A		1,53 ^A		1,56 ^A		1,42 ^A
		1,51 ^A				1,54 ^A				1,42 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	1,70 ^{ab}	1,71 ^{ab}	1,63 ^{ab}	1,70 ^{ab}	1,68 ^{ab}	1,76 ^b	1,70 ^{ab}	1,70 ^{ab}	1,50 ^a
	Średnie	1,71 ^B		1,67 ^{AB}		1,72 ^B		1,70 ^B		1,50 ^A
		1,69 ^B				1,71 ^B				1,50 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	2,02 ^a	1,84 ^a	1,92 ^a	1,79 ^a	2,00 ^a	1,82 ^a	1,80 ^a	1,95 ^a	1,79 ^a
	Średnie	1,93 ^A		1,87 ^A		1,91 ^A		1,87 ^A		1,79 ^A
		1,89 ^A				1,89 ^A				1,79 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	1,76 ^a	1,66 ^a	1,69 ^a	1,68 ^a	1,68 ^a	1,70 ^a	1,74 ^a	1,73 ^a	1,57 ^a
	Średnie	1,71 ^A		1,68 ^A		1,72 ^A		1,71 ^A		1,57 ^A
		1,70 ^A				1,71 ^A				1,57 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 60. Zawartość potasu w kiszonce z kukurydzy [g K · kg⁻¹] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)												
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	10,81 ^a	10,37 ^a	11,07 ^a	10,32 ^a	10,64 ^A	10,49 ^a	10,24 ^a	9,56 ^a	11,18 ^a	10,37 ^A	10,85 ^a
	Obniżona o 25%	10,75 ^a	10,66 ^a	10,42 ^a	11,35 ^a	10,79 ^A	10,96 ^a	10,92 ^a	10,35 ^a	10,46 ^a	10,67 ^A	10,96 ^a
	Średnie	10,65 ^A		10,79 ^A			10,65 ^A		10,39 ^A			10,88 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		10,72 ^A					10,52 ^A					10,88 ^A
2022	Optymalna	9,00 ^a	9,00 ^a	9,42 ^a	10,00 ^a	9,35 ^A	9,60 ^a	10,08 ^a	10,28 ^a	9,66 ^a	9,90 ^A	9,49 ^a
	Obniżona o 25%	9,80 ^a	10,00 ^a	9,94 ^a	10,20 ^a	9,99 ^A	9,81 ^a	9,34 ^a	9,71 ^a	10,26 ^a	9,78 ^A	9,39 ^a
	Średnie	9,45 ^A		9,89 ^A			9,70 ^A		9,97 ^A			9,44 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		9,67 ^A					9,86 ^A					9,44 ^A
2023	Optymalna	11,32 ^a	11,53 ^a	11,39 ^a	11,06 ^a	11,33 ^A	11,81 ^a	11,38 ^a	11,35 ^a	11,26 ^a	11,45 ^A	11,70 ^a
	Obniżona o 25%	11,70 ^a	11,57 ^a	12,18 ^a	11,85 ^a	11,82 ^A	11,75 ^a	11,47 ^a	11,23 ^a	11,84 ^a	11,58 ^A	11,13 ^a
	Średnie	11,53 ^A		11,62 ^A			11,60 ^A		11,42 ^A			11,43 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		11,58 ^A					11,51 ^A					11,43 ^A
Średnia z lat	Optymalna	10,38 ^a	10,30 ^a	10,63 ^a	10,46 ^a	10,44 ^A	10,63 ^a	10,57 ^a	10,40 ^a	10,70 ^a	10,57 ^A	10,68 ^a
	Obniżona o 25%	10,75 ^a	10,74 ^a	10,85 ^a	11,13 ^a	10,87 ^A	10,84 ^a	10,57 ^a	10,43 ^a	10,86 ^a	10,68 ^A	10,48 ^a
	Średnie	10,54 ^A		10,77 ^A			10,65 ^A		10,60 ^A			10,58 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		10,65 ^A					10,62 ^A					10,58 ^A

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 61. Zawartość potasu w kiszonce z kukurydzy [g K · kg⁻¹] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	10,30 ^a	10,60 ^a	10,28 ^a	10,59 ^a	11,02 ^a	10,70 ^a	10,12 ^a	10,65 ^a	10,43 ^a
	Średnie	10,45 ^A		10,43 ^A		10,86 ^A		10,38 ^A		10,43 ^A
		10,44 ^A				10,62 ^A				10,43 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	9,78 ^a	9,56 ^a	9,46 ^a	9,80 ^a	9,99 ^a	9,80 ^a	9,86 ^a	9,84 ^a	9,99 ^a
	Średnie	9,67 ^A		9,63 ^A		9,89 ^A		9,85 ^A		9,99 ^A
		9,65 ^A				9,87 ^A				9,99 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	11,68 ^a	11,28 ^a	11,50 ^a	11,59 ^a	11,21 ^a	11,72 ^a	11,21 ^a	11,22 ^a	11,57 ^a
	Średnie	11,48 ^A		11,55 ^A		11,47 ^A		11,22 ^A		11,57 ^A
		11,52 ^A				11,34 ^A				11,57 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	10,59 ^a	10,48 ^a	10,42 ^a	10,66 ^a	10,74 ^a	10,74 ^a	10,40 ^a	10,57 ^a	10,66 ^a
	Średnie	10,53 ^A		10,54 ^A		10,74 ^A		10,48 ^A		10,66 ^A
		10,54 ^A				10,61 ^A				10,66 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 62. Zawartość magnezu w kiszonce z kukurydzy [g Mg · kg⁻¹] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)												
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	1,08 ^{b-c}	1,02 ^a	1,06 ^{b-e}	1,06 ^{b-e}	1,07 ^B	1,04 ^{a-d}	0,97 ^{a-c}	1,06 ^{b-e}	1,02 ^{a-d}	1,02 ^{AB}	1,10 ^{b-e}
	Obniżona o 25%	0,94 ^{ab}	1,00 ^{a-c}	1,10 ^{b-e}	0,94 ^{ab}	1,00 ^A	1,17 ^{de}	1,04 ^{a-d}	0,89 ^a	1,21 ^e	1,08 ^B	1,11 ^{c-e}
	Średnie	1,03 ^A		1,04 ^A				1,06 ^A		1,04 ^A		1,11 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		BxC – $\Pi^2_p = 51,96\%$					CxD – $\Pi^2_p = 30,15\%$		BxCxD – $\Pi^2_p = 45,21\%$			
2022	Optymalna	0,99 ^a	0,88 ^a	0,87 ^a	0,85 ^a	0,90 ^A	0,89 ^a	0,83 ^a	0,90 ^a	0,82 ^a	0,86 ^A	0,85 ^A
	Obniżona o 25%	0,87 ^a	0,99 ^a	0,79 ^a	0,88 ^a	0,88 ^A	0,86 ^a	0,92 ^a	0,95 ^a	0,87 ^a	0,90 ^A	0,87 ^A
	Średnie	0,93 ^A		0,85 ^A				0,88 ^A		0,89 ^A		0,86 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		0,89 ^A						0,88 ^A				0,86 ^A
2023	Optymalna	0,87 ^{ab}	0,87 ^{ab}	0,98 ^{a-c}	0,90 ^{ab}	0,90 ^A	0,87 ^{ab}	0,95 ^{a-c}	1,02 ^{a-c}	0,92 ^{ab}	0,94 ^{AB}	0,98 ^{a-c}
	Obniżona o 25%	0,80 ^a	1,04 ^{a-c}	1,05 ^{a-c}	1,18 ^c	1,02 ^C	1,00 ^{a-c}	1,01 ^{a-c}	0,93 ^{a-c}	1,02 ^a	0,99 ^{A-C}	1,12 ^{bc}
	Średnie	0,90 ^A		1,02 ^A				0,96 ^A		0,97 ^A		1,05 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		0,96 ^A						0,97 ^A				1,05 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi^2_p = 19,06\%$					D – $\Pi^2_p = 29,02\%$		CxD – $\Pi^2_p = 24,36\%$			
Średnia z lat	Optymalna	0,98 ^a	0,95 ^a	0,97 ^a	0,94 ^a	0,96 ^A	0,94 ^a	0,92 ^a	0,99 ^a	0,92 ^a	0,94 ^A	0,98 ^a
	Obniżona o 25%	0,87 ^a	1,01 ^a	0,98 ^a	1,00 ^a	0,97 ^A	1,01 ^a	0,99 ^a	0,92 ^a	1,04 ^a	0,99 ^A	0,10 ^a
	Średnie	0,95 ^A		0,97 ^A				0,96 ^A		0,97 ^A		1,00 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		0,96 ^A						0,97 ^A				1,00 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		CxD – $\Pi^2_p = 04,50\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 63. Zawartość magnezu w kiszonce z kukurydzy [g Mg · kg⁻¹] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	1,08 ^{ab}	1,14 ^{ab}	1,07 ^{ab}	1,21 ^b	1,09 ^{ab}	1,16 ^{ab}	1,11 ^{ab}	1,13 ^{ab}	1,02 ^a
	Średnie	1,11 ^A		1,14 ^A		1,12 ^A		1,12 ^A		1,02 ^A
		1,13 ^B				1,12 ^{Ab}				1,02 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \Pi_p^2 = 33,31\%$								
2022	Optymalna	0,93 ^a	0,83 ^a	0,81 ^a	0,95 ^a	0,96 ^a	0,94 ^a	0,93 ^a	0,90 ^a	0,91 ^a
	Średnie	0,88 ^A		0,88 ^A		0,95 ^A		0,91 ^A		0,91 ^A
		0,88 ^A				0,93 ^A				0,91 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C - \Pi_p^2 = 28,83\%$								
2023	Optymalna	1,14 ^a	1,18 ^a	1,20 ^a	1,13 ^a	1,26 ^a	1,21 ^a	1,19 ^a	1,15 ^a	1,20 ^a
	Średnie	1,16 ^A		1,17 ^A		1,23 ^A		1,17 ^A		1,20 ^A
		1,16 ^A				1,20 ^A				1,20 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	1,05 ^a	1,05 ^a	1,03 ^a	1,09 ^a	1,10 ^a	1,10 ^a	1,07 ^a	1,06 ^a	1,04 ^a
	Średnie	1,05 ^A		1,06 ^A		1,10 ^A		1,07 ^A		1,04 ^A
		1,06 ^A				1,08 ^A				1,04 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 64. Zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy [g Ca · kg⁻¹] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola	
		30% popiołu					40% popiołu						
		Źródło wapnia w nawozie (B)											
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄				
Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)													
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia		
2021	Optymalna	2,27 ^{a-d}	2,43 ^{c-e}	2,28 ^{a-d}	2,36 ^{a-e}	2,34 ^B	2,16 ^a	2,23 ^{ab}	2,20 ^{ab}	2,29 ^{a-d}	2,22 ^A	2,32 ^{a-e}	
	Obniżona o 25%	2,52 ^e	2,47 ^{de}	2,46 ^{de}	2,44 ^{de}	2,47 ^C	2,40 ^{b-d}	2,40 ^{b-d}	2,35 ^{a-e}	2,45 ^{de}	2,24 ^{AB}	2,44 ^{de}	
	Średnie	2,43 ^C		2,38 ^{BC}				2,29 ^A		2,33 ^{AB}		2,38 ^{A-C}	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\Pi_p^2 = 16,74\%$					D – $\Pi_p^2 = 65,63\%$		C×D – $\Pi_p^2 = 17,92\%$				
2022	Optymalna	2,34 ^a	2,25 ^a	2,35 ^a	24,28 ^a	2,40 ^A	2,22 ^a	2,29 ^a	2,27 ^a	2,36 ^a	2,29 ^A	2,39 ^a	
	Obniżona o 25%	2,27 ^a	2,54 ^a	2,53 ^a	25,10 ^a	2,46 ^A	2,47 ^a	2,46 ^a	2,42 ^a	2,52 ^a	2,47 ^A	2,51 ^a	
	Średnie	2,41 ^A		2,45 ^A				2,36 ^A		2,39 ^A		2,45 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\Pi_p^2 = 21,16\%$											
2023	Optymalna	2,21 ^a	1,96 ^a	2,71 ^a	2,03 ^a	2,23 ^A	2,35 ^a	2,23 ^a	2,22 ^a	2,60 ^a	2,35 ^A	2,02 ^a	
	Obniżona o 25%	2,21 ^a	2,38	2,57 ^a	1,70 ^a	2,19 ^A	1,67 ^a	2,57 ^a	2,49 ^a	2,24 ^a	2,24 ^A	1,93 ^a	
	Średnie	2,17 ^A		2,25 ^A				2,21 ^A		2,39 ^A		1,98 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\Pi_p^2 = 20,18\%$					B×C – $\Pi_p^2 = 17,86\%$		B×C×D – $\Pi_p^2 = 20,20\%$				
Średnia z lat	Optymalna	2,27 ^a	2,30 ^a	2,44 ^a	2,27 ^a	2,23 ^A	2,24 ^a	2,25 ^a	2,23 ^a	2,42 ^a	2,29 ^A	2,24 ^a	
	Obniżona o 25%	2,31 ^a	2,46 ^a	2,52 ^a	2,22 ^a	2,38 ^A	2,18 ^a	2,48 ^a	2,42 ^a	2,40 ^a	2,37 ^A	2,29 ^a	
	Średnie	2,34 ^A		2,36 ^A				2,29 ^A		2,37 ^A		2,27 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B×C – $\Pi_p^2 = 4,51\%$											
		2,40 ^B						2,31 ^A					2,38 ^{AB}
		2,40 ^B						2,31 ^A					2,38 ^{AB}
		2,43 ^A						2,38 ^A					2,45 ^A
		2,21 ^A						2,30 ^A					1,98 ^A
		2,35 ^A						2,33 ^A					2,27 ^A

