



**POLITECHNIKA  
BYDGOSKA**  
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY ROLNICTWO  
I OGRODNICTWO**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**Mgr inż. Piotr Ignaszak**

**WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I CHEMICZNE GLEB  
W SADACH JABŁONIOWYCH W ZALEŻNOŚCI  
OD OKRESU UŻYTKOWANIA**

***PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS  
IN APPLE ORCHARDS IN RELATION TO THE  
PERIOD OF USE***

DZIEDZINA: NAUKI ROLNICZE  
DYSCYPLINA: ROLNICTWO I OGRODNICTWO

**PROMOTOR**

PROF. DR HAB. INŻ. MIROSŁAW KOBIERSKI  
PRACOWNIA GLEBOZNAWSTWA I BIOCHEMII  
POLITECHNIKA BYDGOSKA

**Bydgoszcz, 2024 rok**



Pragnę serdecznie podziękować wszystkim osobom,  
bez których niniejsza praca nie mogłaby powstać.

Przede wszystkim pragnę wyrazić swoją wdzięczność  
mojemu promotorowi i mentorowi,  
Panu Prof. dr. hab. inż. Mirosławowi Kobierskiemu,  
za nieocenioną pomoc podczas przygotowania pracy, cenne uwagi oraz  
sugestie, a w szczególności za poświęcony czas, wsparcie merytoryczne  
i nieograniczoną cierpliwość.



## SPIS TREŚCI

WYKAZ SKRÓTÓW I SYMBOLI .....	6
1. WSTĘP .....	7
2. PRZEGLĄD LITERATURY .....	9
2.1. Użytkowanie sadownicze gleb.....	9
2.2. Użytkowanie sadownicze a właściwości fizyczne, fizykochemiczne i chemiczne gleb .....	10
2.3. Uwarunkowania glebowe i sposób utrzymania gleb w sadach.....	13
3. OBIEKT I METODY BADAŃ .....	18
3.1. Obiekt badań .....	18
3.2. Metody badań .....	21
4. WYNIKI BADAŃ .....	24
4.1. Morfologia gleb .....	24
4.2. Właściwości fizyczne, fizykochemiczne i chemiczne gleb .....	27
5. DYSKUSJA WYNIKÓW .....	66
6. WNIOSKI .....	77
7. BIBLIOGRAFIA .....	79
SPIS RYSUNKÓW .....	94
SPIS TABEL .....	95
STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM .....	96
STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM .....	98

## ***WYKAZ SKRÓTÓW I SYMBOLI***

ASA – atomowa spektrometria absorpcyjna

CEC – kationowa pojemność wymienna

DI – wskaźnik rozmieszczenia metali

EF – współczynnik wzbogacenia metali

GUS – Główny Urząd Statystyczny

Hh – kwasowość hydrolityczna

IMGW-PIB – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

IUNG – Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa

MPa – megapascal

n.p.m. – nad poziom morza

OCD – zapas węgla organicznego

PD – gęstość upakowania

SOC – glebowy węgiel organiczny

SOM – glebowa materia organiczna

TEB – suma zasadowych kationów

V – stopień wysycenia zasadami

$\rho_o$  – gęstość objętościowa

$\rho_w$  – gęstość fazy stałej gleby

## **1. WSTĘP**

Polska jest jednym z największych producentów jabłek na świecie. Według badań przeprowadzonych przez Główny Urząd Statystyczny w 2020 roku sady zajmowały 355,71 tys. hektarów, wśród których dominowały sady o powierzchni od 5-10 hektarów (GUS 2023). Powierzchnia uprawy jabłoni stanowi prawie 3/4 powierzchni uprawy wszystkich gatunków drzew owocowych. W Polsce rolnicza przestrzeń produkcyjna jest zróżnicowana ze względu na rzeźbę terenu, właściwości pokrywy glebowej oraz uwarunkowania klimatyczne. Właściwości gleb i jej właściwości ma oprócz czynników klimatycznych wpływ na owocowanie drzew. Korzenie jabłoni sięgają do znacznych głębokości, ich główna masa znajduje się jednak na głębokości 30-60 cm (Pieniążek 1995). W związku z tym ważną staje się analiza chemiczna gleby w jej głębszych warstwach. Ma to szczególne znaczenie przy tworzeniu zaleceń nawozowych, a także prognoz przewidywanych zmian zasobności w składniki pokarmowe w profilu glebowym. Szczególnie ważne jest określenie zawartości wapnia i magnezu, które są pobierane przez korzenie z głębszych, bardziej zasobnych w ten składnik, warstw gleby (Jarociński 2005; Torres 2017).

Intensyfikacja sadownictwa spowodowała także występowanie wielu chorób fizjologicznych drzew owocowych. Poznanie przyczyn oraz warunków sprzyjających występowaniu tych chorób pozwoliło na opracowanie zaleceń metodycznych odnośnie do zabiegów agrotechnicznych. Dodatkowe zabiegi ochronne, generują jednak dodatkowe koszty. Obecnie znanych jest kilkanaście chorób fizjologicznych drzew owocowych, a jedną z nich jest gorzka plamistość podskórna owoców. Główną przyczyną tej choroby jest niedobór wapnia w owocach, a determinuje to zbyt wysoki stosunek potasu do wapnia w glebie. Wapń i potas są antagonistami, ponieważ w przypadku wzrostu zawartości wapnia w jabłkach obserwowano spadek zawartości potasu i zmniejszenie występowania chorób fizjologicznych. Wielu badaczy potwierdza dodatnią korelację pomiędzy zawartością potasu, a obecnością chorób fizjologicznych na owocach jabłoni (Andziak i in. 2004; Lotze i Theron 2007; Casero i in. 2010). Obecnie najpopularniejszą formą zapobiegania tej choroby jest nalistna aplikacja wapnia w okresie wegetacji drzew. Ponadto odpowiednie zaopatrzenie owoców w wapń ma zasadnicze znaczenie dla poprawy przechowywania jabłek (Danner i in. 2015).

Wieloletnie użytkowanie sadownicze powoduje wiele zmian właściwości chemicznych gleb, dotyczących zawartości makro- i mikropierwiastków, zarówno ich form całkowitych, jak i przyswajalnych dla roślin. Utrzymanie ugoru herbicydowego w rzędach drzew jabłoni, brak wapnowania, niezbilansowane nawożenie NPK oraz intensywne stosowanie środków ochrony roślin może utrzymywać niekorzystne zmiany we właściwościach gleb (Bielińska i in. 1998; Domżał i in. 1995). Skutkiem tego może być nagromadzenie metali ciężkich w warstwie powierzchniowej gleb (Kobierski 2004).

### **Hipoteza badawcza**

Hipoteza badawcza zakłada, że wieloletnie użytkowanie gleb w sadach jabłoniowych skutkuje pogorszeniem właściwości fizycznych oraz powoduje zmniejszenie lub nagromadzenie makroelementów. W wyniku wieloletniego użytkowania sadowniczego gleb dochodzić może do akumulacji pierwiastków śladowych w ich poziomach powierzchniowych.

### **Cel pracy**

Celem pracy była ocena wybranych właściwości fizycznych, fizykochemicznych i chemicznych gleb w sadach jabłoniowych o różnym okresie użytkowania. Ocena poszczególnych parametrów glebowych zestawionych z okresem użytkowania sadowniczego pozwoli określić w jakim stopniu dochodzi do zubożenia gleby lub nagromadzenia w składniki pokarmowe dla roślin oraz jakie pierwiastki są wyczerpywane najwcześniej. Uzyskane wyniki badań pozwolą na weryfikację zaleceń dotyczących nawożenia sadów jabłoniowych w zależności od okresu ich użytkowania. Zwłaszcza dotyczy to gruntów, na których będą wykonywane powtórne nasadzenia drzew. Wiedza na temat zasobności gleb w składniki pokarmowe po określonym okresie użytkowania sadowniczego pozwoli sadownikom przeciwdziałać niekorzystnym zmianom środowiska glebowego.

Cele szczegółowe:

- określenie wpływu okresu użytkowania sadu jabłoniowego na wybrane parametry glebowe (C, Ca, Mg, P, K, pH, Hh), wykorzystując wskaźniki jakości i żyzności gleb;
- ocena całkowitej zawartości metali ciężkich (Fe, Zn, Mn, Cu, Pb, Ni) oraz ich form przyswajalnych dla roślin w glebie.



## 2. PRZEGLĄD LITERATURY

### 2.1. Użytkowanie sadownicze gleb

Jabłoń (*Malus domestica*) jest rośliną, która jest uprawiana w większości krajów o klimacie umiarkowanym, w tym w Polsce. Jabłoń jest jednym z najstarszych uprawianych na świecie drzew owocowych z rodziny różowatych i znanych jest ponad 7500 odmian (Cornille i in. 2012). Dzikim przodkiem *Malus domestica* jest *Malus sieversii*, która nadal występuje dziko w górach Azji Środkowej (Dobrzański i in. 2006). Jabłoń jest niewielkim drzewem liściastym osiagającym 5-12 m wysokości o szerokiej i gęsto ulistnionej koronie. Liście są ułożone naprzemiennie, proste, owalne z ostrym końcem i ząbkowanym brzegiem o długości 5-12 cm i szerokości 3-6 cm na ogonku o długości 2-5 cm. Niska jakość gleb piaszczystych w Polsce jest jednym z głównych czynników obniżających produkcję jabłek.

Tematyka badań informujących o wzajemnych zależnościach pomiędzy właściwościami gleby a okresem sadowniczego użytkowania pozostaje wciąż aktualna. Ocena właściwości gleby może przyczynić się do poprawy zarządzania glebą oraz zwiększenia wydajności produkcji jabłek (Aggelopoulou i in. 2010). Jabłonie do prawidłowego wzrostu wymagają głębokiej i dobrze uprawianej gleby o pH od 5,5 do 6,5 zasobnej w materię organiczną i azot oraz dostępne dla roślin formy fosforu, potasu, magnezu i wapnia. Konwencjonalny system uprawy jabłoni opiera się na zastosowaniu nawozów stosowanych doglebowo i dolistnie. Stosowanie nawozu dolistnego pozwala uzyskać szybsze i skuteczne efekty związane z ich działaniem, jednakże są one krótkotrwałe. Nawozy dolistne umożliwiają bezpośrednie dostarczanie składników pokarmowych poprzez ich wchłanianie przez aparaty szparkowe, znajdujące się na powierzchni liści. Dzięki temu są one dostarczane bezpośrednio do tkanek roślinnych, pomijając proces pobierania składników z gleby przez system korzeniowy. Sposób dolistnej aplikacji może skutecznie uzupełnić nawożenie doglebowe. Zalecenia dotyczące zastosowania nawozów mineralnych są głównie oparte o dane dotyczące zasobności w składniki pokarmowe w glebie (Neilsen i Neilsen 2002). Drzewa jabłoniowe wykazują liczne przyrosty przy optymalnym zaopatrzeniu w azot i fosfor. Nadmierne dawki nawozów azotowych przyspieszają wzrost drzew oraz zwiększają zawartość azotu w liściach, co negatywnie oddziałuje na plonowanie owoców oraz ich jakość (Komamura i in. 2000). Badania Kai i in. (2015) wskazują, że dawki nawozów mineralnych powinny być starannie dozowane z uwagi na jakość uzyskiwanych owoców. Ponadto zawartość składników pokarmowych w glebie zależy od gospodarowania opadłymi liśćmi, które po mineralizacji stają się ich ważnym źródłem. Niektóre zalecenia dotyczące nawożenia jabłoni opierają się także o wyniki analizy składu chemicznego liści (Tagliavini in. 2007; Han i in. 2011; Kai i in. 2015;).