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 65. Zawartość wapnia w kiszonce z kukurydzy [g Ca · kg⁻¹] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10			
2021	Optymalna	2,46 ^a	2,53 ^a	2,52 ^a	2,45 ^a	2,43 ^a	2,49 ^a	2,48 ^a	2,54 ^a	2,34 ^a
	Średnie	2,50 ^A		2,49 ^A		2,46 ^A		2,51 ^A		2,34 ^A
		2,50 ^A				2,49 ^A				2,34 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	2,38 ^a	2,38 ^a	2,44 ^a	2,40 ^a	2,50 ^a	2,43 ^a	2,55 ^a	2,57 ^a	2,41 ^a
	Średnie	2,38 ^A		2,42 ^A		2,46 ^A		2,56 ^A		2,41 ^A
		2,40 ^A				2,51 ^A				2,41 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	2,45 ^a	2,23 ^a	2,39 ^a	2,35 ^a	2,22 ^a	2,62 ^a	2,78 ^a	1,85 ^a	2,56 ^a
	Średnie	2,34 ^A		2,37 ^A		2,42 ^A		2,32 ^A		2,56 ^A
		2,35 ^A				2,37 ^A				2,56 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	2,45 ^a	2,36 ^a	2,45 ^a	2,40 ^a	2,38 ^a	2,51 ^a	2,61 ^a	2,32 ^a	2,44 ^a
	Średnie	2,41 ^A		2,42 ^A		2,45 ^A		2,46 ^A		2,44 ^A
		2,41 ^A				2,46 ^A				2,44 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 66. Zawartość N ogólnego w glebie [g N · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)									Kontrola	
		30% popiołu				40% popiołu						
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃			CaSO ₄		CaCO ₃			CaSO ₄		
Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)												
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	1,21 ^a	1,43 ^{ab}	1,30 ^a	1,43 ^{ab}	1,32 ^B	1,25 ^a	1,23 ^a	1,26 ^a	1,19 ^a	1,23 ^A	1,03 ^a
	Obniżona o 25%	1,39 ^{ab}	1,14 ^a	1,39 ^a	1,78 ^b	1,40 ^C	1,21 ^a	1,25 ^a	1,42 ^{ab}	1,38 ^{ab}	1,31 ^B	1,45 ^{ab}
	Średnie	1,29 ^{AB}		1,42 ^B			1,23 ^A		1,31 ^{AB}			1,24 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 14,42\%$ $D - \eta_p^2 = 19,84\%$ $B \times C - \eta_p^2 = 15,60\%$ $B \times C \times D - \eta_p^2 = 28,95\%$										
2022	Optymalna	1,15 ^{ab}	1,40 ^{a-c}	1,39 ^{a-c}	1,28 ^{a-c}	1,30 ^A	1,18 ^{ab}	1,29 ^{a-c}	1,35 ^{a-c}	1,10 ^{ab}	1,23 ^A	1,04 ^a
	Obniżona o 25%	1,42 ^{a-c}	1,14 ^{ab}	1,35 ^{a-c}	1,68 ^c	1,39 ^B	1,31 ^{a-c}	1,25 ^{ab}	1,48 ^{bc}	1,29 ^{a-c}	1,33 ^A	1,48 ^{bc}
	Średnie	1,28 ^{AB}		1,42 ^B			1,25 ^{AB}		1,28 ^{AB}			1,26 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 13,84\%$ $D - \eta_p^2 = 26,24\%$ $B \times C \times D - \eta_p^2 = 35,06\%$										
2023	Optymalna	1,19 ^{a-c}	1,38 ^{d-f}	1,34 ^{c-f}	1,32 ^{b-f}	1,30 ^C	1,22 ^{a-d}	1,27 ^{b-e}	1,30 ^{b-f}	1,14 ^{ab}	1,23 ^A	1,07 ^a
	Obniżona o 25%	1,37 ^{d-f}	1,18 ^{a-c}	1,32 ^{c-f}	1,72 ^g	1,40 ^D	1,25 ^{b-e}	1,29 ^{b-f}	1,49 ^f	1,33 ^{c-f}	1,32 ^{CD}	1,43 ^{e-f}
	Średnie	1,28 ^A		1,42 ^B			1,26 ^A		1,31 ^A			1,25 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 48,77\%$ $C - \eta_p^2 = 37,28\%$ $D - \eta_p^2 = 64,52\%$ $B \times C - \eta_p^2 = 46,59\%$ $B \times D - \eta_p^2 = 42,93\%$ $B \times C \times D - \eta_p^2 = 66,74\%$										
Średnia z lat	Optymalna	1,18 ^{a-d}	1,40 ^{fg}	1,34 ^{d-g}	1,31 ^{b-g}	1,31 ^C	1,22 ^{a-e}	1,56 ^{b-f}	1,30 ^{b-g}	1,14 ^{a-b}	1,23 ^B	1,45 ^a
	Obniżona o 25%	1,39 ^{e-g}	1,16 ^{a-c}	1,32 ^{b-g}	1,73 ^h	1,41 ^{D-E}	1,26 ^{b-f}	1,26 ^{b-f}	1,45 ^g	1,33 ^{c-g}	1,33 ^{C-D}	1,04 ^g
	Średnie	1,32 ^A		2,06 ^B			1,35 ^A		1,30 ^A			1,24 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 17,03\%$ $C - \eta_p^2 = 10,54\%$ $D - \eta_p^2 = 27,50\%$ $B \times C - \eta_p^2 = 14,58\%$ $B \times D - \eta_p^2 = 14,11\%$ $B \times C \times D - \eta_p^2 = 34,52\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 67. Zawartość N ogólnego w glebie [g N · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	0,96 ^a	1,06 ^a	0,96 ^a	0,99 ^a	0,93 ^a	1,03 ^a	0,91 ^a	0,95 ^a	0,86 ^a
	Średnie	1,01 ^A		0,97 ^A		0,98 ^A		0,92 ^A		0,86 ^A
		0,99 ^A				0,95 ^A				0,86 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	1,02 ^a	1,00 ^a	1,00 ^a	1,09 ^a	0,99 ^a	0,94 ^a	0,91 ^a	0,98 ^a	0,92 ^a
	Średnie	1,01 ^A		1,04 ^A		0,94 ^A		0,96 ^A		0,92 ^A
		1,02 ^A				0,95 ^A				0,92 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2023	Optymalna	1,00 ^{a-b}	1,03 ^b	1,03 ^b	1,03 ^b	0,97 ^{a-b}	0,97 ^{a-b}	0,95 ^{a-b}	0,092 ^a	0,90 ^a
	Średnie	1,01 ^B		1,03 ^B		0,97 ^{A-B}		0,97 ^A		0,90 ^A
		1,02 ^A				0,95 ^B				0,90 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	0,99 ^a	1,03 ^a	0,99 ^a	1,03 ^a	0,96 ^a	0,98 ^a	0,92 ^a	0,94 ^a	0,89 ^a
	Średnie	1,01 ^A		1,01 ^A		0,97 ^A		0,93 ^A		0,89 ^A
		1,01 ^A				0,95 ^A				0,89 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 68. Zawartość azotu mineralnego w glebie [kg Nmin · ha⁻¹] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	66,03 ^a	73,06 ^a	41,26 ^a	53,06 ^a	58,35 ^A	36,80 ^a	95,50 ^a	57,06 ^a	104,20 ^a	73,39 ^A	69,66 ^a
	Obniżona o 25%	47,80 ^a	128,53 ^b	102,93 ^a	129,96 ^b	102,30 ^B	80,96 ^a	91,00 ^a	72,76 ^a	84,26 ^a	82,25 ^A	87,16 ^a
	Średnie	78,85 ^A		62,57 ^A			76,06 ^A		79,57 ^A			78,41 ^A
		70,71 ^A					77,82 ^A					78,41 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\eta^2_p = 27,10\%$ BxC – $\eta^2_p = 18,79\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 28,65\%$										
2022	Optymalna	82,13 ^a	68,56 ^a	80,00 ^a	94,83 ^a	81,38 ^A	63,56 ^a	97,16 ^a	53,16 ^a	103,53 ^a	79,35 ^A	103,40 ^a
	Obniżona o 25%	80,46 ^a	97,40 ^a	88,33 ^a	85,50 ^a	87,92 ^A	85,10 ^a	69,06 ^a	80,00 ^a	52,46 ^a	71,65 ^A	74,70 ^a
	Średnie	82,14 ^A		87,16 ^A			78,72 ^A		72,29 ^A			89,05 ^A
		84,65 ^A					75,50 ^A					89,05 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 13,26\%$ D – $\eta^2_p = 35,23\%$ CxD – $\eta^2_p = 32,89\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 27,70\%$										
2023	Optymalna	124,06 ^a	61,23 ^a	95,26 ^a	58,76 ^a	84,83 ^A	86,06 ^a	125,53 ^a	65,40 ^a	89,13 ^a	91,53 ^A	73,20 ^a
	Obniżona o 25%	69,50 ^a	54,23 ^a	96,60 ^a	63,50 ^a	70,95 ^A	79,60 ^a	57,36 ^a	64,46 ^a	59,96 ^a	65,35 ^A	84,06 ^a
	Średnie	77,25 ^A		78,53 ^A			87,14 ^A		69,74 ^A			78,63 ^A
		77,89 ^A					78,44 ^A					78,63 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\eta^2_p = 37,85\%$ CxD – $\eta^2_p = 37,44\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 26,13\%$										
Średnia z lat	Optymalna	90,74 ^{ab}	67,62 ^{ab}	72,17 ^{ab}	68,88 ^{ab}	74,85 ^A	62,14 ^a	106,06 ^b	58,54 ^a	98,95 ^b	81,42 ^{AB}	82,08 ^{ab}
	Obniżona o 25%	65,92 ^{ab}	93,38 ^{ab}	95,95 ^{ab}	92,98 ^{ab}	87,05 ^B	81,88 ^{ab}	72,47 ^{ab}	72,41 ^{ab}	65,56 ^{ab}	73,08 ^A	81,97 ^{ab}
	Średnie	80,66 ^A		82,49 ^A			80,64 ^A		73,86 ^A			82,03 ^A
		81,57 ^A					77,25 ^A					82,03 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\eta^2_p = 22,28\%$ CxD – $\eta^2_p = 14,23\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 18,21\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 69. Zawartość azotu mineralnego w glebie [kg Nmin · ha⁻¹] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	242,07 ^c	274,77 ^c	206,40 ^{ab}	251,67 ^c	58,53 ^a	47,90 ^a	198,50 ^{ab}	54,57 ^a	189,13 ^{ab}
	Średnie	258,41 ^C		229,03 ^{BC}		53,21 ^A		126,53 ^{AB}		189,13 ^A
		243,72 ^B				89,87 ^A				189,13 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 21,24\%$ C – $\Pi_p^2 = 34,38\%$								
2022	Optymalna	103,07 ^a	63,43 ^a	89,30 ^a	93,40 ^a	104,50 ^a	89,47 ^a	98,97 ^a	91,23 ^a	96,40 ^a
	Średnie	83,25 ^A		91,35 ^A		96,98 ^A		95,10 ^A		96,40 ^A
		96,40 ^A				96,40 ^A				96,40 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 32,17\%$ C – $\Pi_p^2 = 59,99\%$								
2023	Optymalna	170,16 ^a	208,33 ^a	181,40 ^a	188,36 ^a	257,36 ^a	200,43 ^a	264,80 ^a	218,00 ^a	181,16 ^a
	Średnie	189,25 ^A		184,88 ^A		228,90 ^A		241,40 ^A		181,16 ^A
		187,06 ^A				235,15 ^A				181,16 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\Pi_p^2 = 51,55\%$								
Średnia z lat	Optymalna	171,76 ^a	182,17 ^a	159,03 ^a	177,81 ^a	140,13 ^a	112,60 ^a	187,42 ^a	121,26 ^a	155,56 ^a
	Średnie	176,97 ^A		168,42 ^A		126,36 ^A		154,34 ^A		155,56 ^A
		172,69 ^A				140,35 ^A				155,56 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\Pi_p^2 = 25,12\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 70. Zawartość fosforu w glebie [$\text{mg P} \cdot 100\text{g}^{-1}$] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)												
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	37,53 ^{a-f}	35,50 ^{a-f}	39,70 ^{c-f}	43,33 ^{ef}	39,02 ^{BC}	25,57 ^a	30,37 ^{a-d}	27,37 ^{ab}	28,17 ^{a-c}	27,86 ^A	44,67 ^f
	Obniżona o 25%	38,90 ^{b-f}	41,90 ^{d-f}	40,60 ^{d-f}	37,00 ^a	39,60 ^C	38,90 ^{b-f}	33,07 ^{a-f}	31,47 ^{a-e}	43,13 ^{ef}	36,64 ^B	37,87 ^{b-f}
	Średnie	38,45 ^B		40,15 ^B			31,97 ^A		32,53 ^A			41,26 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta_p^2 = 21,80\%$					$B \times C \times D - \eta_p^2 = 29,05\%$					
2022	Optymalna	33,00 ^{a-d}	38,00 ^{a-d}	36,83 ^{a-d}	47,17 ^d	38,75 ^B	27,67 ^a	36,50 ^{a-d}	29,00 ^{ab}	30,30 ^{a-c}	30,86 ^A	36,83 ^{a-d}
	Obniżona o 25%	34,20 ^{a-d}	42,67 ^{a-d}	43,00 ^{a-d}	45,33 ^{cd}	41,30 ^B	35,27 ^{a-d}	40,17 ^{a-d}	37,67 ^{a-d}	41,17 ^{a-d}	38,56 ^B	45,17 ^{b-d}
	Średnie	36,96 ^{AB}		43,08 ^B			34,90 ^A		34,53 ^A			41,00 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 27,46\%$					$D - \eta_p^2 = 28,52\%$					
2023	Optymalna	32,87 ^{a-c}	37,73 ^{a-c}	36,86 ^{a-c}	45,83 ^c	36,83 ^B	27,30 ^a	36,20 ^{a-c}	29,20 ^{ab}	30,06 ^{ab}	38,56 ^A	36,83 ^c
	Obniżona o 25%	33,90 ^{a-c}	42,36 ^{bc}	41,40 ^{a-c}	45,13 ^c	41,30 ^B	35,06 ^{a-c}	40,16 ^{a-c}	37,16 ^{a-c}	41,46 ^{a-c}	30,86 ^B	45,16 ^c
	Średnie	36,71 ^{AB}		42,30 ^B			34,68 ^A		34,47 ^A			40,95 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta_p^2 = 31,68\%$					$D - \eta_p^2 = 32,57\%$					
Średnia z lat	Optymalna	34,46 ^{a-d}	37,07 ^{c-e}	37,80 ^{d-f}	45,44 ^f	38,69 ^B	26,84 ^a	34,35 ^{a-d}	28,52 ^{ab}	29,51 ^{a-c}	29,80 ^A	39,33 ^{d-f}
	Obniżona o 25%	35,66 ^{b-e}	42,31 ^{ef}	41,66 ^{d-f}	42,48 ^{ef}	40,53 ^B	36,41 ^{c-e}	37,80 ^{d-f}	35,43 ^{b-e}	41,92 ^{d-f}	37,89 ^B	42,81 ^{ef}
	Średnie	37,38 ^B		41,85 ^C			33,85 ^A		33,84 ^A			41,07 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 5,23\%$		$C - \eta_p^2 = 16,79\%$		$D - \eta_p^2 = 22,29\%$		$B \times C \times D - \eta_p^2 = 8,05\%$				