Skrócenie okresu sadowniczego użytkowania i likwidacja starych sadów oraz zakładanie w ich miejsce nowych może nasilać problem choroby replantacyjnej, której efekty najbardziej dostrzegalne w pierwszych latach wzrostu i owocowania drzew (Szczygieł i Zepp 1996). Objawy choroby replantacyjnej dotyczą opóźnienia początku wegetacji oraz słabego wzrostu drzew, a w skrajnych przypadkach może dochodzić do ich zamierania. Jabłonie należą do najbardziej podatnych na tę chorobę. Przyczyną tego zmęczenia gleb mogą być choroby grzybowe, nicienie oraz obecność innych niekorzystnych mikroorganizmów (Mazzola i Manici 2011). Natomiast nadmierne zagęszczenie, związki toksyczne z korzeni drzew lub niedobór pewnych składników pokarmowych odgrywają drugorzędą rolę (Merwin i Stiles 1989; Pacholak i Rutkowski 2001; Robinson 2007). Metodą na uniknięcie następstw choroby replantacyjnej jest pogłębiona uprawa gleby, odpowiednie nawożenie ze szczególnym uwzględnieniem nawozów azotowych, ale przede wszystkim zmiana uprawianego gatunku lub wybór gruntów nieużytkowanych dotychczas sadowniczo, co nie zawsze jest możliwe (Merwin i in. 2001; Olszewski 2001; Zydlik 2004; Zydlik i in. 2006).

## **2.2. Użytkowanie sadownicze a właściwości fizyczne, fizykochemiczne i chemiczne gleb**

Zabiegi agrotechniczne wykonywane w sadzie jabłoniowym, związane z utrzymaniem gleby w dobrej kulturze, mają na celu stworzenie optymalnych warunków do rozwoju systemu korzeniowego drzew. Jabłonie są roślinami wieloletnimi, a ich korzenie sięgają często skały macierzystej gleb. Analiza właściwości fizycznych gleb w sadach pozwala na ocenę penetracji korzeni w zależności od lokalnych uwarunkowań związanych z uziarnieniem. Fizyczną barierą dla wzrostu systemu korzeniowego mogą być zbyt małe rozmiary przestworów glebowych w glebach ciężkich, które są zasobne we frakcję ilową (Hamza i Anderson 2005). Poza tym korzenie drzew mogą pobierać z przestworów kapilarnych wodę, która jest związana siłami mniejszymi od siły ssącej korzeni, szacowaną na 1,5 MPa (Pieniążek 1995). Ważnymi parametrami determinującymi rozwój systemu korzeniowego drzew jabłoni jest podatność gleb na zagęszczenie oraz ich zwięzłość. Wieloletnie użytkowanie sadownicze może powodować zagęszczenie gleb w warstwie podpowierzchniowej i dotyczy to zwiększenia wartości gęstości objętościowej oraz gęstości upakowania (PD). Wei i in. (2021) wskazują na niską zawartość glebowej materii organicznej (SOM) oraz depozycję frakcji ilowej jako przyczynę zwiększenia wartości PD w warstwie podpowierzchniowej gleb w sadach jabłoniowych. Niejednokrotnie pedogeneza wpływa na dystrybucję frakcji ilowej w profilu glebowym i dotyczy to poziomu argik w glebach płowych. Występowanie pasów herbicydowych bez ochrony roślin okrywowych po kilkudziesięciu latach może nasilić naturalny

proces przemieszczenia frakcji iłowej drobnej do głębszych warstw gleby (Wei i in. 2021). W celu prawidłowej oceny gęstości objętościowej, porowatości oraz pojemności wodnej gleb sadów jabłoniowych należy zwrócić szczególną uwagę na rodzaj gleby, morfologię profilu glebowego oraz na intensywność pielęgnacji sadu. Pranagal i in. (2017) wskazują, że kilkunastoletnia konserwacja pasów herbicydowych nie wpłynęła negatywnie na właściwości fizyczne gleb, ponieważ stwierdzono tylko niewielkie zagęszczenie w warstwie podpowierzchniowej. Utrzymanie pasów herbicydowych w sadach jabłoniowych miało dość korzystny wpływ na pozostałe właściwości fizyczne tych gleb. Vogeler i in. (2006) odnotowali, że w warstwie podpowierzchniowej wartości gęstości objętościowej były wyższe niż w warstwie powierzchniowej gleb. Ferree i in. (2004) uprawiając jabłonie w kontrolowanych warunkach (uprawa w pojemnikach), stwierdzili, że zwiększenie wartości gęstości objętościowej z 1,2 do 1,5 Mg·m<sup>-3</sup> spowodowało skrócenie długości korzeni i pędów, zmniejszenie rozmiaru liści i ich całkowitej powierzchni. Wartość gęstości objętościowej, przy której wzrost korzeni jest zaburzony, jest jednak silnie uzależniona od składu granulometrycznego gleby. Na pasach przejazdu maszyn odnotowuje się wyższe wartości gęstości objętościowej niż w glebie pasów herbicydowych. Vogeler i in (2006) stwierdzili także większy efekt kompaktacji w glebie sadu ekologicznego w porównaniu z glebą sadu konwencjonalnego. Było to związane z terminem oprysków, ponieważ w czasie ich wykonywania gleba była wilgotna, co sprzyja zagęszczeniu. Zawartość wody w glebie jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na proces kompaktacji (Shah i in. 2017). Intensywna praca ciężkich maszyn w sadach może powodować zagęszczenie gleby jedynie w pasach pomiędzy rzędami drzew. Może to zmienić strukturę gleby oraz jej porowatość (Peng i in. 2004).

Gleby o zróżnicowanym składzie granulometrycznym wykazują odmienne przedziały wartości gęstości objętościowej, które mogłyby ograniczyć wzrost systemu korzeniowego drzew jabłoni. Optymalna wartość gęstości objętościowej dla wzrostu drzew owocowych wynosi od 1,00 do 1,30 Mg·m<sup>-3</sup>, a krytyczna wartość gęstości objętościowej dla prawidłowego wzrostu korzeni jabłoni wynosi 1,35-1,40 Mg·m<sup>-3</sup> (Wei i in. 2021). Gleba zbyt zwięzła o wysokiej gęstości objętościowej charakteryzuje się niską porowatością ogólną oraz niekorzystnymi warunkami powietrzno-wodnymi (Mika 2006; Batey 2009). Powietrze glebowe zawiera wówczas zdecydowanie wyższą zawartość dwutlenku węgla oraz niższą tlenu w porównaniu z powietrzem atmosferycznym. Beylich i in. (2010) stwierdzili, że wartości gęstości objętościowej powyżej 1,7 Mg·m<sup>-3</sup> mają negatywny wpływ na aktywność mikroorganizmów glebowych. Dane dotyczące sadowniczego użytkowania gleb oraz wyniki analiz właściwości fizycznych pozwalają określić rzeczywisty wpływ kompaktacji na przebieg procesów biologicznych. Funkcje gleby związane z właściwościami powietrzno-wodnymi takimi jak infiltracja wody, napowietrzanie są ograniczone, co prowadzić może

do zwiększonego ryzyka wystąpienia erozji wodnej oraz niekorzystnie oddziaływać na wzrost roślin (Czyż 2004). Pieniążek (1995) wskazuje, że wzrost korzeni ulega spowolnieniu, jeśli zawartość tlenu w powietrzu glebowym spada poniżej 10%. Należy zaznaczyć, że zdecydowanie trudniej jest poprawić właściwości fizyczne gleby aniżeli jej właściwości chemiczne.

Zagęszczenie gleby może utrudniać wzrost korzeni roślin, a tym samym może ograniczać ilość wody i składników pokarmowych dla roślin. Zawartość SOM odgrywa ważną rolę w regulacji wilgotności gleby. Zwiększona w glebie zawartość SOM poprawia jej zdolność retencji wody (Li i in. 2017). Rośliny utrzymują minimalną zawartość wody w swoich tkankach także w okresach spoczynku zimowego, aby zachować swoje funkcje życiowe. Stwierdzono utratę wody przez pędy roczne późną zimą, ponieważ drzewa z niezakłóconym systemem transportu wody kompensowały straty wody pędów poprzez pobieranie wody przez korzenie i translokację wewnętrzną. Ma to decydujący wpływ na przeżywalność drzew podczas długotrwałych okresów zamarzania pnia lub gleby (Thalheimer i in. 2024).

W ostatnim czasie stwierdzono brak świadomego zarządzania w dawkowaniu nawozów mineralnych roślin sadowniczych. Wymagania nawozowe powinny zależeć od gatunku drzew owocowych oraz okresu sadowniczego użytkowania. Zawartość SOM w glebie bywa relatywnie niska ze względu na niewłaściwą uprawę i zarządzanie glebą. Emisje  $N_2O$  są zwiększone, a na zdolność gleb do utleniania  $CH_4$  znacząco wpływa nadmierne stosowanie nawozów mineralnych (Liu i in. 2020). Zastosowany w nawożeniu obornik poprawia właściwości fizyczne, chemiczne i biologiczne gleby, w tym może zwiększać zawartość węgla organicznego (SOC) oraz poprawiać zdolność sekwestracji węgla (Maillard i Angers 2014). Drzewa jabłoni rozwijają się optymalnie, gdy w glebie obecne są makroelementy takie jak azot, fosfor i potas. Azot jako najważniejszy niezbędny składnik pokarmowy wspomaga wzrost liści i gałęzi, natomiast fosfor wspomaga rozwój korzeni i kwiatów (Zielenkiewicz i Szafranek 1999; Cheng i Raba 2009).

Znaczący wpływ na rozwój systemu korzeniowego mają odczyn gleby oraz zawartość składników pokarmowych dostępnych dla roślin. Okres przed założeniem sadu jabłoniowego należy wykorzystać na doprowadzenie odczynu gleby do pH 6,2-6,7. Rodzaj środków wapnujących oraz wielkość zastosowanych dawek zależy od aktualnego odczynu oraz składu granulometrycznego gleby. Stosowane są dwie formy nawozów wapniowych: węglanowe na gleby lekkie oraz tlenkowe na gleby średnie i ciężkie. Środki wapnujące służą do podnoszenia odczynu gleb oraz do dostarczania aktywnego wapnia ( $Ca^{2+}$ ). Uzyskujemy efekt wydłużonego w czasie (forma węglanowa) oraz szybkiego (forma tlenkowa) dostarczania wapnia do gleby. W trakcie sadowniczego użytkowania gleby należy stosować środki wapnujące w dawkach pozwalających na utrzymanie optymalnego odczynu gleby (Mochecki i in. 2005; Jarociński 2006). Nawozy

tego typu w uprawach sadowniczych należy aplikować w okresie jesiennym, tuż przed spoczynkiem zimowym.

Od wielu dekad jest poszukiwany zbilansowany „idealny” procentowy udział kationów, który w optymalny sposób wpływałby na wzrost i plonowanie roślin (Bear i Toth 1948; Graham 1959; Brown 1987; Eckert 1987; Hoskins 1997). Zaproponowany przez Bear i Toth (1948) procentowy udział kationów w kompleksie sorpcyjnym obejmował:  $\text{Ca}^{2+}$  60%,  $\text{Mg}^{2+}$  10%,  $\text{K}^+$  5% oraz  $\text{H}^+$  20%. Graham (1959) zaproponował zakresy dla  $\text{Ca}^{2+}$  65-85% CEC,  $\text{Mg}^{2+}$  6-12% CEC,  $\text{K}^+$  2-5% CEC, które przyjęte zostały w opracowanej wówczas teorii Basic Cation Saturation Ratio (podstawowy wskaźnik nasycenia kationów). W glebach o odczynie lekko kwaśnym i obojętnym kompleks sorpcyjny wysyceny jest kationami zasadowymi  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{Na}^+$  oraz zawiera stosunkowo niewielką ilość  $\text{H}^+$ . Wielkość CEC zależy od składu granulometrycznego, obecności minerałów, pH i zawartości SOC. Gleby o wysokiej zawartości frakcji iłowej mają naturalnie wysoką wartość CEC, podobnie jak gleby zasobne w SOC. Trudno jest zwiększyć zawartość minerałów ilastych w glebie, zatem najprostszym sposobem na podwyższenie wartości CEC gleby jest zwiększenie zawartości materii organicznej poprzez dodanie obornika, kompostu lub nawozu organicznego w formie mulczu (Hoskins 1997). Działania związane z uzyskaniem równowagi w dostępie składników pokarmowych w tym systemie interpretacji/zaleceń nie powinien być błędnie rozumiany jako próba dostosowania wysycenia kationami kompleksu sorpcyjnego do pewnego zestawu idealnych proporcji (Eckert 1987). Celem jest natomiast opracowanie optymalnego zakresu koncentracji poszczególnych kationów, aby uniknąć zakłóceń równowagi w optymalnym ich dostępie dla roślin. Rzeczywisty stosunek jednego kationu do drugiego może obejmować szeroki zakres wartości, nawet przy optymalnym wysyceniu, które dla  $\text{Ca}^{2+}$  wynosi 60-80% CEC i  $\text{Mg}^{2+}$  10-25% CEC dając wartości stosunku Ca:Mg w zakresie od 2,4:1 do 8:1 (Eckert 1987). Procentowy udział kationów w kompleksie sorpcyjnym jest dobrym sposobem oceny równowagi składników pokarmowych w glebie, ponieważ pokazuje ich względny udział w CEC. Dlatego ważna jest równowaga między podstawowymi kationami jakimi są wapń, magnez i potas. Niedobór któregoś z nich spowodowany brakiem równowagi wysycenia kompleksu sorpcyjnego określony jest niedoborem indukowanym (Hoskins 1997).

### **2.3. Uwarunkowania glebowe i sposób utrzymania gleb w sadach**

Morfologia oraz budowa profilu gleb w sadach zlokalizowanych na niewielkich pagórkach wskazują zazwyczaj na cechy procesu erozji wodnej i uprawowej. Wieloletnia uprawa w terenie urzeźbionym powoduje przemieszczanie się gleby w dół użytkowanych stoków, co skutkuje zmniejszeniem głębokości poziomów solum gleby na ich szczytach

i nagromadzeniem materiału glebowego u podnóży w formie deluwii. Współczesny poziom próchniczny na szczycie i ramieniu tych pagórków obejmuje materiał glebowy poziomów eluwalnego oraz strop poziomu iluwialnego. Erozja uprawowa spłyca miąższość profili glebowych na szczycie i ramieniu stoków (Heckrath i in. 2005; Li i in. 2007) powodując zwiększenie miąższości poziomu próchnicznego u ich podnóży. Koloidy próchniczne mogą tworzyć połączenia z minerałami ilastymi z wymiennymi kationami  $\text{Ca}^{2+}$  pełniącymi rolę mostków. Obecność kationów  $\text{Ca}^{2+}$  poprawia wówczas stabilność agregatów glebowych łączących SOC z minerałami ilastymi (Kobierski i in. 2018; Rätty i in. 2021). Wapń odgrywa ważną rolę w glebie, ponieważ może zmniejszać biodostępność SOC i zwiększać jego zapas oraz pełnić funkcję łącznika pomiędzy koloidami organicznymi i minerałami, co wpływa na pojemność sorpcyjną (Barreto i in. 2021; Rowley in. 2018). Zawartość frakcji ilowej odgrywa także ważną rolę w kształtowaniu żyzności gleby oraz sekwestracji dwutlenku węgla (Wiesmeier i in. 2019; Soenne i in. 2021). Erozja wodna jako zjawisko naturalne, odgrywa znaczącą rolę w przekształcaniu gleb w krajobrazie (Hancock i in. 2017; Labaz i in. 2022). Intensywna działalność rolnicza na obszarach o zróżnicowanej rzeźbie terenu, przyspiesza erozję wodną i doprowadza do przekształcenia budowy morfologicznej gleb (Lal 2001; Podhrázká i in. 2015). Nasileniu erozji sprzyja mechanizacja rolnictwa oraz struktura przestrzenna pól uprawnych w zależności od sposobu użytkowania gruntów, w tym sadowniczego, wyróżnionego w ocenie potencjalnego ryzyka erozji (Wawer i Nowocień 2007). Udział powierzchni gruntów potencjalnie narażonych na erozję wodną w zależności od nachylenia powierzchni, rodzaju gleby, średniorocznych opadów wynosi od 16,4% do 18,2% powierzchni Polski. Erozja wierzchniej warstwy gleby na obszarach młodoglacjalnych Polski doprowadziła w konsekwencji do mozaikowego charakteru pokrywy glebowej pierwotnie zajmowanej przez gleby płowe z typową budową profilu glebowego obejmującą poziomy Ap-Et-Bt-C (Kobierski 2013; Przewoźna 2014; Świtoniak 2014; Świtoniak i in. 2016).

Lokalizacja pod nowy sad powinna być starannie wybrana w celu osiągnięcia sukcesu ekonomicznego. Zintegrowane działania pozwolą uzyskać wysokie plonowanie owoców spełniających określone parametry jakościowe przy zastosowaniu minimalnej chemizacji (Mika 2010). Efektywne wykorzystanie czynników naturalnych, dotyczy lokalizacji sadów na glebach o najkorzystniejszych parametrach, które powinny być oceniane na podstawie kompleksowych badań w terenie i analiz laboratoryjnych. Niejednokrotnie istnieje konieczność przygotowania gleby przed sadzeniem drzew, stosując odpowiednią zabiegi uprawowe i nawożenie (Sadowski i in. 1990). Najlepszym stanowiskiem są niewielkie pagórki o wystawie południowej osłonięte od północnych i północno-zachodnich wiatrów. Stąd też w terenie urzeźbionym sady zakładane są na glebach wykazujących ryzyko wystąpienia erozji wodnej.

Od kilku dekad obserwuje się wzrost poziomu zabiegów agrotechnicznych i pielęgnacyjnych w sadach jabłoniowych. Zabiegi uprawowe obejmujące orkę są stosowane tylko w trakcie przygotowania gleby pod nowe nasadzenia drzew lub w trakcie replantacji sadu. Sposób pielęgnacji sadu oraz warunki glebowe i klimatyczne wpływają na poziom i jakość produkcji sadowniczej (Glover i in. 2000). Pasy herbicydowe w rzędach drzew oraz trawa w międzyrzędziach są najczęściej wykorzystane we współczesnej praktyce sadowniczej. Wpływa to na przebieg procesów determinujących właściwości fizyczne, fizykochemiczne i chemiczne, zwłaszcza w warstwie powierzchniowej gleb (van Dijck i van Asch 2002).

Zrównoważone zarządzanie sadami jabłoniowymi zyskało na popularności jako świadome podejście do ochrony zasobów glebowych przy jednoczesnej opłacalności komercyjnych odmian owoców (Reganold i in. 2001). Wśród kwestii związanych z odpowiedzialnym zarządzaniem znajdują się ograniczone wykorzystanie ciężkich maszyn, zminimalizowana częstotliwość wykonywanych oprysków do zwalczania szkodników i chorób, oraz optymalizacja nawożenia makro- i mikroelementami. Celem zarządzania jest opracowanie systemu praktyk korzystnych zarówno dla wzrostu i rozwoju drzew, jak i żyzności gleby, na której rosną. Metodyka integrowanej produkcji jabłek obejmuje zagadnienia związane z uprawą, ochroną i nawożeniem jabłoni i dotyczy przygotowania gleby pod nasadzenia drzew, wykonania zabiegów agrotechnicznych, ochrony przed agrofagami oraz zbiorów i przechowywania owoców jabłek. Metodyka uwzględnia także zasady higieniczno-sanitarne, jakie należy przestrzegać w trakcie zbiorów oraz przygotowania do sprzedaży produktów rolnych (Sobiczewski i Cieślińska 2023). Przepisy prawne reguluje ustawa z dnia 8 marca 2013 r. o środkach ochrony roślin (Dz. U. z 21 marca 2024 poz. 630), rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 21 grudnia 2022 zmieniające rozporządzenie w sprawie dokumentowania działań związanych z integrowaną produkcją roślin (Dz. U. z 2023 r. poz. 126) oraz Rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 24 czerwca 2013 r. w sprawie kwalifikacji osób prowadzących czynności kontrolne przestrzegania wymagań integrowanej produkcji roślin oraz wzoru certyfikatu poświadczającego stosowanie integrowanej produkcji roślin (Dz. U. z 2023 r. poz. 1397) i rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 8 maja 2013 r. w sprawie szkoleń w zakresie środków ochrony roślin (Dz. U. z 2022 r. poz. 824).

System sadzenia i prowadzenia jabłoni wpływa na jakość owoców i wysokość plonu (Licznar-Małańczuk 2006; Arsov i in. 2012). Intensywny rozwój sadownictwa datuje się od wprowadzenia do sadów produkcyjnych drzew jabłoni o karłowatych pniach, co zwiększyło jednocześnie ich zagęszczenie na jednostkę powierzchni. Nowoczesny, intensywny sad jabłoniowy to drzewa szczepione na podkładkach karłowatych i półkarłowatych, które wymagają zastosowania podpór. W sadach które nastawione są na produkcję jabłek dla

przemysłu przetwórczego stosuje się podkładki półkarłowe lub silnie rosnące. Uprawa jest wówczas mniej intensywna i generuje niższe koszty założenia plantacji, a przy optymalnej pielęgnacji istnieje możliwość uzyskiwania plonów w rok po posadzeniu. Licznar i in. (2001) wskazują, że zwiększona odsada drzew na hektarze nie wpływa negatywnie na właściwości fizykochemiczne gleb, jednakże obniża się ich urodzajność.

System utrzymania gleby w sadach ulegał systematycznym zmianom, które miały na celu poszukiwanie skutecznej kontroli nad roślinami konkurującymi z drzewami (Lisek 2014; Bokszczanin i in. 2021). Począwszy od orki stosowanej prawie na całej powierzchni sadu przez wąskie pasy trawy w szpalerach drzew jabłoni oraz roślinami wykorzystywanymi na zielony nawóz w międzyrzędziach do ugoru herbicydowego w rzędach drzew i trawy w międzyrzędziach (Hogue i Neilsen 2011). Stosowanie traw jako roślin okrywowych w rzędzie drzew w sadach ekologicznych w porównaniu z utrzymywaniem pasów herbicydowych w sadach konwencjonalnych poprawia porowatość gleby, infiltrację wody i wymianę gazową (Vogeler i in. 2006). Trawa jako roślina okrywowa w rzędzie drzew, zamiast utrzymywania rzędów w formie pasów herbicydowych, wydaje się lepszą opcją zarządzania w celu zapewnienia odpowiednich właściwości powietrznowodnych. Ponadto wzrasta zawartość materii organicznej i poprawia żyzność gleb (Hartley i in. 1996). Zastosowanie trawy w rzędzie drzew oraz mulczu z resztek roślinnych sprzyja zwiększeniu bioróżnorodności w warstwie powierzchniowej oraz poprawia produktywność sadu i jakość jabłek (Hippo i Samuelson 1991; Merwin i in. 1994; Merwin 1995; Reganold i in. 2001; Neilsen i in. 2003; Atucha i in. 2011). Resztki organiczne pozostawione w formie mulczu na powierzchni gleby osłabiają także skutki kompaktacji gleby (Hamza i Anderson 2005). Zastosowanie nawozu organicznego zmniejsza zagęszczenie gleby, ponieważ gleby zasobne w SOM są mniej podatne na kompaktację. Stosowanie roślin w formie mulczu zmniejsza szybkość parowania wody z gleby i poprawia właściwości fizyczne i biologiczne gleby (Fageria 2005). Sady jabłoniowe zakładane w terenie urzeźbionym wymagają wykorzystania roślin okrywowych w celu przeciwdziałania erozji wodnej powierzchniowej.