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 71. Zawartość fosforu w glebie [$\text{mg P} \cdot 100\text{g}^{-1}$] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	4,83 ^{a-c}	3,90 ^a	3,10 ^a	3,80 ^a	6,83 ^{bc}	4,96 ^{a-c}	7,30 ^c	4,20 ^{ab}	3,53 ^a
	Średnie	4,36 ^{AB}		3,45 ^A		5,90 ^B		5,75 ^B		3,53 ^A
		3,90 ^A				5,82 ^B				3,53 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta^2_p = 49,93\%$								
2022	Optymalna	6,30 ^{ab}	5,83 ^{ab}	4,86 ^a	5,23 ^a	8,60 ^{bc}	7,26 ^{ab}	9,70 ^c	5,00 ^a	5,63 ^{ab}
	Średnie	6,06 ^{AB}		5,05 ^A		7,93 ^{BC}		7,35 ^C		5,63 ^{AB}
		5,55 ^A				7,64 ^B				5,63 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta^2_p = 57,10\%$ $B \times C - \eta^2_p = 30,54\%$								
2023	Optymalna	6,70 ^{a-c}	5,06 ^a	4,86 ^a	5,63 ^{ab}	8,80 ^c	9,30 ^c	8,36 ^{bc}	4,96 ^a	5,20 ^a
	Średnie	5,88 ^A		5,25 ^A		6,66 ^B		9,05 ^A		5,20 ^A
		5,56 ^A				7,86 ^A				5,20 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta^2_p = 39,12\%$ $B \times C - \eta^2_p = 42,43\%$								
Średnia z lat	Optymalna	5,94 ^{ab}	4,93 ^a	4,27 ^a	4,88 ^a	8,08 ^b	7,17 ^{ab}	8,45 ^b	4,72 ^a	4,78 ^a
	Średnie	5,43 ^{AB}		4,58 ^A		7,62 ^C		6,58 ^{BC}		4,78 ^A
		5,01 ^A				7,10 ^B				4,78 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta^2_p = 10,61\%$ $C - \eta^2_p = 26,33\%$ $B \times C - \eta^2_p = 14,95\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 72. Zawartość potasu w glebie [mg K₂O · 100 g⁻¹] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola	
		30% popiołu					40% popiołu						
		Źródło wapnia w nawozie (B)											
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄				
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)											
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia				
2021	Optymalna	25,83 ^{a-c}	21,30 ^{a-b}	23,40 ^{a-b}	25,16 ^{a-b}	23,92 ^A	26,26 ^{a-c}	22,03 ^{a-b}	22,60 ^{a-b}	17,60 ^a	22,15 ^A	23,80 ^{a-b}	
	Obniżona o 25%	22,50 ^{a-b}	27,36 ^{b-c}	24,23 ^{a-b}	24,60 ^{a-b}	24,67 ^A	28,93 ^{b-c}	20,83 ^{a-b}	22,53 ^{a-b}	29,86 ^{b-c}	25,54 ^A	35,23 ^c	
	Średnie	24,25 ^A		24,35 ^A			24,51 ^A		23,15 ^A			25,51 ^B	
		24,30 ^A										23,83 ^A	25,51 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\eta^2_p = 27,10\%$ BxC – $\eta^2_p = 18,79\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 28,65\%$											
2022	Optymalna	19,30 ^{a-c}	18,93 ^{a-b}	20,36 ^{a-c}	25,33 ^{a-e}	20,98 ^A	21,76 ^{a-d}	22,93 ^{a-d}	27,00 ^{b-e}	18,00 ^a	22,42 ^{A-B}	27,66 ^{c-e}	
	Obniżona o 25%	24,63 ^{a-e}	26,83 ^{b-e}	27,76 ^{c-e}	24,50 ^{a-e}	25,93 ^C	20,50 ^{a-d}	24,30 ^{a-e}	22,36 ^{a-d}	28,90 ^{d-e}	24,01 ^{A-C}	31,57 ^e	
	Średnie	22,42 ^A		24,49 ^A			22,37 ^A		24,06 ^A			29,61 ^B	
		23,45 ^A										23,22 ^A	29,61 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 13,26\%$ D – $\eta^2_p = 35,23\%$ CxD – $\eta^2_p = 32,89\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 27,70\%$											
2023	Optymalna	19,50 ^a	19,53 ^a	21,30 ^{a-b}	25,36 ^{a-c}	21,42 ^A	25,86 ^{b-c}	24,96 ^{a-c}	26,23 ^{b-c}	19,70 ^a	24,19 ^B	27,36 ^{b-c}	
	Obniżona o 25%	25,00 ^{a-c}	27,16	27,66 ^c	24,93 ^{a-c}	26,19 ^B	22,50 ^{a-c}	25,06 ^{a-c}	24,13 ^{a-c}	28,60 ^c	25,07 ^B	27,76 ^c	
	Średnie	24,66 ^A		24,81 ^{A-B}			24,60 ^A		24,61 ^A			27,56 ^B	
		23,80 ^A										24,63 ^A	27,56 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\eta^2_p = 37,85\%$ CxD – $\eta^2_p = 37,44\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 26,13\%$											
Średnia z lat	Optymalna	21,54 ^{a-c}	19,92 ^{a-b}	21,68 ^{a-d}	25,28 ^{c-f}	22,11 ^A	24,63 ^{b-f}	23,31 ^{a-e}	25,27 ^{c-f}	18,43 ^a	22,91 ^{A-B}	26,27 ^{c-f}	
	Obniżona o 25%	24,04 ^{b-e}	27,12 ^{e-g}	26,55 ^{d-f}	24,67 ^{b-f}	25,60 ^C	23,97 ^{b-e}	23,40 ^{b-e}	23,01 ^{a-e}	29,12 ^{f-g}	24,87 ^{B-C}	31,52 ^g	
	Średnie	23,15 ^A		24,55 ^A			23,83 ^A		23,96 ^A			28,90 ^B	
		23,85 ^A										23,85 ^A	28,90 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		D – $\eta^2_p = 22,28\%$ CxD – $\eta^2_p = 14,23\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 18,21\%$											