System pasów herbicydowych jest standardowym sposobem utrzymania gleb w sadach jabłoniowych od lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku, ponieważ skutecznie eliminuje konkurencje chwastów oraz jest metodą niezawodną, tanią i łatwą w zastosowaniu (Tworkoski i Glenn 2001; Harrington i in. 2005; Hogue i Neilsen 2011; Tworkoski i Glenn 2012). Parker i in. (1993) wskazuje, że korzenie drzew owocowych rosną lepiej na ugorze herbicydowym niż ugorze mechanicznym lub pod roślinami okrywowymi.

Glebę w międzyrzędziach zadarnia się zwykle po kilku latach od założenia sadu, stosując mieszanki słabo rosnących traw o niskim zapotrzebowaniu na wodę i składniki pokarmowe. W trosce o środowisko są poszukiwane nowe



proekologiczne metody pielęgnacji gleby w sadach, które zastąpiłyby odchwaszczanie chemiczne. Wielu badaczy dostrzega konieczność ograniczenia stosowania herbicydów doglebowych w sadach, co wymusza potrzebę poszukiwania alternatywnych metod pielęgnacji gleby (Stojanowska 1994; Lipecki 1998; Rabcewicz i in. 1998; Stojanowska 1998; Bielińska i in. 2004; Bokszczanin i in. 2021).

Systemem skutecznie zwalczającym chwasty jest ściółkowanie gleby w rzędach drzew słomą, obornikiem, kompostem, torfem trocinami, korą i zrębkami oraz innymi materiałami organicznymi (Treder i in. 2004; Rowley i in. 2011; Sas-Paszt i in. 2014; Mia i in. 2020). Mulcz skutecznie ograniczając rozwój chwastów utrzymuje wilgotność gleby, reguluje temperaturę i napowietrzenie gleby, zwiększa ilość materii organicznej i aktywność mikrobiologiczną gleby poprawia pobieranie składników pokarmowych, co wpływa na produktywność sadów (Forge i in. 2003; Chen i in. 2014). Ponadto mulczowanie sprzyja równomiernemu wzrostowi korzeni, co może poprawić wzrost i plonowanie drzew (Varga i in. 2004). Materiały syntetyczne skutecznie mogą kontrolować wzrost chwastów w sadach, dlatego z powodzeniem stosowana jest folia polietylenowa, włóknina polipropylenowa (Stojanowska 1994, 1998; Szewczuk i Gudarowska 2004; Markuszewski i Kopytowski 2008). Zastosowanie czarnej folii lub agrowłókniny do pokrycia gleby w rzędach drzew skutecznie ogranicza rozwój chwastów oraz utrzymuje wilgoć w glebie, jednakże niekorzystnie może wpływać na procesy związane przemianą materii organicznej (Wooldridge i Harris 1991). Mulczowanie gleby jest kilkakrotnie droższe niż zastosowanie herbicydów syntetycznych (Merwin i in. 1995; Markuszewski i Kopytowski 2008).

We współczesnych sadach nadal stosowane jest także ugorowanie mechaniczne lub trwałe zadarnienie na całej powierzchni sadu lub tylko w międzyrzędach (Lipecki 1998). Ugorowanie mechaniczne jest najczęściej stosowanym systemem utrzymania gleby w pierwszych latach po posadzeniu drzew. Ugór mechaniczny jest ekologiczną opcją do zwalczania chwastów za pomocą opielacza (TerAvest i in. 2010; Rabcewicz i Białkowski 2011). Wybór tej metody może jednak uszkadzać korzenie drzew rozwijające się w warstwie powierzchniowej gleby oraz skutkować pogorszeniem struktury gleby i przyspieszeniem mineralizacji materii organicznej (Lanauskas i in. 2014). Sposób utrzymywania gleby w sadach jabłoniowych oraz zastosowane nawożenie wpływa na jej właściwości fizyczne, fizykochemiczne, chemiczne oraz aktywność mikrobiologiczną (Hoagland i in. 2008; Rose i in. 2016; Mia i in. 2020). Zależności między tymi właściwościami decydują o cechach jakościowych gleby w trakcie sadowniczego użytkowania (Kozanecka 1995; Kozanecka i in. 1996; Bielińska i Lipecki 1998; Bielińska i Mocek 2003; Bielińska i Głowacka 2004). Sposób utrzymywania gleby w sadzie wpływa także na rozmieszczenie korzeni, co może oddziaływać na odżywianie drzew, ponieważ w glebie pasów herbicydowych są one głównie zlokalizowane w warstwie próchnicznej (Sadowski i Piwnicka 1983).

### 3. OBIEKT I METODY BADAŃ

#### 3.1. Obiekt badań

Materiałem do badań były próbki gleb pobrane z 9 profili gleb położonych w pasach herbicydowych sadów jabłoniowych o zróżnicowanym okresie sadowniczego użytkowania (2-3 lata; 9-12 lat; 19 lat; 27-30 lat). Próbki gleb pobrano w obrębie pasów herbicydowych w połowie odległości między linią rzędu drzew, a skrajem murawy z 5 profili zlokalizowanych z sąsiedztwie miejscowości Lisewo Kościelne – region A (Fot. 1-5) oraz 4 profili glebowych w sąsiedztwie miejscowości Wtelno – region B (Fot. 6-9), gmina Koronowo, województwo kujawsko-pomorskie. Próbki glebowe pobrano zgodnie z zasadami określonymi w polskiej normie PN-R-04031 (1997) oraz po przetransportowaniu do laboratorium Pracowni Gleboznawstwa i Biochemii Politechniki Bydgoskiej poddano wstępnej preparatyce (suszenie, przesiewanie przez sito o średnicy oczek >2,0 mm w celu oddzielenia części szkieletowych). W badanych sadach przez wszystkie lata sadowniczego użytkowania wykonywane były takie same zabiegi agrotechniczne, w tym zbliżone nawożenie, ochrona przed chorobami i szkodnikami. Ochrona drzew przed chorobami i szkodnikami była prowadzona zgodnie z zaleceniami dla produkcyjnych sadów jabłoniowych. Nawożenie nawozami mineralnymi obejmowało zastosowanie rocznie około 80-110 kg N, 90-130 kg K, 15-25 kg Mg oraz 10-20 kg P.



Fot. 1. Sad I-A

A-AE-Et-Bt-C



Fot. 2. Sad II-A1

A-Bt1-C1-C2



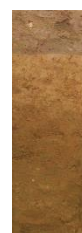
Fot. 3. Sad II-A2



A-Bt-C1-C2



Fot. 4. Sad III-A



A-Et-Bt-C



Fot. 5. Sad III-A



A-Et-Bt-C1-C2

**Dane obiektu badań:**

lokalizacja A – makroregion Pojezierze Wielkopolskie, mezoregion Równina Inowrocławska (Kondracki 2009). Ukształtowanie powierzchni mezoregionu stanowi płaska wysoczyzna morenowa (morena denna) o rzędnych wysokościowych 85-90 m n.p.m., która zbudowana jest z gliny zwałowej fazy poznańskiej zlodowacenia północnopolskiego. Rzeźba terenu związana jest z występowaniem form marginalnych i glacialnych lodowca fazy poznańskiej. Według norm klimatycznych przedstawiających uśrednione warunki klimatyczne w Polsce (IMGW-PIG) w latach 1991-2020 średnia temperatura roczna w regionie wynosiła 8,9 °C, zaś średnioroczne opady wynosiły 549 mm – mierzone w stacji pomiarowej Toruń.



Fot. 6. Sad I-B



A-Et-EB-Bt-C



Fot. 7. Sad II-B



A-Et-E/B-Bt-C



Fot. 8. Sad III-B



A-Et-B1-B2-C



Fot. 9. Sad IV-B



A-Et-Bt1-B2-C

**Dane obiektu badań:**

lokalizacja B – makroregion Pojezierze Południowopomorskie, mezoregion Pojezierza Krajeńskiego. Obecne są krajobrazy glacialne pagórkowate, równinne, faliste oraz rzadziej wzgórzowe z rynkami jeziornymi. Dominują plejstoceny gliny zwałowe, piaski i żwiry lodowcowe zlodowacenia północnopolskiego. Średnia temperatura roczna wynosiła w regionie 8,1 °C wraz ze średnim rocznym opadem atmosferycznym 612 mm, które mierzono w sąsiadującej stacji pomiarowej w Chojnicach.

W profilach glebowych opisane zostały cechy morfologiczne: miąższość i głębokość poziomów genetycznych, barwa w stanie wilgotnym, przejście pomiędzy poziomami, układ oraz wielkość, trwałość i rodzaj struktur glebowych (ocena typu gleby). Próbkę o nienaruszonej strukturze (w trzech powtórzeniach z każdego poziomu genetycznego) pobrano do cylinderków o objętości 100 cm<sup>3</sup> w celu oznaczenia gęstości objętościowej. Próbkę gleb o naruszonej strukturze pobrano do woreczków po wysuszeniu w temperaturze pokojowej przesiano przez sito o średnicy 2 mm oraz zhomogenizowano przed wykonaniem analiz składu granulometrycznego oraz właściwości fizykochemicznych i chemicznych.

### 3.2. Metody badań

W próbkach o naruszonej strukturze oznaczone zostały:

- barwa gleby w stanie wilgotnym – skala barw Munsella (Munsell Soil-Color Charts 2000),
  - gęstość właściwa metodą piknometryczną,
  - skład granulometryczny metodą dyfrakcji laserowej (Mastersizer 2000 (Malvern Instrument, Malvern, United Kingdom),
  - zawartość CaCO<sub>3</sub> metodą Scheiblera, zgodnie z normą PN-ISO 10693:2002,
  - pH gleby w roztworze 1 M KCl według PN-ISO 10390:1997,
  - kwasowość hydrolityczna metodą Kappena,
  - zawartość węgla organicznego metodą Tiurina,
  - skład chemiczny masy glebowej w próbkach o średnicy <2,0 mm po mineralizacji w stężonych kwasach HF i HClO<sub>4</sub> (Crock i Severson 1987). (próbki glebowe, w trzech powtórzeniach poddane zostały mineralizacji w mieszaninie kwasów w celu oznaczenia całkowitej zawartości metali),
  - analiza porównawcza materiału certyfikowanego o znanej całkowitej zawartości pierwiastków (mineralizacja w stężonych kwasach HF i HClO<sub>4</sub>),
  - zawartość form metali ciężkich rozpuszczalnych w 1M HCl (formy przyswajalne dla roślin wg procedury IUNG i Stacji Chemiczno-Rolniczych),
  - zawartość przyswajalnych dla roślin form magnezu metodą Schachtschabela według PN-R-04020:1994 oraz potasu (PN-R-04022:1996) i fosforu (PN-R-04023:1996) metodą Egnera-Riehma (Egner i in. 1960).
  - zawartość kationów wymiennych metodą z BaCl<sub>2</sub> [Norma ISO nr 11260],
  - zawartość kationów wodno-rozpuszczalnych (aktywnych) w ekstrakcie wody destylowanej w stosunku gleba:woda – 1:5.
- Zawartość metali w poszczególnych ekstraktach oznaczono metodą ASA, koncentrację wapnia, sodu i potasu metodą spektrometrii emisyjnej, natomiast zawartość fosforu przyswajalnego dla roślin na spektrofotometrze.

Na podstawie wyników analiz obliczono:

– kationową pojemność wymienna (CEC) po zsumowaniu koncentracji  $H^+$  (kwasowość hydrolityczna) i sumy zasadowych kationów wymiennych TEB ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ );

$$- \text{porowatość} = \left( \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \right) \quad (1)$$

$\rho_w$  – gęstość fazy stałej gleby ( $Mg \cdot m^{-3}$ )  $\rho_o$  – gęstość objętościowa ( $Mg \cdot m^{-3}$ );

$$- \text{zapas węgla organicznego} \quad OCD = c \cdot \rho_o \cdot t \cdot (1 - \theta \%) \quad (2)$$

OCD zapas węgla organicznego w glebie  $kg \cdot m^{-2}$ ,  $c$  – zawartość węgla ( $g \cdot kg^{-1}$ ),  $\rho_o$  – gęstość objętościowa ( $Mg \cdot m^{-3}$ ),  $t$  – miąższość poziomu (m),  $\theta$  – procentowa zawartość frakcji  $\phi > 2,0$  mm;

$$- \text{gęstość upakowania} \quad PD = \rho_o + 0,009K, \quad (3)$$

w celu oszacowania podatności gleb na zagęszczenie ( $Mg \cdot m^{-3}$ ) w poziomach podpowierzchniowych, PD gęstość upakowania,  $\rho_o$  – gęstość objętościowa ( $Mg \cdot m^{-3}$ ),  $K$  – zawartość frakcji ilowej (%).

### Opracowanie wyników

Wyniki analiz próbek gleby o średnicy  $< 2,0$  mm wykorzystano do obliczenia wartości wskaźników poszerzających możliwości interpretacyjne materiału badawczego. Należą do nich wskaźnik rozmieszczenia pierwiastków (DI) w profilu glebowym, obliczony według formuły:

$$DI = \frac{\text{zawartość pierwiastka w poziomach solum gleby}}{\text{zawartość pierwiastka w skale macierzystej gleby}} \quad (4)$$

Na podstawie całkowitej zawartości metali w obliczono wartości współczynnika wzbogacenia (EF). W obliczeniach jako zawartość tła geochemicznego przyjęto średnią całkowitą zawartość pierwiastków w skale macierzystej badanych gleb. Znajomość naturalnej zawartości pierwiastków w skale macierzystej przyjętej jako tło geochemiczne jest konieczna do oceny nagromadzenia w poziomach powierzchniowych gleb. Geochemiczną normalizację opracowano poprzez określenie całkowitej zawartości pierwiastków w próbkach skały macierzystej, które w założeniu nie podlegają antropogenicznemu oddziaływaniu. Wartości współczynnika wzbogacenia metali ciężkich określone zostały w celu oceny wpływu zanieczyszczeń antropogenicznych (Tab. 1). Obliczenia wykonano według formuły:

$$EF = \frac{C_n/C_{nFe}}{B_n/B_{nFe}} \quad (5)$$

gdzie  $C_n$  – całkowita zawartość metalu w próbce gleby;  $C_{nFe}$  – całkowita zawartość Fe jako pierwiastka odniesienia w próbce gleby;  $B_n$  – zawartość

metalu dla tła geochemicznego; BnFe – zawartość Fe tła geochemicznego (Martin i Meybeck 1979). Żelazo w niewielkim stopniu podlega antropogenicznemu oddziaływaniu i nie uczestniczy aktywnie w cyklach geochemicznych oraz nie ma znaczących źródeł antropogenicznych. We wszystkich obliczeniach jako zawartość tła geochemicznego przyjęto średnią całkowitą zawartość pierwiastków w warstwie 120-150 cm badanych profili glebowych.

Tabela 1. Kategorie wzbogacenia EF

Wartość	Opis stanu
< 2	brak wzbogacenia
2-5	średnie wzbogacenie
5-20	znaczące wzbogacenie
20-40	bardzo wysokie wzbogacenie
> 40	ekstremalnie wysokie wzbogacenie

Wyniki badań poddano analizie statystycznej. Dane dotyczące badanych parametrów zostały sprawdzone pod względem normalności rozkładu. Została wykonana analiza wariacji z wykorzystaniem najniższej istotnej różnicy według testu Post-hoc Tukeya oraz analiza skupień metodą Warda. Uzyskane wyniki poddano także wyliczeniom korelacji prostoliniowej (poziom istotności <0,05), za pomocą programu Statistica 13,0 firmy StatSoft. Wykonano analizę porównawczą materiału referencyjnego w celu walidacji metody oznaczania całkowitej zawartości metali. Certyfikowany materiał glebowy TILL-3 (Till-3 the Canadian Certified Reference Materials) poddano mineralizacji w pięciu powtórzeniach oraz oznaczono koncentrację w nich metali. Wartości odzysku metali w standardowym materiale referencyjnym wahały się od 91% do 109% dla poszczególnych metali wskazując na prawidłowy przebieg analizy, w tym pomiar koncentracji na aparacie metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej (ASA) przy użyciu spektrometru SOLAAR S4 (ThermoElemental).

## 4. WYNIKI BADAŃ

### 4.1. Morfologia gleb

Ocenie poddano cechy morfologiczne gleb: budowę profilu glebowego, głębokość i miąższość poziomów genetycznych, przejście pomiędzy poziomami, układ gleby, skład granulometryczny, barwę gleb na mokro, obecność i wielkość korzeni (Tab. 2, 3). W glebie sadów o dłuższym użytkowaniu odnotowano większą liczbę korzeni o różnych średnicach, w tym korzeni grubych (5-10 mm) i bardzo grubych (>10,0 mm). Najwięcej korzeni było obecnych w poziomach próchnicznym i podpowierzchniowych. Na podstawie reakcji z 10% HCl nie stwierdzono zawartości węglanu wapnia w materiale glebowym solum. Skała macierzysta w profilach III-A oraz IV-A zawierała odpowiednio 1,43% CaCO<sub>3</sub> oraz 3,10% CaCO<sub>3</sub>. W materiale glebowym nie zaobserwowano wyraźnych cech oglejenia jedynie w skale macierzystej kilku badanych profili stwierdzono słabe pokrycie barwami reduktomorfocznymi związanymi z obecnością związków Fe(II).

Tabela 2. Cechy morfologiczne gleb w sadach regionu A

I-A	<b>A</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/3 (na mokro). Struktura: gr-2-s. Układ średnio zwięzły w stanie świeżym. Przejście między poziomami stopniowe. Nieliczne korzenie średnie (2-5 mm). Pojedyncze drobne kamienie oraz żwir gruby.
	<b>AE</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/2 (na mokro). Układ słabo zwięzły w stanie świeżym. Przejście między poziomami wyraźne. Struktura zn-2-d/s. Średnio liczne korzenie średnie (2-5 mm)
	<b>Et</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/4 (na mokro). Układ zwięzły w stanie świeżym. Stopniowe przejście między poziomami. Struktura: zn-1-d; os-1-s. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm).
	<b>Bt</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10Y 4/3 (na mokro). Struktura: oa-3-dc. Widoczne liczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity w stanie świeżym, stopniowe przejście do poziomu C. Nieliczne liczne korzenie drobne (1-2 cm).
	<b>C</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 4/6 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Układ zbity. Nieliczne liczne, korzenie drobne (1-2 cm).
II-A1	<b>A</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 7,5YR 4/3 (na mokro). Struktura: gr-2-s. Układ średnio zwięzły w stanie świeżym. Przejście ostre do poziomu Bt. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm). Pojedyncze frakcje żwiru i kamieni.
	<b>Bt</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10Y 5/6 (na mokro). Układ zbity w stanie świeżym. Struktura oa-3-s. Przejście stopniowe. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm).
	<b>C1</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/8. Układ zbity w stanie świeżym. Struktura: oa-3-s. Średnio liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm).
	<b>C2</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/8 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Układ zbity. Nieliczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm).



II-A2	<b>A</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/3 (na mokro). Struktura: gr-1-s. Układ średnio zwięzły. Przejście wyraźne do poziomu Bt. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz nieliczne korzenie grube (5- 0 mm).
	<b>Bt</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10Y 4/4 (na mokro). Układ zbity w stanie świeżym. Struktura oa-3-d. Stopniowe przejście do skały macierzystej. Liczne korzenie średnie 2-5 mm) i nieliczne korzenie grube (5- 0 mm).
	<b>C1</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10Y 5/6 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Widoczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity, niewyraźne przejście między poziomami. Liczne korzenie średnie (2-5 mm) oraz średnio liczne korzenie grube (5-10 mm).
	<b>C2</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 7,5YR 5/8 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Widoczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity, niewyraźne przejście do poziomu C, Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz średnio liczne korzenie grube (5-10 mm).
III-A	<b>A</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 4/3 (na mokro). Struktura: gr-1-d/s. Układ średniozwięzły. Stopniowe przejście do poziomu Et. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz średnio liczne korzenie grube (5-10 mm).
	<b>Et</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 6/3 (na mokro). Układ słabo zwięzły w stanie świeżym. Struktura zn-1-s. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz liczne korzenie grube (5-10 mm) i nieliczne korzenie bardzo grube (>10 mm).
	<b>Bt</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10Y 4/3 (na mokro). Struktura: oa-3-g. Widoczne liczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity, niewyraźne przejście między poziomami. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz korzenie grube (5-10 mm).
	<b>C</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 7,5YR 5/6 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Widoczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity. Liczne korzenie drobne, średnie i grube (1-2 cm, 2-5 mm i 5-10 mm).
IV-A	<b>A</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/3 (na mokro). Struktura: gr-1-d/s. Układ średniozwięzły. Stopniowe przejście do poziomu Et. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz średnio liczne korzenie grube (5-10 mm).
	<b>Et</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 6/3 (na mokro). Układ słabo zwięzły w stanie świeżym. Struktura zn-1-s. Liczne korzenie średnie (2-5 mm) oraz liczne korzenie grube (5-10 mm) i nieliczne korzenie bardzo grube (>10 mm).
	<b>Bt</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10Y 4/4 (na mokro). Struktura: oa-3-g. Widoczne liczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity, stopniowe przejście do poziomu C. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz korzenie grube (5-10 mm).
	<b>C1</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 3/6 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Układ zbity. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm). Średnio liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm).
	<b>C2</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista barwie 10YR 4/6 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Układ zbity. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz liczne korzenie grube (5-10 mm).

Opis według Przewodnika terenowego (SgP 2019). Barwę określono w stanie wilgotnym według skali barwnej Munsella. Typ struktur agragtowych: gr – gruzelkowa; oa – angularna; os – subangularna. Stopień wykształcenia struktur agregatowych: 1 – słaba; 2 – średniotrwała; 3 – trwała. Wielkość agregatów: d – drobna; s – średnia; g – gruba

Tabela 3. Cechy morfologiczne gleb w sadach regionu B

I-B	<b>A</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 4/2 (na mokro). Struktura: gr-2-s. Układ średnio zwięzły w stanie świeżym. Ostre przejście do poziomu Et. Średnio liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm). Pojedyncze kamienie.
	<b>Et</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/4 (na mokro). Układ słabo zwięzły w stanie świeżym. Struktura zn-2-s. Średnio liczne korzenie średnie (2-5 mm).
	<b>EB</b>	Pył gliniasty o barwie 7,5YR 5/4 (na mokro). Układ zwięzły w stanie świeżym. Struktura: oa-3-s; os-3-s. Liczne korzenie średnie (2-5 mm).
	<b>Bt</b>	Pył gliniasty o barwie na mokro 10Y 4/4 (na mokro). Struktura: oa-3-de. Widoczne liczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity w stanie świeżym, niewyraźne przejście do poziomu C. Nieliczne korzenie drobne (1-2 cm).
	<b>C</b>	Pył gliniasty o barwie 10YR 5/6 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Układ zbity. Nieliczne liczne, korzenie drobne (1-2 cm).
II-B	<b>A</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 4/2 (na mokro). Struktura: gr-2-s. Układ średnio zwięzły w stanie świeżym. Przejście ostre, faliste do poziomu Et. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm). Pojedyncze frakcje żwiru.
	<b>Et</b>	Pył gliniasty o barwie 10YR 6/4 (na mokro). Układ słabo zwięzły w stanie świeżym. Struktura zn-2-s. Przejście zaciekowe. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm)
	<b>E/B</b>	Pył gliniasty o barwie 10YR 6/3 (na mokro). Układ zwięzły w stanie świeżym. Struktura: oa-3-s; os-3-s. Średnio liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz grube. Widoczne kliny – zaciekowość eluwalna.
	<b>Bt</b>	Pył gliniasty o barwie 10Y 3/6 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Widoczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity, niewyraźne przejście do poziomu C. Nieliczne liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm).
	<b>C</b>	Pył gliniasty o barwie 10YR 5/6 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Układ zbity. Nieliczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm).
III-B	<b>A</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/2 (na mokro). Struktura: gr-2-s. Układ średniozwięzły. Ostre, faliste przejście do poziomu Et. Liczne korzenie średnie (2-5 mm) oraz średnio liczne korzenie grube (5-10 mm).
	<b>Et</b>	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/4 (na mokro). Układ słabo zwięzły w stanie świeżym. Struktura zn-1-s. Nieregularne przejście do poziomu Bt. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz nieliczne korzenie grube (5-10 mm).
	<b>Bt1</b>	Pył gliniasty o barwie 10Y 4/4 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Widoczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity, niewyraźne przejście między poziomami. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz średnio liczne korzenie grube (5-10 mm).
	<b>Bt2</b>	Pył gliniasty o barwie 7,5YR 3/4 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Widoczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity, niewyraźne przejście do poziomu C, Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz średnio liczne korzenie grube (5-10 mm).
	<b>C</b>	Pył gliniasty o barwie 10YR 5/6 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Układ zbity. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm). Średnio liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm).