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 73. Zawartość potasu w glebie [mg K₂O · 100 g⁻¹] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	13,36 ^a	12,03 ^a	16,03 ^a	18,90 ^a	18,40 ^a	14,23 ^a	19,90 ^a	13,76 ^a	15,10 ^a
	Średnie	12,70 ^A		17,46 ^A		16,31 ^A		16,83 ^A		15,10 ^A
		15,08 ^A				16,57 ^A				15,10 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta_p^2 = 21,24\%$ C – $\eta_p^2 = 34,38\%$								
2022	Optymalna	17,23 ^a	24,33 ^{b-c}	16,76 ^a	17,96 ^{ab}	24,66 ^c	20,90 ^{a-c}	24,36 ^{b-c}	16,96 ^a	16,56 ^a
	Średnie	20,78 ^{A-B}		17,36 ^A		22,78 ^B		20,66 ^{AB}		16,56 ^A
		19,07 ^A				21,72 ^B				16,56 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta_p^2 = 32,17\%$ C – $\eta_p^2 = 59,99\%$								
2023	Optymalna	18,36 ^{a-b}	20,33 ^{a-c}	18,70 ^{ab}	18,46 ^{ab}	24,90 ^{b-c}	21,20 ^{a-c}	26,10 ^c	18,30 ^a	15,96 ^a
	Średnie	19,35 ^{A-C}		18,58 ^{AB}		23,50 ^C		22,20 ^{BC}		15,96 ^A
		18,96 ^A				22,62 ^B				15,96 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta_p^2 = 51,55\%$								
Średnia z lat	Optymalna	16,32 ^a	18,90 ^{ab}	17,16 ^a	18,44 ^{ab}	22,65 ^b	18,77 ^{ab}	23,45 ^b	16,34 ^a	15,87 ^a
	Średnie	17,61 ^A		17,80 ^{AB}		20,71 ^B		19,90 ^{AB}		15,87 ^A
		17,70 ^A				20,30 ^B				15,87 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta_p^2 = 25,12\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 74. Zawartość wapnia w glebie [mg CaO · kg⁻¹] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	średnia		
2021	Optymalna	1010,0 ^g	967,3 ^{fg}	846,0 ^{de}	893,3 ^{e-g}	929,1 ^B	817,6 ^{c-e}	973,0 ^{fg}	707,6 ^{a-c}	793,6 ^{b-e}	823,0 ^A	689,0 ^{ab}
	Obniżona o 25%	835,3 ^{de}	979,6 ^{fg}	863,0 ^{d-f}	876,3 ^{d-f}	888,5 ^B	765,0 ^{a-d}	829,6 ^{de}	818,3 ^{c-e}	833,6 ^{de}	811,6 ^A	666,6 ^a
	Średnie	948,1 ^D		869,6 ^C			846,3 ^C		788,3 ^B			677,8 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 50,72\%$ C – $\eta^2_p = 47,25\%$ D – $\eta^2_p = 13,98\%$ BxC – $\eta^2_p = 47,24\%$ CxD – $\eta^2_p = 25,47\%$										
2022	Optymalna	1030,6 ^g	982,6 ^{e-g}	861,6 ^{c-f}	908,6 ^{d-g}	945,9 ^C	833,0 ^{b-d}	1039,3 ^g	723,0 ^{a-c}	809,0 ^{a-d}	851,1 ^{AB}	689,0 ^a
	Obniżona o 25%	850,6 ^{b-f}	995,0 ^{fg}	878,6 ^{d-f}	891,6 ^{d-g}	904,0 ^{BC}	780,3 ^{a-d}	845,3 ^{b-e}	833,6 ^{b-d}	849,0 ^{b-f}	827,1 ^A	704,6 ^{a-b}
	Średnie	964,7 ^D		885,1 ^C			874,5 ^C		803,6 ^B			693,5 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 44,69\%$ C – $\eta^2_p = 42,17\%$ D – $\eta^2_p = 13,96\%$ BxD – $\eta^2_p = 41,62\%$ CxD – $\eta^2_p = 23,81\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 20,06\%$										
2023	Optymalna	1045,0 ^h	997,0 ^{f-h}	877,0 ^{d-f}	924,0 ^{e-g}	960,7 ^C	871,3 ^{de}	1190,0 ⁱ	746,6 ^{a-c}	824,3 ^{b-e}	908,1 ^B	719,0 ^{ab}
	Obniżona o 25%	866,0 ^{c-e}	1010,3 ^{gh}	893,0 ^{d-g}	906,0 ^{d-g}	918,8 ^{BC}	795,6 ^{a-d}	860,6 ^{c-e}	848,0 ^{c-e}	863,3 ^{c-e}	841,9 ^A	697,6 ^a
	Średnie	979,5 ^D		900,0 ^C			929,4 ^C		820,5 ^B			708,3 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 65,80\%$ C – $\eta^2_p = 63,03\%$ D – $\eta^2_p = 38,26\%$ BxC – $\eta^2_p = 36,76\%$ BxD – $\eta^2_p = 60,00\%$ CxD – $\eta^2_p = 45,84\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 37,30\%$										
Średnia z lat	Optymalna	1028,5 ^{hi}	982,3 ^{gh}	861,5 ^{d-f}	908,6 ^{fg}	945,2 ^D	840,6 ^{c-f}	1067,4 ⁱ	725,7 ^{ab}	809,0 ^{cd}	860,7 ^B	704,2 ^a
	Obniżona o 25%	850,6 ^{c-f}	995,0 ^{hi}	878,2 ^{d-f}	891,3 ^{ef}	903,8 ^C	780,3 ^{bc}	845,2 ^{c-f}	833,3 ^{c-e}	848,6 ^{c-f}	826,8 ^A	682,2 ^a
	Średnie	964,1 ^D		884,9 ^C			883,4 ^C		804,1 ^B			693,2 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 43,28\%$ C – $\eta^2_p = 40,27\%$ D – $\eta^2_p = 15,00\%$ BxC – $\eta^2_p = 12,82\%$ BxD – $\eta^2_p = 40,17\%$ CxD – $\eta^2_p = 22,71\%$ BxCxD – $\eta^2_p = 18,38\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 75. Zawartość wapnia w glebie [$\text{mg CaO} \cdot \text{kg}^{-1}$] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Ilość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	473,0 ^{ab}	481,3 ^{ab}	487,0 ^{ab}	503,6 ^{ab}	532,3 ^b	563,3 ^b	527,3 ^b	503,3 ^{ab}	400,0 ^a
	Średnie	477,1 ^{AB}		495,3 ^B		547,8 ^B		515,3 ^B		400,0 ^A
		486,2 ^B				531,5 ^C				400,0 ^A
Udział obserwowanej znamięności [%] *										
2022	Optymalna	488,3 ^{ab}	496,6 ^{ab}	502,6 ^{ab}	519,0 ^{ab}	547,6 ^b	579,0 ^b	542,6 ^b	518,6 ^{ab}	415,6 ^a
	Średnie	492,5 ^{AB}		510,8 ^B		563,3 ^B		530,6 ^B		415,6 ^A
		501,6 ^B				547,0 ^C				415,6 ^A
Udział obserwowanej znamięności [%] *										
2023	Optymalna	502,6 ^{ab}	511,0 ^{ab}	518,0 ^{ab}	534,3 ^{ab}	562,0 ^b	593,3 ^b	558,0 ^b	534,0 ^{ab}	430,0 ^a
	Średnie	506,8 ^{AB}		526,1 ^B		577,6 ^B		546,0 ^B		430,0 ^A
		516,5 ^B				561,8 ^C				430,0 ^A
Udział obserwowanej znamięności [%] *										
Średnia z lat	Optymalna	488,0 ^b	496,3 ^{bc}	502,5 ^{bc}	519,0 ^{bc}	547,3 ^{cd}	578,5 ^d	542,6 ^{b-d}	518,6 ^{bc}	415,2 ^a
	Średnie	492,1 ^B		510,7 ^{BC}		562,9 ^D		530,6 ^{CD}		415,2 ^A
		501,4 ^B				546,8 ^C				415,2 ^A
Udział obserwowanej znamięności [%] *										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 76. Zawartość magnezu w glebie [mg Mg · 100g⁻¹] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola	
		30% popiołu					40% popiołu						
		Źródło wapnia w nawozie (B)											
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄				
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)											
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia				
2021	Optymalna	10,23 ^{a-c}	10,10 ^{ab}	11,83 ^{b-d}	10,16 ^{a-c}	10,54 ^A	10,56 ^{a-c}	9,63 ^{ab}	8,86 ^a	10,40 ^{a-c}	9,86 ^A	12,46 ^{ab}	
	Obniżona o 25%	10,73 ^{a-c}	11,06 ^{a-c}	9,50 ^{ab}	10,86 ^{a-c}	10,58 ^A	11,33 ^{b-d}	13,50 ^d	11,50 ^{b-d}	11,80 ^{b-d}	12,03 ^B	9,86 ^{cd}	
	Średnie	10,53 ^A		10,59 ^A			11,25 ^A		10,64 ^A			11,16 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta^2_p = 21,34\%$					$B \times D - \eta^2_p = 10,71\%$			$C \times D - \eta^2_p = 21,62\%$		$B \times C \times D - \eta^2_p = 30,79\%$	
2022	Optymalna	10,60 ^{ab}	10,83 ^{ab}	10,93 ^{ab}	10,56 ^{ab}	10,73 ^{AB}	10,50 ^{ab}	9,43 ^a	10,36 ^{ab}	11,00 ^{ab}	10,32 ^A	11,26 ^{ab}	
	Obniżona o 25%	10,63 ^{ab}	11,13 ^{ab}	10,63 ^{ab}	10,80 ^{ab}	10,80 ^{AB}	11,06 ^{ab}	11,93 ^b	11,36 ^{ab}	11,03 ^{ab}	11,35 ^B	9,16 ^a	
	Średnie	10,80 ^A		10,73 ^A			10,73 ^A		10,94 ^A			10,21 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		10,76 ^A										10,21 ^A	
2023	Optymalna	10,66 ^{a-c}	11,10 ^{bc}	10,96 ^{bc}	10,66 ^{a-c}	10,85 ^{AB}	11,73 ^c	9,56 ^{ab}	9,66 ^{ab}	11,03 ^{bc}	10,50 ^A	11,36 ^{bc}	
	Obniżona o 25%	10,73 ^{a-c}	11,36 ^{bc}	10,76 ^{a-c}	11,30 ^{bc}	11,04 ^{AB}	10,80 ^{a-c}	12,03 ^c	11,46 ^{bc}	11,26 ^{bc}	11,39 ^B	8,96 ^a	
	Średnie	10,96 ^A		10,92 ^A			11,03 ^A		10,85 ^A			10,16 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		10,94 ^B										10,16 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B \times C \times D - \eta^2_p = 39,39\%$											
Średnia z lat	Optymalna	10,50 ^{a-e}	10,67 ^{b-e}	11,24 ^{de}	10,46 ^{a-c}	10,72 ^{AB}	10,93 ^{de}	9,54 ^{ab}	9,63 ^{a-c}	10,81 ^{c-e}	10,23 ^A	11,70 ^{ef}	
	Obniżona o 25%	10,70 ^{b-e}	11,18 ^{de}	10,30 ^{a-c}	10,98 ^{de}	10,79 ^B	11,06 ^{de}	12,48 ^f	11,44 ^{d-f}	11,36 ^{d-f}	11,59 ^C	9,33 ^a	
	Średnie	10,76 ^A		10,75 ^A			11,00 ^A		10,81 ^A			10,51 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta^2_p = 6,51\%$					$C \times D - \eta^2_p = 7,17\%$						
		10,75 ^A										10,51 ^A	

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 77. Zawartość magnezu w glebie [mg Mg· 100g⁻¹] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	12,53 ^a	10,10 ^a	14,30 ^a	14,23 ^a	9,30 ^a	13,30 ^a	11,73 ^a	13,76 ^a	12,26 ^a
	Średnie	11,31 ^A		12,75 ^A		11,30 ^A		14,26 ^A		12,26 ^A
		12,79 ^A				12,02 ^A				12,26 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *										
2022	Optymalna	10,76 ^a	12,73 ^a	13,73 ^{ab}	14,73 ^b	10,90 ^a	11,46 ^a	12,10 ^a	13,30 ^a	14,10 ^b
	Średnie	11,75 ^A		14,23 ^A		11,18 ^A		12,70 ^A		14,10 ^A
		12,99 ^A				11,94 ^A				14,10 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 24,13\%$								
2023	Optymalna	11,46 ^a	13,00 ^a	13,93 ^a	15,00 ^b	11,96 ^a	11,03 ^a	14,83 ^b	14,53 ^b	14,46 ^{ab}
	Średnie	12,23 ^A		14,46 ^A		11,50 ^A		14,68 ^A		14,46 ^A
		13,35 ^A				13,09 ^A				14,46 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 32,01\%$								
Średnia z lat	Optymalna	11,58 ^{ab}	11,94 ^{ab}	13,98 ^{ab}	14,65 ^b	10,72 ^a	11,93 ^{ab}	12,88 ^{ab}	13,86 ^{ab}	13,61 ^{ab}
	Średnie	11,76 ^A		14,32 ^B		11,32 ^A		13,37 ^{A-B}		13,61 ^A
		13,04 ^A				12,35 ^A				13,61 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 21,06\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 78. Zawartość siarki w glebie [mg S-SO₄ · 100g⁻¹] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola	
		30% popiołu					40% popiołu						
		Źródło wapnia w nawozie (B)											
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄				
Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)													
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia		
2021	Optymalna	1,82 ^{d-g}	1,73 ^{b-f}	2,17 ^h	1,89 ^{e-g}	1,90 ^B	1,46 ^b	1,86 ^{e-g}	1,90 ^{e-h}	2,47 ⁱ	1,92 ^B	1,52 ^a	
	Obniżona o 25%	1,66 ^a	1,75 ^{c-f}	2,03 ^{g-h}	1,81 ^{d-g}	1,81 ^B	1,46 ^b	1,57 ^{b-d}	1,78 ^{c-g}	1,97 ^{f-h}	1,69 ^A	0,61 ^{b-c}	
	Średnie	1,74 ^C		1,97 ^D			1,58 ^B		2,03 ^D			1,06 ^A	
		1,86 ^B										1,81 ^B	1,06 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 82,30\%$ C – $\Pi_p^2 = 70,29\%$ D – $\Pi_p^2 = 72,56\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 29,26\%$ C×D – $\Pi_p^2 = 39,17\%$											
2022	Optymalna	1,88 ^{d-g}	1,76 ^{b-f}	2,20 ^{g-h}	1,95 ^{e-g}	1,95 ^B	1,48 ^{a-b}	1,89 ^{d-g}	1,96 ^{e-g}	2,49 ^h	1,95 ^B	1,55 ^{b-c}	
	Obniżona o 25%	1,73 ^{b-e}	1,77 ^{b-f}	2,06 ^{f-g}	1,87 ^{c-g}	1,86 ^B	1,48 ^{a-b}	1,60 ^{b-d}	1,61 ^{b-d}	1,99 ^{e-g}	1,67 ^A	1,18 ^a	
	Średnie	1,78 ^C		2,02 ^D			1,61 ^B		2,01 ^D			1,36 ^A	
		1,90 ^C										1,81 ^B	1,36 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 74,63\%$ C – $\Pi_p^2 = 67,77\%$ D – $\Pi_p^2 = 58,33\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 19,93\%$ B×D – $\Pi_p^2 = 15,94\%$ C×D – $\Pi_p^2 = 17,82\%$											
2023	Optymalna	1,93 ^a	1,81 ^a	2,24 ^{f-g}	2,00 ^{d-f}	1,99 ^C	1,53 ^{a-b}	1,93 ^a	2,01 ^{e-f}	2,54 ^g	2,00 ^C	1,59 ^a	
	Obniżona o 25%	1,77 ^{b-e}	1,82 ^{b-e}	2,11 ^{e-f}	1,92 ^{c-f}	1,91 ^B	1,53 ^{a-b}	1,65 ^{b-d}	1,78 ^{b-e}	2,02 ^{e-f}	1,74 ^A	1,22 ^{b-c}	
	Średnie	1,83 ^C		2,09 ^D			1,41 ^B		2,09 ^D			1,41 ^A	
		1,95 ^B										1,87 ^B	1,41 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 73,15\%$ C – $\Pi_p^2 = 59,79\%$ D – $\Pi_p^2 = 51,61\%$ C×D – $\Pi_p^2 = 23,17\%$											
Średnia z lat	Optymalna	1,88 ^{e-h}	1,76 ^{d-f}	2,20 ^h	1,95 ^{f-h}	1,95 ^C	1,49 ^b	1,89 ^{f-h}	1,96 ^{f-h}	2,50 ^h	1,96 ^C	1,55 ^{b-c}	
	Obniżona o 25%	1,72 ^{c-e}	1,78 ^{d-f}	2,07 ^h	1,87 ^{e-g}	1,86 ^C	1,49 ^{c-e}	1,60 ^{b-d}	1,72 ^{c-e}	1,99 ^{g-h}	1,70 ^A	1,00 ^a	
	Średnie	1,78 ^C		2,02 ^D			1,62 ^B		2,04 ^D			1,28 ^A	
		1,90 ^C										1,83 ^B	1,28 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 64,56\%$ C – $\Pi_p^2 = 51,56\%$ D – $\Pi_p^2 = 46,47\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 11,81\%$ B×D – $\Pi_p^2 = 6,91\%$ C×D – $\Pi_p^2 = 16,20\%$											

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 79. Zawartość siarki w glebie [$\text{mg S-SO}_4 \cdot 100\text{g}^{-1}$] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	1,57 ^b	1,65 ^b	1,76 ^b	1,93 ^b	1,51 ^b	1,67 ^b	1,90 ^b	1,80 ^b	0,77 ^a
	Średnie	1,66 ^B		1,85 ^B		1,57 ^B		1,85 ^B		0,77 ^A
		1,73 ^B				1,72 ^B				0,77 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 44,26\%$								
2022	Optymalna	1,64 ^b	1,68 ^b	1,79 ^{b-d}	2,00 ^d	1,79 ^{b-d}	1,70 ^{bc}	1,97 ^{cd}	1,82 ^{b-d}	0,79 ^a
	Średnie	1,66 ^B		1,89 ^C		1,74 ^{BC}		1,89 ^C		0,79 ^A
		1,78 ^B				1,82 ^B				0,79 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 56,03\%$ $C - \eta_p^2 = 32,93\%$								
2023	Optymalna	1,69 ^b	1,73 ^b	1,84 ^{b-d}	2,04 ^d	1,84 ^{b-d}	1,74 ^{bc}	2,01 ^{cd}	1,87 ^{b-d}	0,85 ^a
	Średnie	1,71 ^B		1,94 ^C		1,79 ^{B-C}		1,94 ^C		0,85 ^A
		1,82 ^B				1,87 ^B				0,85 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 55,59\%$ $C - \eta_p^2 = 33,03\%$								
Średnia z lat	Optymalna	1,63 ^b	1,68 ^{bc}	1,80 ^{b-d}	1,99 ^e	1,71 ^{bc}	1,70 ^{bc}	1,96 ^{de}	1,83 ^{c-e}	0,80 ^a
	Średnie	1,66 ^B		1,89 ^C		1,71 ^B		1,89 ^C		0,80 ^A
		1,78 ^B				1,80 ^B				0,80 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta_p^2 = 41,80\%$ $C - \eta_p^2 = 13,67\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 80. Zawartość cynku w glebie [mg Zn · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)									Kontrola	
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃			CaSO ₄			CaCO ₃				CaSO ₄
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia			
2021	Optymalna	81,60 ^d	45,13 ^{ab}	46,76 ^b	43,82 ^{ab}	54,08 ^B	64,00 ^c	65,00 ^c	80,46 ^d	81,30 ^d	47,83 ^A	47,83 ^b
	Obniżona o 25%	81,73 ^d	46,20 ^{ab}	43,73 ^{ab}	37,66 ^a	52,33 ^{AB}	62,00 ^c	63,50 ^c	81,56 ^d	88,90 ^d	47,00 ^A	47,00 ^b
	Średnie	63,66 ^C			42,75 ^A			63,77 ^C			83,05 ^D	
		53,20 ^B					73,41 ^C				47,41 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta_p^2 = 89,27\%$ B×C – $\eta_p^2 = 82,46\%$										
2022	Optymalna	83,00 ^d	26,20 ^{ab}	43,13 ^{ab}	46,80 ^{ab}	54,78 ^B	64,03 ^c	65,90 ^c	80,60 ^d	89,20 ^d	73,20 ^C	48,33 ^c
	Obniżona o 25%	81,80 ^d	46,23 ^{ab}	45,13 ^{ab}	37,80 ^a	52,74 ^{AB}	63,40 ^c	63,63 ^c	81,60 ^d	82,26 ^d	74,45 ^C	47,30 ^{ab}
	Średnie	64,30 ^B			43,21 ^A			64,24 ^B			83,41 ^C	
		53,76 ^B					73,82 ^C				47,81 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta_p^2 = 86,57\%$ B×C – $\eta_p^2 = 77,67\%$										
2023	Optymalna	84,86 ^c	49,00 ^a	47,83 ^a	43,43 ^a	56,28 ^A	65,06 ^b	66,53 ^c	83,40 ^d	89,83 ^d	74,81 ^B	50,33 ^a
	Obniżona o 25%	83,80 ^c	47,26 ^a	47,00 ^a	40,60 ^a	54,66 ^A	64,26 ^c	66,43 ^c	82,63 ^d	84,26 ^d	76,04 ^B	47,93 ^a
	Średnie	66,23 ^B			44,71 ^A			65,82 ^B			85,03 ^C	
		55,47 ^B					75,42 ^C				49,13 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta_p^2 = 85,55\%$ B×C – $\eta_p^2 = 70,71\%$										
Średnia z lat	Optymalna	83,15 ^e	46,77 ^{bc}	47,13 ^{bc}	43,13 ^{ab}	55,05 ^A	64,36 ^d	66,01 ^d	81,48 ^e	82,61 ^e	73,61 ^B	48,83 ^c
	Obniżona o 25%	82,44 ^e	46,56 ^{bc}	42,28 ^{bc}	38,68 ^a	53,24 ^A	63,55 ^d	64,52 ^d	81,93 ^e	89,31 ^f	74,83 ^B	47,41 ^{ab}
	Średnie	64,73 ^C			43,56 ^A			64,61 ^C			83,83 ^D	
		54,14 ^B					74,22 ^C				48,12 ^A	
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta_p^2 = 88,83\%$ B×C – $\eta_p^2 = 76,88\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 81. Zawartość cynku w glebie [mg Zn · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	38,53 ^{bc}	42,40 ^c	35,86 ^{ab}	40,46 ^{bc}	42,86 ^c	43,03 ^c	31,70 ^a	40,66 ^{bc}	41,13 ^{bc}
	Średnie	40,46 ^{BC}		38,16 ^{AB}		42,95 ^C		36,18 ^A		41,13 ^{BC}
		39,31 ^A				39,56 ^A				41,13 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 66,44\%$				C – $\eta^2_p = 65,13\%$		B×C – $\eta^2_p = 48,43\%$		
2022	Optymalna	38,83 ^{bc}	43,36 ^c	36,23 ^{ab}	45,50 ^{bc}	43,83 ^c	43,06 ^c	33,10 ^a	40,80 ^a	41,53 ^{bc}
	Średnie	41,10 ^{BC}		38,36 ^{AB}		43,45 ^C		36,95 ^A		41,53 ^{BC}
		39,73 ^A				40,20 ^A				41,53 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 67,74\%$				C – $\eta^2_p = 60,71\%$		B×C – $\eta^2_p = 46,91\%$		
2023	Optymalna	39,46 ^{bc}	45,23 ^e	38,23 ^b	41,53 ^{cd}	45,83 ^e	44,10 ^e	34,69 ^a	43,60 ^{de}	41,73 ^d
	Średnie	42,35 ^B		39,88 ^A		44,96 ^C		39,28 ^A		41,73 ^A
		41,11 ^A				42,12 ^B				41,73 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 89,90\%$				C – $\eta^2_p = 89,69\%$		B×C – $\eta^2_p = 88,38\%$		
Średnia z lat	Optymalna	38,94 ^{bc}	43,66 ^{ef}	36,77 ^b	40,83 ^{cd}	44,17 ^f	43,40 ^{d-f}	33,25 ^a	41,68 ^{d-f}	41,46 ^{c-e}
	Średnie	41,30 ^B		38,80 ^A		43,78 ^C		37,42 ^A		41,46 ^B
		40,05 ^A				40,63 ^A				41,46 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 62,55\%$				C – $\eta^2_p = 59,31\%$		B×C – $\eta^2_p = 47,82\%$		

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 82. Zawartość manganu w glebie [mg Mn · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia			
2021	Optymalna	244,3 ^{a-c}	340,0 ^e	292,6 ^{c-e}	228,6 ^a	276,4 ^B	287,3 ^{b-e}	249,0 ^{a-c}	308,3 ^{de}	232,0 ^a	269,1 ^A	238,3 ^{a-c}
	Obniżona o 25%	293,0 ^{c-e}	230,3 ^a	322,6 ^{de}	243,0 ^{a-c}	272,2 ^{AB}	278,6 ^{a-d}	248,3 ^{a-c}	325,0 ^{de}	234,0 ^{ab}	271,5 ^{AB}	233,0 ^{ab}
	Średnie	247,91 ^B		271,7 ^B			265,8 ^B		274,8 ^B			235,6 ^A
		274,3 ^B										235,6 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 68,73\%$		B×C – $\eta^2_p = 56,98\%$			B×D – $\eta^2_p = 22,23\%$		C×D – $\eta^2_p = 49,51\%$		B×C×D – $\eta^2_p = 40,30\%$	
2022	Optymalna	247,0 ^{a-c}	342,3 ^e	295,6 ^{c-e}	234,0 ^a	279,7 ^A	280,0 ^{b-d}	251,3 ^{ab}	311,3 ^{de}	267,3 ^a	272,5 ^A	241,0 ^{ab}
	Obniżona o 25%	260,0 ^{c-e}	235,6 ^a	325,0 ^{de}	245,6 ^{a-c}	275,5 ^A	281,6 ^{a-c}	253,6 ^{ab}	327,3 ^{de}	236,6 ^a	274,8 ^A	236,0 ^a
	Średnie	280,2 ^B		275,0 ^B			269,1 ^{AB}		278,1 ^B			238,5 ^A
		277,6 ^B										238,5 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 70,78\%$		B×C – $\eta^2_p = 60,28\%$			B×D – $\eta^2_p = 21,22\%$		C×D – $\eta^2_p = 52,94\%$		B×C×D – $\eta^2_p = 42,54\%$	
2023	Optymalna	249,6 ^{a-d}	358,2 ^e	298,9 ^{cd}	235,3 ^a	285,5 ^A	292,6 ^{a-f}	254,0 ^{a-e}	318,5 ^{de}	238,6 ^{ab}	275,9 ^A	243,6 ^{a-c}
	Obniżona o 25%	288,1 ^{b-e}	237,0 ^{ab}	330,1 ^{de}	248,3 ^{a-c}	275,8 ^A	286,0 ^{a-f}	255,0 ^{a-e}	327,0 ^{de}	239,3 ^{ab}	276,8 ^A	240,3 ^{ab}
	Średnie	283,2 ^B		278,1 ^B			271,9 ^B		280,9			242,0 ^A
		280,6 ^B										242,0 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 72,75\%$		B×C – $\eta^2_p = 70,92\%$			B×D – $\eta^2_p = 29,20\%$		C×D – $\eta^2_p = 53,61\%$		B×C×D – $\eta^2_p = 44,88\%$	
Średnia z lat	Optymalna	247,0 ^a	342,4 ^e	296,1 ^{bc}	232,6 ^a	279,8 ^A	290,0 ^{bc}	251,4 ^a	311,7 ^{cd}	236,0 ^a	273,3 ^A	241,0 ^a
	Obniżona o 25%	296,4 ^{bc}	234,3 ^a	325,1 ^{de}	245,6 ^a	275,3 ^A	282,1 ^c	252,3 ^a	327,4 ^e	236,6 ^a	274,6 ^A	236,4 ^a
	Średnie	280,0 ^B		274,8 ^{AB}			263,9 ^A		277,9 ^{AB}			238,7 ^A
		277,4 ^B										238,7 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 69,99\%$		B×C – $\eta^2_p = 58,53\%$			B×D – $\eta^2_p = 21,04\%$		C×D – $\eta^2_p = 51,12\%$		B×C×D – $\eta^2_p = 41,67\%$	