IV-B	A	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 4/3 (na mokro). Struktura: gr-2-s. Układ średniozwięzły. Stopniowe przejście do poziomu Et. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz średnio liczne korzenie grube (5-10 mm).
	Et	Glina piaszczysta drobnoziarnista o barwie 10YR 5/4 (na mokro). Układ słabo zwięzły w stanie świeżym. Struktura zn-2-s. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz liczne korzenie grube (5-10 mm) i nieliczne korzenie bardzo grube (> 10 mm).
	Bt1	Pył gliniasty o barwie 10Y 4/3 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Widoczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity, niewyraźne przejście między poziomami. Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz średnio liczne korzenie grube (5-10 mm).
	Bt2	Pył gliniasty o barwie 10Y 4/4 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Widoczne wyściółki ilaste na powierzchni agregatów. Układ gleby zbity, niewyraźne przejście do poziomu C, Liczne korzenie drobne, średnie i grube (1-2 cm, 2-5 mm i 5-10 mm).
	C	Pył gliniasty o barwie 10YR 5/6 (na mokro). Struktura: oa-3-s. Układ zbity Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm). Liczne korzenie drobne i średnie (1-2 cm i 2-5 mm) oraz średnio liczne korzenie grube (5-10 mm).

Objaśnienia jak pod Tabelą 2

## 4.2. Właściwości fizyczne, fizykochemiczne i chemiczne gleb

W pracy porównano wyniki badań gleb regionu A obejmującego 5 profili glebowych (22 próbki) oraz regionu B z 4 profilami glebowymi (20 próbek). Interpretacji poddano wyniki analiz grupując dane dotyczące pokrywy glebowej w poziomie próchnicznym, poziomach podpowierzchniowych (AE, Et, EB, E/B, Bt) i skale macierzystej obu sadów użytkowanych sadowniczo po 2-3 latach sadowniczego użytkowania (I-A i I-B), po 9-12 latach (II-A1, II-A2 i II-B), po 19 latach (III-A i III-B) oraz 27-30 latach (IV-A i IVB). Analizie wariancji jednoczynnikowej Anova (test Post-hot Tukeya) poddano wyniki analiz materiału glebowego w celu zweryfikowania istniejących istotnych różnic pomiędzy średnimi. Dotyczy to porównania wyników badań próbek glebowych pobranych z profili glebowych pod sadami użytkowanymi 2-3 lata z wynikami analiz próbek glebowych pobranych z sadów użytkowanych w trzech przedziałach czasowych.

W materiale glebowym w sadach regionu A oraz poziomie próchnicznym i podpowierzchniowym gleb regionu B odnotowano skład granulometryczny gliny piaszczystej drobnoziarnistej (Tab. 4). W glebie poziomu Et w profilu III-A stwierdzono piasek gliniasty drobnoziarnisty. Minimalna procentowa zawartość frakcji piaszkowej, pyłowej i ilowej wynosiła odpowiednio: 26,64%, 24,82% i 1,15%. Maksymalna procentowa zawartość tych frakcji wynosiła odpowiednio: 74,03% 65,48% i 9,88%. We frakcji piasku (2,0-0,05 mm) w większości poziomów genetycznych dominowała podfrakcja piasku drobnego o średnicy 0,25-0,10 mm (Tab. 5). Frakcja szkieletowa stanowiła niewielki procentowy udział w składzie granulometrycznym. Poziomy wzbogacania i skały macierzystej gleb regionu B wykazywały uziarnienie pyłu gliniastego.

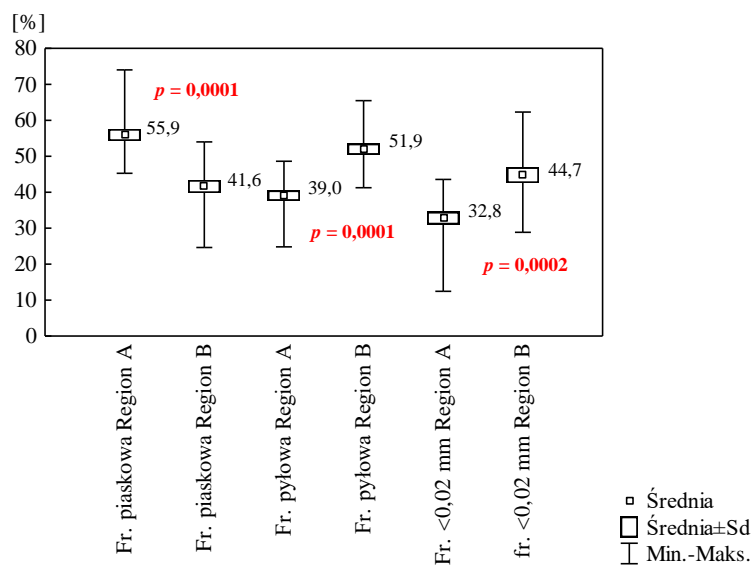
Tabela 4. Zawartość frakcji oraz kategoria agronomiczna gleb (PTG 2009)

Nr	Wiek sadu	Profil	Procentowa zawartość frakcji mm					Podgrupa granul.	Kat. agronomiczna
			>2,0	2,0-0,05	0,05-0,002	<0,02	<0,002		
I-A	2	A	3,3	52,58	41,96	34,20	5,46	gpdr	średnia
		AE	3,9	56,75	38,01	31,60	5,24	gpdr	średnia
		Et	4,6	56,26	38,69	32,34	5,05	gpdr	średnia
		Bt	3,0	57,49	36,36	31,41	6,15	gpdr	średnia
		C	6,7	59,29	35,29	30,02	5,42	gpdr	średnia
II-A1	9	A	1,4	51,94	42,53	34,18	5,53	gpdr	średnia
		Bt	0,7	47,72	45,97	43,07	6,31	gpdr	ciężka
		C1	1,5	62,15	32,98	31,64	4,87	gpdr	średnia
		C2	1,6	57,41	37,86	34,45	4,73	gpdr	średnia
II-A2	12	A	2,8	49,70	45,47	34,28	4,83	gpdr	średnia
		Bt	1,5	57,53	36,13	29,45	6,34	gpdr	średnia
		C1	5,4	68,31	28,37	19,85	3,32	gpdr	lekka
		C2	1,3	47,19	47,67	43,55	5,14	gpdr	ciężka
III-A	19	A	3,0	67,12	29,71	20,20	3,17	gpdr	lekka
		Et	4,0	74,03	24,82	12,45	1,15	pgdr	lekka
		Bt	2,0	49,96	43,16	40,73	6,88	gpdr	ciężka
		C	1,9	45,97	48,39	42,86	5,64	gpdr	ciężka
IV-A	30	A	1,0	61,39	34,15	25,99	4,46	gpdr	średnia
		Et	1,3	51,35	44,50	34,03	4,15	gpdr	średnia
		Bt	4,2	45,26	48,64	43,20	6,10	gpdr	ciężka
		C1	1,1	60,15	35,21	33,72	4,64	gpdr	średnia
		C2	5,8	51,15	43,16	38,37	5,69	gpdr	ciężka
I-B	3	A	3,7	53,98	41,25	33,45	4,77	gpdr	średnia
		Et	2,1	51,48	43,07	36,60	5,45	gpdr	ciężka
		EB	2,3	38,46	54,86	49,50	6,68	pyg	ciężka
		Bt	0,9	37,08	54,49	53,18	8,43	pyg	ciężka
		C	1,5	38,99	53,97	49,54	7,04	pyg	ciężka
II-B	9	A	2,8	49,47	45,00	34,42	5,53	gpdr	średnia
		Et	2,3	43,70	50,33	39,17	5,97	pyg	ciężka
		E/B	2,5	40,80	52,92	44,75	6,28	pyg	ciężka
		Bt	1,7	36,22	55,79	53,12	7,99	pyg	ciężka
		C	1,5	35,99	57,45	50,74	6,56	pyg	ciężka
III-B	19	A	4,4	48,55	46,90	33,95	4,55	gpdr	średnia
		Et	2,6	52,91	41,55	32,95	5,54	gpdr	średnia
		Bt1	3,3	42,35	50,91	47,20	6,74	pyg	ciężka
		Bt2	1,9	33,97	58,44	54,44	7,59	pyg	ciężka
		C	1,8	40,09	53,67	49,27	6,24	pyg	ciężka
IV-B	27	A	3,4	49,98	45,90	28,85	4,12	gpdr	średnia
		Et	2,4	47,29	46,99	33,48	5,72	gpdr	średnia
		Bt1	1,4	24,64	65,48	62,29	9,88	pyg	ciężka
		Bt2	1,3	30,18	62,20	56,41	7,62	pyg	ciężka
		C	1,5	35,80	57,75	51,79	6,45	pyg	ciężka

gpdr – glina piaszczysta drobnoziarnista; pyg – pył gliniasty

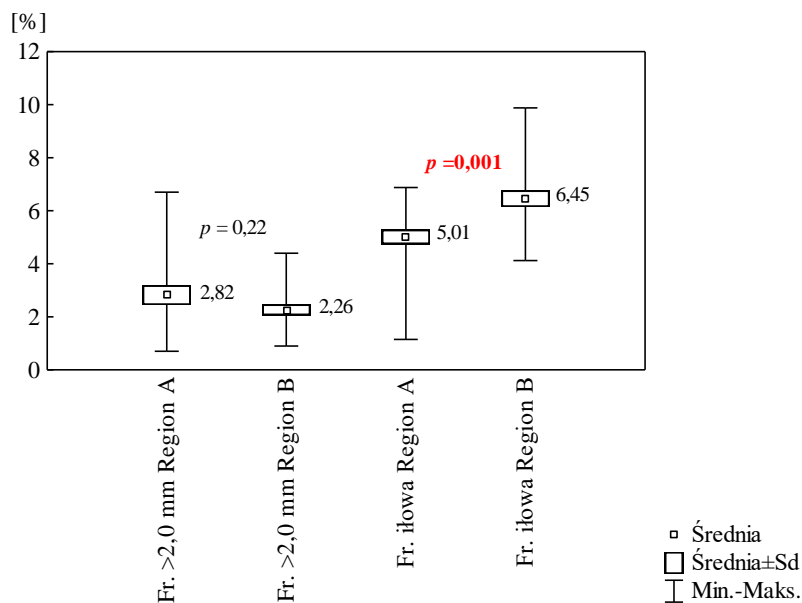
Tabela 5. Skład granulometryczny próbek glebowych