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 83. Zawartość manganu w glebie [mg Mn · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	257,0 ^a	253,3 ^a	309,3 ^b	295,6 ^{ab}	253,03 ^a	292,6 ^{ab}	288,6 ^{ab}	251,3 ^a	280,0 ^{ab}
	Średnie	255,1 ^A		302,5 ^B		273,0 ^{AB}		270,0 ^A		280,0 ^{AB}
		278,8 ^A				271,5 ^A				280,0 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 35,62\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 45,70\%$								
2022	Optymalna	256,3 ^a	256,0 ^a	314,6 ^b	298,6 ^{ab}	255,6 ^a	295,3 ^{ab}	294,0 ^{ab}	254,3 ^a	283,6 ^a
	Średnie	257,6 ^A		306,6 ^B		275,5 ^A		274,14 ^A		283,6 ^{AB}
		282,1 ^A				274,8 ^A				283,6 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 42,25\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 50,96\%$								
2023	Optymalna	262,0 ^a	258,6 ^a	316,0 ^b	303,0 ^{ab}	258,3 ^a	298,0 ^{ab}	295,3 ^{ab}	258,6 ^a	286,3 ^{ab}
	Średnie	260,3 ^A		309,5 ^B		278,1 ^A		277,0 ^A		286,3 ^{AB}
		284,9 ^A				277,5 ^A				286,3 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 44,00\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 50,24\%$								
Średnia z lat	Optymalna	259,4 ^a	256,0 ^a	313,3 ^b	299,1 ^{bc}	255,7 ^a	295,3 ^{bc}	292,6 ^{bc}	254,7 ^a	283,3 ^a
	Średnie	257,7 ^A		306,2 ^C		275,5 ^B		273,7 ^B		283,3 ^B
		281,9 ^A				274,6 ^A				283,3 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 39,65\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 47,98\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 84. Zawartość miedzi w glebie [mg Cu · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)												
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	9,16 ^{b-c}	6,63 ^a	7,80 ^{cd}	5,56 ^a	7,29 ^A	7,23 ^{a-d}	5,83 ^a	7,10 ^{a-c}	7,03 ^{ab}	6,80 ^A	7,20 ^{a-c}
	Obniżona o 25%	7,10 ^{a-c}	7,00 ^{ab}	9,53 ^d	7,03 ^{ab}	7,66 ^A	9,40 ^{cd}	7,10 ^{a-c}	7,10 ^{a-c}	5,86 ^a	7,36 ^A	6,26 ^a
	Średnie	7,47 ^A		7,48 ^A				7,39 ^A		6,77 ^A		6,73 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\Pi_p^2 = 59,22\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 15,70\%$										
2022	Optymalna	9,53 ^{c-e}	7,03 ^{ab}	8,03 ^{b-e}	5,70 ^a	7,57 ^{AB}	7,60 ^{a-d}	6,23 ^{ab}	7,33 ^{ab}	7,16 ^{ab}	7,08 ^A	7,56 ^{a-d}
	Obniżona o 25%	7,33 ^{ab}	7,13 ^{ab}	9,93 ^e	7,40 ^{a-c}	7,95 ^B	9,63 ^{de}	7,23 ^{ab}	7,50 ^{a-d}	6,00 ^{ab}	7,59 ^{AB}	6,50 ^{ab}
	Średnie	7,75 ^A		7,76 ^A				7,67 ^A		7,00 ^A		7,03 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\Pi_p^2 = 63,77\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 15,59\%$ C×D – $\Pi_p^2 = 16,88\%$										
2023	Optymalna	9,76 ^{cd}	7,06 ^{ab}	8,20 ^{bc}	6,36 ^{ab}	7,85 ^{A-C}	7,83 ^{a-c}	6,26 ^{ab}	7,51 ^{ab}	7,83 ^{a-c}	7,35 ^A	7,80 ^{ab}
	Obniżona o 25%	7,50 ^{ab}	7,80 ^{ab}	10,36 ^d	7,63 ^{ab}	8,32 ^C	7,90 ^{a-c}	10,23 ^d	7,53 ^{ab}	6,23 ^a	7,97 ^{BC}	6,66 ^{ab}
	Średnie	8,03 ^B		8,14 ^B				8,05 ^B		7,27 ^A		7,23 ^{AB}
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\Pi_p^2 = 65,16\%$ D – $\Pi_p^2 = 10,74\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 25,61\%$ C×D – $\Pi_p^2 = 20,84\%$ B×C×D – $\Pi_p^2 = 29,24\%$										
Średnia z lat	Optymalna	9,48 ^d	6,91 ^{ab}	8,01 ^c	5,87 ^a	7,57 ^B	7,55 ^{bc}	6,11 ^a	7,31 ^{bc}	7,34 ^{bc}	7,08 ^A	7,52 ^{bc}
	Obniżona o 25%	7,31 ^{bc}	7,31 ^{bc}	9,94 ^d	7,35 ^{bc}	7,98 ^B	9,75 ^d	7,41 ^{bc}	7,37 ^{bc}	6,03 ^a	7,64 ^B	6,47 ^{bc}
	Średnie	7,75 ^B		7,79 ^B				7,70 ^B		7,01 ^A		7,00 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 5,57\%$ C – $\Pi_p^2 = 58,07\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 15,79\%$ C×D – $\Pi_p^2 = 14,47\%$ B×C×D – $\Pi_p^2 = 14,14\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 85. Zawartość miedzi w glebie [mg Cu · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	11,00 ^{b-d}	12,43 ^d	9,06 ^{a-c}	11,43 ^{cd}	8,66 ^{ab}	10,70 ^{b-d}	7,46 ^a	11,13 ^{b-d}	11,73 ^d
	Średnie	11,71 ^B		10,25 ^{AB}		9,68 ^A		9,30 ^A		11,73 ^B
		10,98 ^B				9,49 ^A				11,73 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 25,59\%$ C – $\Pi_p^2 = 70,22\%$								
2022	Optymalna	11,40 ^{cd}	12,80 ^d	9,20 ^{a-c}	11,66 ^d	9,06 ^{ab}	11,06 ^{b-d}	7,70 ^a	11,36 ^{b-d}	12,06 ^d
	Średnie	12,10 ^C		10,43 ^{AB}		10,06 ^A		9,53 ^A		12,06 ^A
		11,26 ^B				9,80 ^A				12,06 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 37,90\%$ C – $\Pi_p^2 = 74,79\%$								
2023	Optymalna	11,43 ^{bc}	13,03 ^c	9,86 ^{ab}	11,83 ^{bc}	9,10 ^a	11,60 ^{bc}	8,36 ^a	11,53 ^{bc}	12,30 ^c
	Średnie	12,23 ^C		10,83 ^{AB}		10,35 ^A		9,95 ^A		12,30 ^{BC}
		11,54 ^B				10,15 ^A				12,30 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 31,86\%$ C – $\Pi_p^2 = 76,72\%$								
Średnia z lat	Optymalna	11,27 ^c	12,75 ^d	9,37 ^b	11,64 ^{cd}	8,94 ^{ab}	11,1 ^c	7,84 ^a	11,34 ^c	12,03 ^{cd}
	Średnie	12,01 ^C		10,51 ^B		10,03 ^{AB}		9,59 ^A		12,03 ^C
		11,28 ^B				9,91 ^A				12,03 ^C
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 28,40\%$ C – $\Pi_p^2 = 70,82\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 11,08\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 86. Zawartość żelaza w glebie [mg Fe · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola			
		30% popiołu					40% popiołu								
		Źródło wapnia w nawozie (B)													
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄						
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)													
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia						
2021	Optymalna	1564,9 ^c	1460,9 ^b	1542,9 ^c	1198,4 ^a	1441,8 ^B	1558,7 ^c	1178,7 ^a	1548,2 ^c	1461,0 ^b	1436,6 ^{AB}	1551,8 ^c			
	Obniżona o 25%	1650,7 ^d	1438,3 ^b	1528,2 ^c	1190,5 ^a	1451,9 ^B	1524,2 ^c	1154,9 ^a	1533,6 ^c	1448,1 ^b	1415,2 ^A	1554,5 ^c			
	Średnie	1528,7 ^C		1365,0 ^A			1354,1 ^A		1497,7 ^B			1553,1 ^C			
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$D - \eta^2_p = 98,03\%$					$B \times C - \eta^2_p = 92,64\%$			$C \times D - \eta^2_p = 22,03\%$		$B \times C \times D - \eta^2_p = 26,50\%$			
2022	Optymalna	1571,3 ^c	1467,3 ^b	1548,8 ^c	1204,4 ^a	1447,9 ^B	1559,2 ^c	1169,3 ^a	1554,6 ^c	1469,7 ^b	1438,1 ^{AB}	1560,5 ^c			
	Obniżona o 25%	1659,4 ^d	1443,4 ^b	1534,7 ^c	1193,4 ^a	1457,7 ^B	1530,5 ^c	1159,9 ^a	1534,1 ^c	1454,2 ^b	1419,7 ^A	1560,5 ^c			
	Średnie	1535,3 ^C		1370,3 ^A			1354,7 ^A		1503,1 ^B			1560,5 ^D			
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$C - \eta^2_p = 98,53\%$					$B \times C - \eta^2_p = 94,63\%$			$B \times D - \eta^2_p = 12,09\%$		$C \times D - \eta^2_p = 31,02\%$		$B \times C \times D - \eta^2_p = 32,72\%$	
2023	Optymalna	1577,6 ^c	1473,7 ^d	1554,7 ^c	1206,5 ^a	1453,3 ^A	1565,1 ^c	1175,3 ^a	1561,0 ^c	1478,4 ^d	1444,9 ^{AB}	1566,6 ^c			
	Obniżona o 25%	1668,1 ^d	1449,3 ^d	1541,0 ^c	1194,8 ^a	1463,3 ^A	1536,8 ^c	1166,3 ^a	1540,0 ^c	1460,2 ^d	1425,3 ^A	1569,2 ^c			
	Średnie	1542,2 ^C		1374,3 ^A			1360,9 ^A		1509,9 ^B			1567,9 ^C			
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta^2_p = 10,54\%$		$C - \eta^2_p = 98,73\%$			$B \times C - \eta^2_p = 95,33\%$			$B \times D - \eta^2_p = 15,23\%$		$C \times D - \eta^2_p = 35,33\%$		$B \times C \times D - \eta^2_p = 36,50\%$	
Średnia z lat	Optymalna	1571,3 ^g	1467,3 ^d	1548,8 ^{e-g}	1203,1 ^c	1447,6 ^{BC}	1560,5 ^{fg}	1174,5 ^{ab}	1554,6 ^{e-g}	1469,7 ^d	1439,9 ^B	1561,0 ^{fg}			
	Obniżona o 25%	1659,4 ^h	1443,7 ^d	1535,9 ^{ef}	1192,9 ^{bc}	1457,7 ^C	1530,5 ^e	1160,4 ^a	1534,7 ^{ef}	1454,2 ^d	1420,2 ^A	1560,5 ^{fg}			
	Średnie	1535,4 ^D		1369,9 ^B			1356,6 ^A		1503,6 ^C			1560,5 ^E			
Udział obserwowanej zmienności [%] *		$B - \eta^2_p = 7,63\%$		$C - \eta^2_p = 89,25\%$			$B \times C - \eta^2_p = 93,56\%$			$B \times D - \eta^2_p = 8,48\%$		$C \times D - \eta^2_p = 26,54\%$		$B \times C \times D - \eta^2_p = 29,00\%$	

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 87. Zawartość żelaza w glebie [mg Fe · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	1635,1 ^{cd}	1653,9 ^d	1532,7 ^b	1663,5 ^d	1527,5 ^b	1625,2 ^{cd}	1410,5 ^a	1661,4 ^d	1599,7 ^C
	Średnie	1644,5 ^C		1598,1 ^B		1576,4 ^B		1535,9 ^A		1599,7 ^B
		1621,3 ^B				1556,1 ^A				1599,7 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 65,48\%$ C – $\Pi_p^2 = 49,75\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 81,90\%$								
2022	Optymalna	1641,2 ^{cd}	1660,3 ^d	1541,4 ^b	1669,3 ^d	1531,7 ^b	1629,7 ^{cd}	1416,9 ^a	1667,8 ^d	1601,1 ^C
	Średnie	1650,7 ^C		1605,3 ^B		1580,7 ^B		1542,3 ^A		1601,1 ^B
		1628,0 ^C				1561,5 ^A				1601,1 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 68,97\%$ C – $\Pi_p^2 = 59,78\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 48,81\%$								
2023	Optymalna	1647,2 ^{cd}	1666,7 ^d	1550,1 ^b	1674,4 ^d	1535,8 ^b	1635,5 ^{cd}	1423,2 ^a	1672,8 ^d	1604,0 ^C
	Średnie	1656,9 ^C		1612,2 ^C		1585,7 ^B		1548,0 ^A		1604,0 ^B
		1634,6 ^C				1566,8 ^A				1604,0 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 68,30\%$ C – $\Pi_p^2 = 95,77\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 84,14\%$								
Średnia z lat	Optymalna	1641,2 ^{de}	1660,3 ^{ef}	1541,4 ^b	1669,1 ^f	1630,1 ^d	1531,7 ^b	1667,3 ^f	1416,9 ^a	1601,6 ^C
	Średnie	1650,7 ^D		1605,2 ^C		1580,9 ^B		1542,1 ^A		1601,6 ^B
		1627,9 ^C				1561,4 ^A				1601,6 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 64,97\%$ C – $\Pi_p^2 = 94,92\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 81,98\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 88. Zawartość chromu w glebie [mg Cr · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	35,03 ^g	25,03 ^{cd}	25,23 ^{cd}	23,07 ^b	27,09 ^B	25,43 ^d	20,60 ^a	24,27 ^{b-d}	27,23 ^e	24,38 ^A	31,37 ^f
	Obniżona o 25%	34,97 ^g	24,60 ^{b-d}	24,37 ^{b-d}	23,03 ^b	26,74 ^B	24,90 ^{cd}	20,83 ^a	23,77 ^{bc}	27,30 ^e	24,20 ^A	31,30 ^f
	Średnie	29,91 ^D		23,92 ^B			22,94 ^A		25,64 ^C			31,33 ^E
		26,92 ^B						24,29 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 75,76\%$ C – $\eta^2_p = 95,42\%$ B×C – $\eta^2_p = 94,97\%$										
2022	Optymalna	35,77 ^g	25,53 ^{cd}	25,70 ^d	23,73 ^b	27,68 ^B	25,93 ^d	21,10 ^a	24,73 ^{b-d}	27,90 ^e	24,92 ^A	31,90 ^f
	Obniżona o 25%	35,43 ^g	25,27 ^{cd}	24,87 ^{b-d}	23,53 ^b	27,27 ^B	25,37 ^{cd}	21,50 ^a	24,33 ^{bc}	27,93 ^e	24,78 ^A	31,77 ^f
	Średnie	30,50 ^D		24,45 ^B			23,47 ^A		26,22 ^C			31,83 ^E
		27,48 ^B						24,85 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 82,02\%$ C – $\eta^2_p = 96,74\%$ D – $\eta^2_p = 11,01\%$ B×C – $\eta^2_p = 96,54\%$										
2023	Optymalna	35,90 ^g	26,00 ^d	26,03 ^d	23,93 ^{bc}	27,97 ^B	26,07 ^d	21,77 ^a	25,13 ^{cd}	28,10 ^e	25,27 ^A	32,03 ^f
	Obniżona o 25%	35,83 ^g	25,47 ^d	25,53 ^d	23,77 ^b	27,65 ^B	25,77 ^d	21,70 ^a	25,00 ^{b-d}	28,07 ^e	25,13 ^A	32,27 ^f
	Średnie	30,80 ^D		24,82 ^B			23,82 ^A		26,57 ^C			32,15 ^E
		27,80 ^B						25,20 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 81,53\%$ C – $\eta^2_p = 96,88\%$ B×C – $\eta^2_p = 96,17\%$										
Średnia z lat	Optymalna	35,57 ^h	25,52 ^{de}	25,65 ^{de}	23,58 ^b	27,58 ^B	25,81 ^e	21,15 ^a	24,71 ^{cd}	27,74 ^f	24,85 ^A	31,77 ^g
	Obniżona o 25%	35,41 ^h	25,11 ^{c-e}	24,92 ^{c-e}	23,44 ^b	27,22 ^B	25,34 ^{de}	21,34 ^a	24,37 ^{bc}	27,77 ^f	24,70 ^A	31,78 ^f
	Średnie	30,40 ^D		24,40 ^B			23,41 ^A		26,15 ^C			31,77 ^E
		27,40 ^B						24,78 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 66,87\%$ C – $\eta^2_p = 93,15\%$ D – $\eta^2_p = 4,11\%$ B×C – $\eta^2_p = 92,32\%$										

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 89. Zawartość chromu w glebie [mg Cr · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	32,33 ^d	35,10 ^e	31,60 ^{cd}	32,30 ^d	24,20 ^b	31,47 ^{cd}	21,50 ^a	30,47 ^c	30,80 ^{cd}
	Średnie	33,72 ^D		31,95 ^C		27,83 ^B		25,98 ^A		30,80 ^C
		32,83 ^C				26,91 ^A				30,80 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 74,37\%$ C – $\Pi_p^2 = 96,83\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 44,27\%$								
2022	Optymalna	32,83 ^d	35,57 ^e	32,27 ^d	32,77 ^d	24,70 ^b	31,97 ^{cd}	22,17 ^a	30,93 ^c	30,90 ^c
	Średnie	34,20 ^E		32,52 ^D		28,33 ^B		26,55 ^A		30,90 ^C
		33,36 ^C				27,44 ^A				30,90 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 82,94\%$ C – $\Pi_p^2 = 98,18\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 59,42\%$								
2023	Optymalna	33,50 ^e	35,70 ^f	32,47 ^{c-e}	33,17 ^{de}	24,90 ^b	32,10 ^{cd}	22,37 ^a	31,33 ^c	31,47 ^c
	Średnie	34,60 ^E		32,82 ^D		28,50 ^B		26,85 ^A		31,47 ^C
		33,71 ^C				27,67 ^A				31,47 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 82,18\%$ C – $\Pi_p^2 = 98,14\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 51,24\%$								
Średnia z lat	Optymalna	32,89 ^f	35,45 ^g	32,11 ^{ef}	32,74 ^f	24,60 ^b	31,84 ^{de}	22,01 ^a	30,91 ^c	31,05 ^{cd}
	Średnie	34,17 ^E		32,43 ^D		28,22 ^B		26,46 ^A		31,05 ^C
		33,30 ^C				27,34 ^A				31,05 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 69,82\%$ C – $\Pi_p^2 = 96,22\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 37,88\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 90. Zawartość ołowiu w glebie [mg Pb · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola						
		30% popiołu					40% popiołu											
		Źródło wapnia w nawozie (B)																
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄									
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)																
40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia									
2021	Optymalna	13,96 ^g	11,53 ^{ef}	11,46 ^{ef}	10,00 ^{de}	11,74 ^C	11,23 ^{d-f}	11,86 ^f	12,26 ^f	11,66 ^f	11,75 ^C	10,96 ^{d-f}						
	Obniżona o 25%	9,73 ^d	7,06 ^{bc}	7,63 ^c	6,00 ^{ab}	7,60 ^B	6,90 ^{a-c}	5,33 ^a	7,50 ^{bc}	7,36 ^{bc}	6,77 ^A	7,13 ^{bc}						
	Średnie	10,57 ^C		8,77 ^A				8,83 ^A		9,70 ^B		9,05 ^{AB}						
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi^2 = 21,69\%$					C – $\Pi^2 = 73,56\%$		D – $\Pi^2 = 97,11\%$		C×D – $\Pi^2 = 12,38\%$		B×C×D – $\Pi^2 = 22,04\%$					
2022	Optymalna	14,13 ^g	12,13 ^{ef}	11,80 ^{ef}	10,33 ^d	12,10 ^D	11,40 ^{df}	12,46 ^{ef}	12,63 ^f	12,03 ^{ef}	12,13 ^D	11,10 ^{de}						
	Obniżona o 25%	10,10 ^d	7,43 ^{bc}	8,23 ^c	6,16 ^{ab}	7,98 ^B	7,26 ^{bc}	5,70 ^a	8,10 ^c	7,53 ^{bc}	7,15 ^A	7,50 ^{bc}						
	Średnie	10,95 ^C		9,13 ^A				9,13 ^A		10,07 ^B		9,30 ^A						
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi^2 = 25,49\%$					C – $\Pi^2 = 76,84\%$		B×D – $\Pi^2 = 16,29\%$		C×D – $\Pi^2 = 28,38\%$		B×C×D – $\Pi^2 = 25,21\%$					
2023	Optymalna	14,30 ^g	12,03 ^{de}	12,30 ^{ef}	10,60 ^c	12,30 ^D	11,56 ^{e-e}	12,30 ^{ef}	13,13 ^f	12,30 ^{ef}	12,3 ^D	11,16 ^{cd}						
	Obniżona o 25%	10,60 ^c	7,70 ^b	8,06 ^b	6,33 ^a	8,17 ^B	7,76 ^b	5,96 ^a	8,00 ^b	7,53 ^b	7,31 ^A	8,00 ^b						
	Średnie	11,15 ^C		9,32 ^A				9,40 ^A		10,24 ^B		9,58 ^A						
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi^2 = 40,69\%$					C – $\Pi^2 = 87,40\%$		D – $\Pi^2 = 89,39\%$		B×C – $\Pi^2 = 21,05\%$		C×D – $\Pi^2 = 30,94\%$		B×C×D – $\Pi^2 = 43,33\%$			
Średnia z lat	Optymalna	14,13 ^h	11,90 ^{f-h}	11,85 ^{e-g}	10,31 ^{cd}	12,05 ^D	11,40 ^{ef}	12,21 ^{gh}	12,67 ^h	12,00 ^{f-h}	7,08 ^A	11,07 ^{de}						
	Obniżona o 25%	10,14 ^c	7,40 ^b	7,97 ^b	6,16 ^b	7,39 ^B	7,31 ^b	5,66 ^a	7,86 ^b	7,47 ^b	12,07 ^D	7,54 ^b						
	Średnie	10,894 ^C		9,0777 ^A				10,005 ^B		9,147 ^A		9,31 ^A						
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi^2 = 20,21\%$					C – $\Pi^2 = 71,58\%$		D – $\Pi^2 = 69,08\%$		B×C – $\Pi^2 = 8,47\%$		B×D – $\Pi^2 = 5,10\%$		C×D – $\Pi^2 = 15,45\%$		B×C×D – $\Pi^2 = 20,75\%$	

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 91. Zawartość ołowiu w glebie [$\text{mg Pb} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	10,96 ^a	12,93 ^{cd}	11,23 ^a	10,90 ^a	13,60 ^d	11,86 ^{bc}	9,53 ^a	11,20 ^a	11,56 ^a
	Średnie	11,95 ^{CD}		11,06 ^{AB}		12,73 ^D		10,36 ^A		11,56 ^{BC}
		11,50 ^A				11,55 ^A				11,56 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B - $\eta_p^2 = 91,35\%$		C - $\eta_p^2 = 50,32\%$		B×C - $\eta_p^2 = 89,21\%$				
2022	Optymalna	11,56 ^{bc}	13,26 ^d	11,60 ^{bc}	11,26 ^b	14,20 ^e	12,10 ^{bc}	10,00 ^a	11,56 ^{bc}	12,16 ^c
	Średnie	12,41 ^C		11,43 ^C		13,15 ^D		10,78 ^A		12,16 ^C
		11,92 ^A				11,96 ^A				12,16 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B - $\eta_p^2 = 79,44\%$		C - $\eta_p^2 = 32,83\%$		B×C - $\eta_p^2 = 75,50\%$				
2023	Optymalna	11,40 ^b	13,43 ^d	11,86 ^{bc}	11,86 ^{bc}	14,03 ^d	12,26 ^c	10,26 ^a	12,06 ^{bc}	12,43 ^c
	Średnie	12,41 ^C		11,86 ^B		13,15 ^D		11,16 ^A		12,43 ^C
		12,14 ^A				12,15 ^A				12,43 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B - $\eta_p^2 = 89,46\%$		C - $\eta_p^2 = 73,23\%$		B×C - $\eta_p^2 = 91,77\%$				
Średnia z lat	Optymalna	11,31 ^b	13,21 ^d	11,56 ^{bc}	11,34 ^b	13,94 ^e	12,07 ^c	9,93 ^a	11,61 ^{bc}	12,05 ^c
	Średnie	12,26 ^C		11,45 ^B		13,01 ^D		10,77 ^A		12,05 ^C
		11,85 ^A				11,89 ^A				12,05 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B - $\eta_p^2 = 75,15\%$		C - $\eta_p^2 = 31,74\%$		B×C - $\eta_p^2 = 73,57\%$				

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 92. Zawartość arsenu w glebie [mg Ar · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	5,44 ^h	3,66 ^{c-f}	4,92 ^g	4,00 ^{e-g}	4,50 ^C	3,78 ^{d-g}	3,99 ^{e-g}	4,02 ^{fg}	4,84 ^{gh}	4,16 ^B	3,36 ^{b-d}
	Obniżona o 25%	3,40 ^{b-e}	2,85 ^{ab}	2,96 ^{ab}	3,13 ^{a-c}	3,09 ^A	3,78 ^{d-g}	3,83 ^{d-g}	3,87 ^{d-g}	4,29 ^g	3,94 ^B	2,53 ^a
	Średnie	3,84 ^B		3,75 ^B			3,84 ^B		4,25 ^C			2,94 ^A
		3,79 ^B						4,05 ^C				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2 = 17,64\%$		C – $\eta^2_p = 74,86\%$		D – $\eta^2 = 86,00\%$		B×C – $\eta^2_p = 46,58\%$		C×D – $\eta^2_p = 59,13\%$		
2022	Optymalna	5,56 ⁱ	3,79 ^{c-f}	5,03 ⁱ	4,11 ^{e-g}	4,62 ^C	3,90 ^{d-g}	4,11 ^{e-g}	4,13 ^{fg}	4,96 ^{hi}	4,28 ^B	3,48 ^{b-d}
	Obniżona o 25%	3,51 ^{b-e}	2,97 ^{ab}	3,09 ^{ab}	3,25 ^{a-c}	3,20 ^A	3,89 ^{d-g}	3,94 ^{d-g}	3,99 ^{d-g}	4,41 ^{gh}	4,06 ^B	2,64 ^a
	Średnie	3,96 ^B		3,87 ^B			3,96 ^B		4,37 ^C			3,06 ^A
		3,91 ^B						4,16 ^C				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2 = 17,76\%$		C – $\eta^2_p = 75,02\%$		D – $\eta^2 = 86,13\%$		B×C – $\eta^2_p = 46,79\%$		C×D – $\eta^2_p = 59,33\%$		
2023	Optymalna	5,78 ⁱ	4,01 ^{c-f}	5,24 ⁱ	4,33 ^{e-g}	4,84 ^C	4,26 ^{d-g}	4,34 ^{e-g}	4,36 ^{fg}	5,18 ^{hi}	4,53 ^C	3,70 ^{b-d}
	Obniżona o 25%	3,74 ^{b-e}	3,19 ^{ab}	3,31 ^{ab}	3,48 ^{a-c}	3,43 ^A	4,12 ^{d-g}	4,16 ^{d-g}	4,22 ^{d-g}	4,63 ^{gh}	4,28 ^B	2,87 ^a
	Średnie	4,18 ^B		4,09 ^B			4,22 ^B		4,60 ^C			3,28 ^A
		4,13 ^B						4,41 ^C				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2 = 15,05\%$		C – $\eta^2_p = 74,64\%$		D – $\eta^2 = 86,68\%$		B×C – $\eta^2_p = 48,98\%$		C×D – $\eta^2_p = 59,06\%$		
Średnia z lat	Optymalna	5,59 ⁱ	3,82 ^{d-f}	5,07 ^h	4,15 ^{fg}	4,66 ^D	3,98 ^f	4,15 ^{fg}	4,17 ^{fg}	4,99 ^h	4,32 ^C	3,51 ^{cd}
	Obniżona o 25%	3,55 ^{c-e}	3,00 ^{ab}	3,12 ^b	3,29 ^{bc}	3,24 ^A	3,93 ^{ef}	3,98 ^f	4,03 ^f	4,44 ^g	4,09 ^B	2,68 ^a
	Średnie	3,99 ^B		3,90 ^B			4,00 ^B		4,41 ^C			3,09 ^A
		3,94 ^B						4,21 ^C				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2 = 10,17\%$		C – $\eta^2_p = 62,48\%$		D – $\eta^2 = 78,87\%$		B×C – $\eta^2_p = 33,57\%$		C×D – $\eta^2_p = 44,79\%$		