Nr	Wiek sadu	Budowa profilu	Głębokość cm	Procentowa zawartość frakcji (mm)						
				2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,10	0,1-0,05	0,05-0,02	0,02-0,002
I-A	2	A	0-22	0,01	4,03	12,91	20,73	14,90	13,22	28,74
		AE	22-44	0,38	6,18	16,06	23,38	10,75	11,65	26,36
		Et	44-91	0,07	4,36	15,03	25,12	11,68	11,40	27,29
		Bt	91-135	0,05	4,21	15,85	25,99	11,39	11,10	25,26
		C	135-150	0,00	3,71	15,21	27,32	13,05	10,69	24,60
II-A1	9	A	0-26	0,45	3,52	10,07	21,91	15,99	13,88	28,65
		Bt	26-53	0,00	2,59	7,90	22,36	14,87	9,21	36,76
		C1	53-110	0,27	3,78	25,70	16,49	15,91	6,21	26,77
		C2	110-150	0,32	5,48	11,18	24,11	16,02	8,74	29,42
II-A2	12	A	0-27	0,07	2,90	10,23	22,49	14,01	16,02	29,45
		Bt	27-65	0,00	2,13	11,60	26,93	16,87	13,02	23,11
		C1	65-128	0,05	3,35	14,21	32,40	18,30	11,84	16,53
		C2	128-150	0,00	3,58	9,39	21,75	12,47	9,26	38,41
III-A	19	A	0-30	0,00	4,42	16,02	28,99	17,69	12,68	17,03
		Et	30-53	1,60	3,09	18,27	33,87	19,20	13,52	11,30
		Bt	53-83	0,03	4,11	12,94	21,20	11,68	9,31	33,85
		C	83-150	0,00	4,00	11,09	18,04	12,84	11,17	37,22
IV-A	30	A	0-28	0,00	2,87	12,65	28,06	17,81	12,62	21,53
		Et	28-47	0,00	1,60	10,36	24,69	14,70	14,62	29,88
		Bt	47-76	0,33	3,51	9,78	21,00	10,64	11,54	37,10
		C1	78-112	0,00	2,41	17,19	30,87	9,68	6,13	29,08
		C2	112-150	0,00	2,71	11,46	23,31	13,67	10,48	32,68
I-B	3	A	0-26	0,00	3,89	12,56	24,01	13,52	12,57	28,68
		Et	26-34	0,35	3,33	11,52	21,76	14,52	11,92	31,15
		EB	34-50	0,00	2,04	9,16	16,41	10,85	12,04	42,82
		Bt	50-108	0,00	1,79	8,45	14,78	12,06	9,74	44,75
		C	108-150	0,00	1,15	6,42	18,42	13,00	11,47	42,50
II-B	9	A	0-27	0,00	3,41	11,5	20,46	14,10	16,11	28,89
		Et	27-61	0,00	2,41	9,64	20,41	11,24	17,13	33,20
		E/B	61-74	0,00	1,41	7,65	20,41	11,33	14,45	38,47
		Bt	74-112	0,00	2,11	7,33	17,30	9,48	10,66	45,13
		C	112-150	0,00	0,89	6,47	15,23	13,40	13,27	44,18
III-B	19	A	0-27	0,52	3,30	8,98	19,42	16,33	17,50	29,40
		Et	27-38	0,00	0,78	15,6	24,12	12,41	14,14	27,41
		Bt1	38-51	0,00	2,23	9,78	18,74	11,60	10,45	40,46
		Bt2	51-97	0,00	1,25	8,23	14,7	9,79	11,59	46,85
		C	97-150	0,00	1,13	8,41	17,51	13,04	10,64	43,03
IV-B	27	A	0-29	0,14	3,12	11,45	20,49	14,78	21,17	24,73
		Et	29-66	0,25	1,53	7,95	20,41	17,15	19,23	27,76
		Bt1	66-93	0,00	1,33	6,41	8,12	8,78	13,07	52,41
		Bt2	93-123	0,00	0,68	5,42	12,98	11,10	13,41	48,79
		C	123-150	0,00	1,22	7,85	16,21	10,52	12,41	45,34

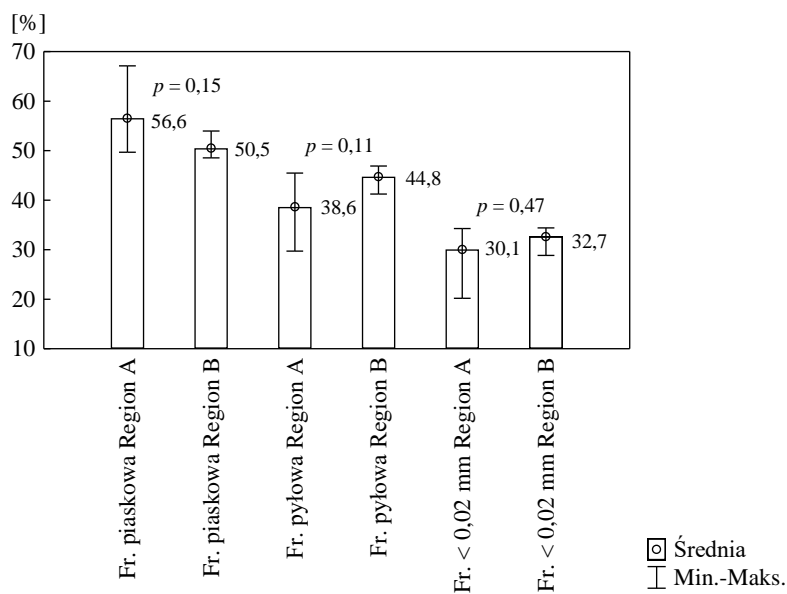


Rysunek 1. Średnia procentowa zawartość frakcji piaskowej, pyłowej oraz frakcji <math><0,02\text{ mm}</math> w glebach regionu A ( $n = 22$ ) oraz B ( $n = 20$ ); Sd – błąd standardowy

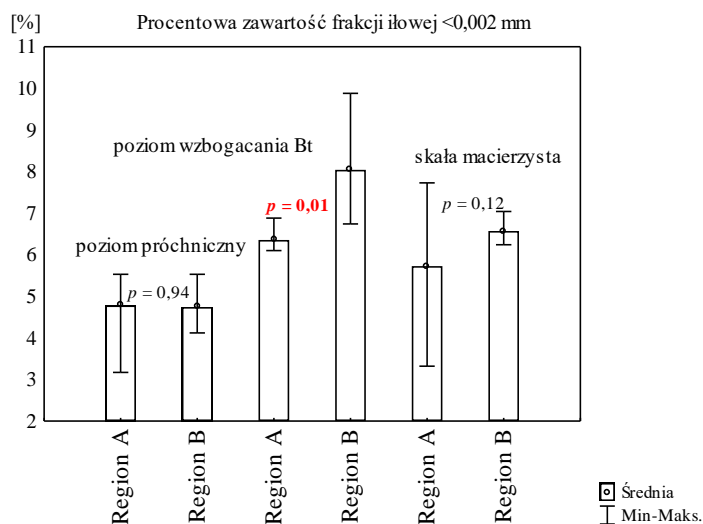
Gleba w profilach gleb regionu A charakteryzowała się istotnie wyższą średnią procentową zawartością frakcji piaskowej, natomiast istotnie niższą frakcji pyłowej oraz frakcji o średnicy <math><0,02\text{ mm}</math> (części spławialne) w porównaniu z glebami regionu B (Rys. 1). Materiał glebowy w profilach gleb w sadach regionu B zawierał zbliżoną średnią procentową zawartość frakcji szkieletowych oraz istotnie wyższą średnią procentową zawartość frakcji iłowej (Rys. 2) w porównaniu z glebami w sadach regionu A. Skład granulometryczny w poziomie próchnicznym gleb w sadach obu regionów nie wykazywał istotnego zróżnicowania (Rys. 3), a gleba należała do kategorii agronomicznej gleb średnich (Tab. 4). W poziomie próchnicznym gleb w sadach obu regionów stwierdzono także zbliżoną średnią procentową zawartość frakcji iłowej (Rys. 4) 4,78% – region A, 4,74% – region B ( $p = 0,94$ ). Materiał glebowy w poziomach podpowierzchniowych i skale macierzystej gleb w sadach regionu B został sklasyfikowany w większości przypadków do kategorii gleb ciężkich (Tab. 3). Odnotowano nagromadzenie frakcji iłowej w poziomie iluwialnym badanych gleb, co jest charakterystyczne dla typu gleb pływych. Gleba w poziomie iluwialnym Bt profili gleb regionu B ( $n = 5$ ) wykazywała natomiast istotnie wyższą ( $p = 0,01$ ) średnią procentową zawartość frakcji iłowej (8,04%) w porównaniu z glebami regionu A ( $n = 6$ ), która wynosiła 6,36% (Rys. 4). Przekłada się to bezpośrednio na wartości  $\rho_0$  oraz PD, które były wyższe w poziomach podpowierzchniowych gleb sadów regionu B (Tab. 5).



Rysunek 2. Średnia procentowa zawartość frakcji >2,0 mm oraz <0,002 mm w glebach regionu A (n = 22) oraz B (n = 20); Sd – błąd standardowy



Rysunek 3. Średnia procentowa zawartość frakcji piaskowej, pyłowej oraz <0,02 mm w poziomie próchnicznym



Rysunek 4. Średnia procentowa zawartość frakcji iłowej w profilach badanych gleb

Tabela 6. Wybrane parametry glebowe

Profil	Wiek sadu	Poziom	C <sub>org</sub>	ρ <sub>o</sub>	ρ <sub>w</sub>	PD	Poro watość	OCD	pH
			g·kg <sup>-1</sup>	Mg·m <sup>-3</sup>			m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>		
I-A	2	A	8,7	1,54	2,61	-	0,41	2,59	6,46
		AE	6,1	1,66	2,60	1,71	0,36	1,95	6,63
		Et	4,1	1,66	2,60	1,71	0,36	3,05	6,35
		Bt	3,8	1,70	2,63	1,75	0,35	3,13	6,34
		C	1,2	1,90	2,62	-	0,27	0,21	6,75
II-A1	9	A	6,8	1,67	2,62	-	0,36	2,89	5,78
		Bt	3,0	1,77	2,60	1,83	0,32	1,58	5,55
		C1	1,8	1,80	2,62	-	0,31	1,72	6,47
		C2	1,2	1,89	2,63	-	0,28	0,85	6,55
II-A2	12	A	8,0	1,62	2,60	-	0,38	3,78	4,36
		Bt	2,6	1,65	2,62	1,71	0,37	1,69	4,97
		C1	1,7	1,67	2,61	-	0,36	1,61	5,40
		C2	1,1	1,73	2,63	-	0,34	0,38	5,49
III-A	19	A	6,2	1,57	2,55	-	0,38	3,18	5,30
		Et	1,2	1,68	2,63	1,69	0,36	0,68	6,64
		Bt	0,8	1,87	2,62	1,93	0,29	0,44	6,90
		C	0,6	1,88	2,63	-	0,29	0,44	7,02*
IV-A	30	A	6,4	1,59	2,61	-	0,39	2,79	4,01
		Et	1,8	1,70	2,61	1,74	0,35	0,60	3,80
		Bt	1,6	1,75	2,59	1,80	0,32	0,80	3,79
		C1	1,2	1,78	2,63	-	0,32	0,63	4,86
		C2	0,9	1,88	2,62	-	0,28	0,64	7,35**



kontynuacja Tabeli 6									
I-B	3	A	12,9	1,51	2,57	-	0,41	4,88	5,49
		Et	4,5	1,77	2,60	1,82	0,32	0,62	4,64
		EB	2,9	1,83	2,63	1,89	0,30	0,83	5,32
		Bt	2,1	1,87	2,62	1,95	0,29	2,26	5,31
		C	1,9	1,89	2,62	-	0,28	1,49	5,71
II-B	9	A	12,1	1,54	2,57	-	0,40	4,89	5,49
		Et	5,0	1,73	2,60	1,78	0,33	2,87	5,48
		E/B	3,4	1,73	2,60	1,79	0,33	0,75	5,71
		Bt	2,1	1,87	2,61	1,94	0,28	1,47	5,51
		C	2,0	1,89	2,64	-	0,28	1,41	5,82
III-B	19	A	11,7	1,54	2,55	-	0,40	4,65	4,20
		Et	4,0	1,56	2,59	1,61	0,40	0,67	4,72
		Bt1	3,0	1,87	2,62	1,93	0,29	0,71	4,98
		Bt2	2,6	1,87	2,62	1,94	0,29	2,91	4,85
		C	1,8	1,90	2,63	-	0,28	1,78	6,15
IV-B	27	A	13,4	1,61	2,62	-	0,39	6,16	4,78
		Et	5,2	1,68	2,60	1,73	0,35	3,15	4,45
		Bt1	3,8	1,77	2,62	1,86	0,32	1,79	4,40
		Bt2	1,8	1,86	2,62	1,93	0,29	0,99	4,33
		C	1,6	1,88	2,63	-	0,29	0,80	5,58