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 93. Zawartość arsenu w glebie [mg Ar · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	2,17 ^{cd}	2,16 ^{b-d}	1,83 ^{ab}	1,93 ^{a-c}	2,52 ^e	2,35 ^{de}	2,63 ^e	2,38 ^{de}	1,80 ^a
	Średnie	2,17 ^B		1,88 ^A		2,44 ^C		2,50 ^C		1,80 ^A
		2,02 ^B				2,47 ^C				1,80 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 22,54\%$ C – $\eta^2_p = 33,96\%$								
2022	Optymalna	2,30 ^{c-e}	2,29 ^{c-d}	1,94 ^{ab}	2,04 ^{a-c}	2,65 ^{ef}	2,48 ^{d-f}	2,74 ^f	2,50 ^{d-f}	1,93 ^a
	Średnie	2,29 ^B		1,99 ^A		2,56 ^C		2,62 ^C		1,93 ^A
		2,14 ^B				2,59 ^C				1,93 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 24,84\%$ C – $\eta^2_p = 33,01\%$								
2023	Optymalna	2,52 ^{c-e}	2,51 ^{b-d}	2,16 ^{ab}	2,26 ^{a-c}	2,87 ^{ef}	2,70 ^{d-f}	2,96 ^f	2,72 ^{d-f}	2,15 ^a
	Średnie	2,51 ^B		2,21 ^A		2,78 ^C		2,84 ^C		2,15 ^A
		2,36 ^B				2,81 ^C				2,15 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 24,61\%$ C – $\eta^2_p = 32,73\%$								
Średnia z lat	Optymalna	2,33 ^{bc}	2,32 ^{bc}	1,98 ^a	2,08 ^{ab}	2,68 ^d	2,51 ^{cd}	2,78 ^d	2,53 ^{cd}	1,96 ^a
	Średnie	2,32 ^B		2,03 ^A		2,59 ^C		2,65 ^C		1,96 ^A
		2,17 ^B				2,62 ^C				1,96 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 9,48\%$ C – $\eta^2_p = 14,16\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 94. Zawartość rtęci w glebie [mg Hg · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	0,011 ^{ab}	0,018 ^{a-e}	0,022 ^{c-f}	0,016 ^{a-d}	0,017 ^A	0,028 ^{ef}	0,009 ^a	0,022 ^{c-f}	0,014 ^{a-d}	0,018 ^A	0,019 ^{a-e}
	Obniżona o 25%	0,014 ^{a-d}	0,021 ^{b-f}	0,018 ^{a-d}	0,013 ^{a-d}	0,016 ^A	0,030 ^f	0,012 ^{a-c}	0,019 ^{a-e}	0,011 ^a	0,018 ^A	0,022 ^{d-f}
	Średnie	0,016 ^A		0,017 ^{AB}			0,020 ^B		0,016 ^{AB}			0,020 ^{AB}
		0,018 ^{AB}						0,016 ^A				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		C – $\eta^2_p = 73,66\%$			B×C – $\eta^2_p = 49,90\%$			B×D – $\eta^2_p = 21,83\%$				
2022	Optymalna	0,015 ^{a-c}	0,022 ^d	0,022 ^d	0,017 ^c	0,019 ^A	0,031 ^e	0,013 ^a	0,023 ^d	0,015 ^{ab}	0,020 ^B	0,022 ^d
	Obniżona o 25%	0,014 ^{ab}	0,021 ^d	0,021 ^d	0,016 ^{bc}	0,018 ^A	0,031 ^e	0,013 ^a	0,023 ^d	0,014 ^{ab}	0,020 ^B	0,023 ^d
	Średnie	0,018 ^A		0,019 ^B			0,022 ^C		0,019 ^{AB}			0,0232 ^C
		0,019 ^A						0,020 ^B				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 49,92\%$			C – $\eta^2_p = 98,39\%$			B×C – $\eta^2_p = 95,60\%$				
2023	Optymalna	0,016 ^{a-c}	0,023 ^d	0,023 ^d	0,018 ^c	0,020 ^A	0,033 ^e	0,014 ^a	0,024 ^d	0,016 ^{ab}	0,022 ^B	0,0242 ^d
	Obniżona o 25%	0,016 ^{ab}	0,022 ^d	0,023 ^d	0,018 ^{bc}	0,020 ^A	0,032 ^e	0,017 ^{bc}	0,024 ^d	0,016 ^{a-c}	0,022 ^B	0,0245 ^d
	Średnie	0,019 ^A		0,020 ^B			0,024 ^C		0,020 ^{AB}			0,024 ^C
		0,020 ^A						0,022 ^B				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 61,21\%$			C – $\eta^2_p = 98,08\%$			B×C – $\eta^2_p = 94,78\%$		C×D – $\eta^2_p = 22,47\%$		
Średnia z lat	Optymalna	0,014 ^{ab}	0,021 ^d	0,022 ^d	0,017 ^{bc}	0,019 ^{AB}	0,031 ^e	0,012 ^a	0,023 ^d	0,015 ^{ab}	0,02 ^{BC}	0,022 ^d
	Obniżona o 25%	0,015 ^{ab}	0,021 ^d	0,021 ^{cd}	0,015 ^{ab}	0,018 ^A	0,031 ^e	0,014 ^{ab}	0,022 ^d	0,014 ^{ab}	0,02 ^{BC}	0,023 ^d
	Średnie	0,018 ^A		0,019 ^A			0,022 ^B		0,018 ^A			0,022 ^B
		0,018 ^A						0,020 ^B				
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 66,31\%$			C – $\eta^2_p = 77,59\%$			B×C – $\eta^2_p = 55,20\%$		C×D – $\eta^2_p = 4,17\%$		

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 95. Zawartość rtęci w glebie [mg Hg · kg⁻¹ s.m.] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	0,010 ^a	0,015 ^a	0,011 ^a	0,012 ^a	0,029 ^a	0,013 ^a	0,015 ^a	0,014 ^a	0,012 ^a
	Średnie	0,012 ^A		0,012 ^A		0,021 ^B		0,014 ^A		0,012 ^A
		0,012 ^A				0,016 ^B				0,012 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 34,09\%$ C – $\Pi_p^2 = 59,13\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 49,49\%$								
2022	Optymalna	0,013 ^{ab}	0,019 ^e	0,012 ^a	0,013 ^{ab}	0,033 ^f	0,017 ^d	0,016 ^{cd}	0,014 ^{bc}	0,016 ^{cd}
	Średnie	0,016 ^C		0,013 ^A		0,025 ^D		0,015 ^B		0,016 ^{AB}
		0,014 ^A				0,020 ^C				0,016 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 79,47\%$ C – $\Pi_p^2 = 87,29\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 69,06\%$								
2023	Optymalna	0,015 ^b	0,020 ^f	0,013 ^a	0,014 ^{ab}	0,035 ^g	0,018 ^e	0,017 ^{cd}	0,015 ^{bc}	0,017 ^{de}
	Średnie	0,018 ^C		0,014 ^A		0,027 ^D		0,016 ^B		0,017 ^C
		0,016 ^A				0,021 ^C				0,017 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 83,36\%$ C – $\Pi_p^2 = 89,09\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 79,21\%$								
Średnia z lat	Optymalna	0,013 ^{ab}	0,018 ^d	0,012 ^a	0,013 ^{a-c}	0,032 ^e	0,016 ^{cd}	0,016 ^{bc}	0,014 ^{a-c}	0,015 ^{a-d}
	Średnie	0,015 ^B		0,013 ^A		0,024 ^C		0,015 ^B		0,015 ^{AB}
		0,014 ^A				0,020 ^B				0,015 ^A
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 60,28\%$ C – $\Pi_p^2 = 64,95\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 55,65\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

Tabela 96. Zawartość niklu w glebie [mg Ni · kg⁻¹ s.m.] – Czesławice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)										Kontrola
		30% popiołu					40% popiołu					
		Źródło wapnia w nawozie (B)										
		CaCO ₃		CaSO ₄			CaCO ₃		CaSO ₄			
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)										
		40/30	50/20	40/30	50/20	średnia	40/20	50/10	40/20	50/10	średnia	
2021	Optymalna	17,29 ^d	10,89 ^b	11,94 ^c	8,88 ^a	12,25 ^D	11,56 ^{bc}	9,03 ^a	11,71 ^{bc}	11,28 ^{bc}	10,90 ^{AB}	11,43 ^{bc}
	Obniżona o 25%	17,14 ^d	10,85 ^b	11,53 ^{bc}	8,50 ^a	12,01 ^{CD}	11,24 ^{bc}	8,32 ^a	11,73 ^{bc}	11,36 ^{bc}	10,66 ^A	11,78 ^{bc}
	Średnie	14,04 ^C		10,21 ^A			10,04 ^A		11,52 ^B			11,60 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 83,33\%$					C – $\eta^2_p = 97,79\%$		C – $\eta^2_p = 11,16\%$		B×C – $\eta^2_p = 88,14\%$	
2022	Optymalna	18,06 ^e	11,46 ^{bc}	12,48 ^d	9,05 ^a	12,76 ^B	12,10 ^{cd}	9,19 ^a	12,28 ^d	11,88 ^{b-d}	11,36 ^A	12,03 ^{b-d}
	Obniżona o 25%	17,74 ^e	11,38 ^b	12,29 ^d	9,07 ^a	12,62 ^B	12,01 ^{b-d}	8,88 ^a	12,26 ^d	11,53 ^{bc}	11,17 ^A	11,94 ^{b-d}
	Średnie	14,66 ^C		10,72 ^A			10,55 ^A		11,99 ^B			11,99 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 91,06\%$					C – $\eta^2_p = 98,89\%$		C – $\eta^2_p = 15,33\%$		B×C – $\eta^2_p = 92,88\%$	
2023	Optymalna	18,10 ^d	11,50 ^b	12,57 ^c	9,17 ^a	12,83 ^B	12,13 ^{bc}	9,23 ^a	12,37 ^c	12,00 ^{bc}	11,43 ^A	12,07 ^{bc}
	Obniżona o 25%	17,83 ^d	11,50 ^b	12,33 ^c	9,10 ^a	12,69 ^B	12,10 ^{bc}	9,00 ^a	12,30 ^c	11,57 ^b	11,24 ^A	12,03 ^{bc}
	Średnie	14,73 ^C		10,79 ^A			10,62 ^A		12,06 ^B			12,05 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 90,94\%$					C – $\eta^2_p = 98,86\%$		C – $\eta^2_p = 14,29\%$		B×C – $\eta^2_p = 92,75\%$	
Średnia z lat	Optymalna	17,82 ^f	11,28 ^b	12,33 ^e	9,03 ^a	12,62 ^B	11,93 ^{c-e}	9,15 ^a	12,12 ^{de}	11,72 ^{b-d}	11,23 ^A	11,84 ^{b-e}
	Obniżona o 25%	17,57 ^f	11,24 ^b	12,05 ^{c-e}	8,89 ^a	12,44 ^B	11,78 ^{b-e}	8,73 ^a	12,09 ^{de}	11,49 ^{bc}	11,02 ^A	11,92 ^{c-e}
	Średnie	14,48 ^C		10,58 ^A			10,40 ^A		11,85 ^B			11,88 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\eta^2_p = 73,72\%$					C – $\eta^2_p = 96,09\%$		C – $\eta^2_p = 5,20\%$		B×C – $\eta^2_p = 79,01\%$	
		12,13 ^C					10,78 ^A				11,60 ^B	
		12,69 ^C					11,27 ^A				11,99 ^B	
		12,76 ^C					11,34 ^A				12,05 ^B	
		12,53 ^C					11,13 ^A				11,88 ^B	

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i, D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i)

Tabela 97. Zawartość niklu w glebie [$\text{mg Ni} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$] – Krynice

Rok badań	Dawka nawozu (D)	Zawartość popiołu w nawozie (A)								Kontrola
		30% popiołu				40% popiołu				
		Źródło wapnia w nawozie (B)								
		CaCO ₃		CaSO ₄		CaCO ₃		CaSO ₄		
		Zawartość wapnia i potasu w nawozie (%) (C)								
		40/30	50/20	40/30	50/20	40/20	50/10	40/20	50/10	
2021	Optymalna	17,13 ^{de}	17,53 ^{de}	14,75 ^c	18,01 ^e	12,14 ^b	17,33 ^{de}	10,15 ^a	16,81 ^d	16,69 ^d
	Średnie	17,33 ^D		16,38 ^C		14,73 ^B		13,48 ^A		16,69 ^{CD}
		16,85 ^B				14,11 ^A				16,69 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 74,06\%$ C – $\Pi_p^2 = 97,91\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 75,84\%$								
2022	Optymalna	17,29 ^d	18,30 ^{de}	15,35 ^c	18,54 ^e	12,74 ^b	17,86 ^{de}	10,92 ^a	17,38 ^d	17,26 ^d
	Średnie	17,79 ^D		16,95 ^C		15,30 ^B		14,15 ^A		17,26 ^{CD}
		17,37 ^B				14,72 ^A				17,26 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 70,49\%$ C – $\Pi_p^2 = 97,83\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 66,20\%$								
2023	Optymalna	17,33 ^d	18,33 ^{de}	15,47 ^c	18,63 ^e	12,77 ^b	17,90 ^{de}	11,03 ^a	17,47 ^d	17,30 ^d
	Średnie	17,83 ^D		17,05 ^C		15,33 ^B		14,25 ^A		17,30 ^{CD}
		17,44 ^B				14,79 ^A				17,30 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 67,76\%$ C – $\Pi_p^2 = 97,85\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 65,82\%$								
Średnia z lat	Optymalna	17,25 ^d	18,05 ^{ef}	15,19 ^c	18,39 ^f	12,55 ^b	17,70 ^{de}	10,70 ^a	17,22 ^d	17,08 ^d
	Średnie	17,65 ^D		16,79 ^C		15,12 ^B		13,96 ^A		17,08 ^C
		17,22 ^B				14,54 ^A				17,08 ^B
Udział obserwowanej zmienności [%] *		B – $\Pi_p^2 = 55,90\%$ C – $\Pi_p^2 = 95,92\%$ B×C – $\Pi_p^2 = 54,22\%$								

* wpisano czynniki i interakcje istotne statystycznie (brak wpisu oznacza A-n.i., B-n.i., C-n.i., D-n.i., A×B-n.i., A×C-n.i., A×D-n.i., B×C-n.i., B×D-n.i., C×D-n.i., A×B×C-n.i., A×B×C×D-n.i., B×C×D-n.i.)