\* materiał glebowy zawierał 1,43% CaCO<sub>3</sub>; \*\* materiał glebowy zawierał 3,10% CaCO<sub>3</sub>; Corg – zawartość węgla organicznego; ρ<sub>o</sub> – gęstość objętościowa; ρ<sub>w</sub> – gęstość właściwa (Mg·m<sup>-3</sup>); OCD – zapas węgla organicznego; PD – gęstość upakowania

Tabela 7. Średnie zawartości parametrów glebowych oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey) w sadach A i B

Parametr	Poziom próchniczny		Poziomy podpowierzchniowe		Skała macierzysta	
	A (n = 5)	B (n = 4)	A (n = 9)	B (n = 12)	A (n = 8)	B (n = 4)
Corg g·kg <sup>-1</sup>	7,2	12,6	2,78	3,37	1,21	1,82
	<i>p = 0,0003</i>		p = 0,38		<i>p = 0,029</i>	
ρ <sub>o</sub> Mg·m <sup>-3</sup>	1,60	1,55	1,72	1,78	1,81	1,89
	p = 0,19		p = 0,11		p = 0,17	
ρ <sub>w</sub> Mg·m <sup>-3</sup>	2,60	2,58	2,61	2,61	2,62	2,63
	p = 0,34		p = 0,93		p = 0,27	
Porowatość m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	0,38	0,40	0,34	0,31	0,31	0,28
	p = 0,17		p = 0,09		p = 0,24	
OCD kg·m <sup>-2</sup>	3,05	5,14	1,55	1,58	0,81	1,37
	<i>p = 0,001</i>		p = 0,93		p = 0,16	
pH l M KCl	5,20	4,99	5,66	4,98	6,22	5,81
	p = 0,73		p = 0,11		p = 0,44	

Corg – zawartość węgla organicznego; ρ<sub>o</sub> – gęstość objętościowa; ρ<sub>w</sub> – gęstość właściwa (Mg·m<sup>-3</sup>); OCD – zapas węgla organicznego

Zawartość Corg w poziomie próchnicznym gleb w sadach regionu A wahała się od 6,2 g·kg<sup>-1</sup> do 8,7 g·kg<sup>-1</sup> oraz od 11,7 g·kg<sup>-1</sup> do 13,4 g·kg<sup>-1</sup> w glebach sadów regionu B (Tab. 6). Średnia zawartość Corg w poziomie próchnicznym sadów regionu A była statystycznie istotnie niższa (7,2 g·kg<sup>-1</sup>) w porównaniu ze średnią zawartością (12,6 g·kg<sup>-1</sup>) w glebie sadów lokalizacji B (Tab. 7). Podobną

zależność odnotowano dla średniej zawartości Corg w materiale glebowym skały macierzystej. Poziomy podpowierzchniowe w profilach gleb sadów regionu B charakteryzowały się wyższą zawartością Corg, jednakże nie była to różnica statystycznie istotna. W glebie poziomu próchnicznego wszystkich profili glebowych zawartość węgla organicznego była wyższa niż  $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Wielkość zapasu OCD w poziomie próchnicznym gleb w sadach regionu B była istotnie wyższa (Tab. 7) w porównaniu z wielkością OCD w glebach pod sadami regionu A ( $p = 0,001$ ). Nie stwierdzono istotnego zróżnicowania wielkości OCD w poziomach podpowierzchniowych sadów obu lokalizacji ( $p = 0,93$ ).

Tabela 8. Średnie zawartości parametrów glebowych w profilach glebowych oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)

Profil/ wiek sadu	Poziom próchniczny	p =	Poziomy pod- powierzchniowe	p =	Skala macierzysta	p =
<b>C<sub>org</sub> (g·kg<sup>-1</sup>)</b>						
<b>I-A, I-B</b>	<b>10,8</b>		<b>3,91</b>		<b>1,55</b>	
II-A1, II-A2, II-B	8,97	0,56	3,22	0,39	1,56	0,98
III-A, III-B	8,95	0,65	2,32	0,08	1,20	0,66
IV-A, IV-B	9,90	0,85	2,84	0,26	1,23	0,49
<b>OCD (kg·m<sup>-2</sup>)</b>						
<b>I-A, I-B</b>	<b>3,73</b>		<b>1,98</b>		<b>0,85</b>	
II-A1, II-A2, IIB	3,85	0,92	1,67	0,63	1,19	0,61
III-A, III-B	3,91	0,90	1,06	0,20	1,11	0,80
IV-A, IV-B	4,39	0,64	1,47	0,47	0,69	0,78
<b>ρ<sub>o</sub> (Mg·m<sup>-3</sup>)</b>						
<b>I-A, I-B</b>	<b>1,52</b>		<b>1,75</b>		<b>1,89</b>	
II-A1, II-A2, II-B	1,61	0,22	1,75	0,97	1,80	0,31
III-A, III-B	1,56	0,29	1,77	0,77	1,89	0,70
IV-A, IV-B	1,60	0,053	1,75	0,97	1,85	0,38
<b>ρ<sub>w</sub> (Mg·m<sup>-3</sup>)</b>						
<b>I-A, I-B</b>	<b>2,59</b>		<b>2,61</b>		<b>2,62</b>	
II-A1, II-A2, II-B	2,60	0,82	2,61	0,38	2,63	0,58
III-A, III-B	2,55	0,18	2,61	0,79	2,63	0,80
IV-A, IV-B	2,61	0,35	2,62	0,57	2,62	0,97
<b>Porowatość m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup></b>						
<b>I-A, I-B</b>	<b>0,41</b>		<b>0,33</b>		<b>0,27</b>	
II-A1, II-A2, II-B	0,38	0,16	0,32	0,84	0,31	0,28
III-A, III-B	0,39	0,18	0,33	0,88	0,28	0,29
IV-A, IV-B	0,39	0,18	0,32	0,83	0,30	0,34
<b>pH w 1M KCl</b>						
<b>I-A, I-B</b>	<b>5,96</b>		<b>5,76</b>		<b>6,23</b>	
II-A1, II-A2, II-B	5,21	0,38	5,44	0,49	5,95	0,79
III-A, III-B	4,75	0,24	5,62	0,80	6,58	0,65
IV-A, IV-B	4,44	0,12	4,15	<b>0,003</b>	5,93	0,81

C<sub>org</sub> – zawartość węgla organicznego; ρ<sub>o</sub> – gęstość objętościowa; ρ<sub>w</sub> – gęstość właściwa (Mg·m<sup>-3</sup>); OCD – zapas węgla organicznego

Wartość  $\rho_w$  gleb mieściła się w przedziale od 2,55 do 2,63  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  i była typowa dla gleb mineralnych (Tab. 6). Poziomy podpowierzchniowe gleb w sadach obu lokalizacji charakteryzowały się zbliżoną średnią wartością  $\rho_w$  wynoszącą 2,61  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Średnia wartość  $\rho_o$  w poziomie próchnicznym gleb użytkowanych sadowniczo 2-3 lata (I-A, I-B) była najniższa i wynosiła 1,52  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  oraz wzrastała w głąb profilu (Tab. 8). W poziomach podpowierzchniowych średnia wartość  $\rho_o$  wynosiła 1,75  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  i 1,89  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  w materiale glebowym skały macierzystej (Tab. 8). Najwyższe średnie wartości  $\rho_o$  odnotowano w skale macierzystej badanych gleb (od 1,80  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  do 1,89  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) bez względu na okres ich sadowniczego użytkowania. Poziomy podpowierzchniowe i skały macierzystej gleb w sadach regionu B miały wyższą średnią wartość  $\rho_o$  (Tab. 7), co wiązać należy z wyższą zawartością frakcji iłowej w poziomach Bt w porównaniu z glebami w sadach regionu A. Natomiast średnia wartość  $\rho_o$  była niższa w poziomie próchnicznym gleb regionu B, ponieważ zawierały one istotnie wyższą zawartość Corg. Odzwierciedleniem nadmiernej zwięzłości były bardzo niskie wartości porowatości ogólnej, które wahały w skale macierzystej od 0,27 do 0,31  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ . Średnia wielkość porowatości ogólnej w poziomie próchnicznym gleb w sadach regionu B była wyższa (Tab. 7), na co wpłynęła istotnie wyższa zawartość Corg. Ilość i wielkość przestworów glebowych zależą od obecności struktur agregatowych oraz gęstości upakowania PD. Badane gleby charakteryzowały się relatywnie wysokimi wartościami PD, dochodzącymi w poziomie Bt od 1,75 do 1,95  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Tab. 6). Zawartość Corg była najwyższa w poziomie próchnicznym gleb każdego z sadów i zmniejszała się w głąb profilu glebowego bez względu na okres użytkowania. Najwyższą zawartość Corg oraz jego OCD odnotowano w poziomie próchnicznym najstarszych sadów (IV-A, IV-B), odpowiednio 9,90  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  oraz 3,73  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . W poziomach podpowierzchniowych gleb najwyższą średnią zawartość węgla organicznego oraz wartość OCD, które wynosiły 3,91  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  oraz 1,98  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  stwierdzono w glebie najmłodszych sadów (I-A, I-B), (Tab. 8). Zastosowanie pasów herbicydowych spowodowało, że w warstwie powierzchniowej badanych sadów jabłoniowych po kilkunastu latach ich sadowniczego użytkowania zmniejszyła się zawartość Corg, jednakże nie była to statystycznie istotna różnica (Tab. 8). W poziomie próchnicznym gleb najstarszych sadów odnotowano najwyższą zawartość OCD, co wiązać należy z wyższą wartością  $\rho_o$  oraz większą miąższością poziomu próchnicznego. Wielkość porowatości ogólnej zmniejszała się w profilu glebowym wraz z głębokością bez względu na okres sadowniczego użytkowania. Odnotowano, iż okres użytkowania tych gleb powodował zmniejszenie wielkości porowatości ogólnej w poziomie próchnicznym. Średnia wartość pH oznaczonego w roztworze 1 M KCl uległa obniżeniu w glebie poziomu próchnicznego w trakcie sadowniczego użytkowania z pH 5,96 w glebie najmłodszych sadów do pH 4,44 w sadach najstarszych. Jedynie w skale macierzystej gleb III-A i IV-A wartość pH była wyższa od 7,0.

Tabela 9. Właściwości sorpcyjne gleb

Nr	Wiek sadu	Budowa profilu	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Hh	(TEB)	CEC	(V)
			cmol(+)·kg <sup>-1</sup>							
I-A	2	A	9,15	0,83	1,28	0,42	1,2	11,68	12,88	90,7
		AE	5,35	0,49	0,53	0,45	1,2	6,82	8,02	85,0
		Et	6,11	0,47	0,52	0,21	1,2	7,31	8,51	85,9
		Bt	6,35	0,40	0,41	0,30	0,8	7,46	8,26	90,3
		C	11,49	0,23	0,31	0,31	1,2	12,34	13,54	91,1
II-A1	9	A	5,99	0,61	0,42	0,10	1,2	7,12	8,32	85,6
		Bt	7,01	0,25	1,14	0,18	1,6	8,68	10,18	85,3
		C1	9,33	0,19	0,91	0,29	1,2	10,72	11,92	89,9
		C2	12,40	0,20	1,02	0,22	1,2	13,84	15,04	92,0
II-A2	12	A	4,16	0,48	0,8	0,58	2,8	6,02	8,82	68,3
		Bt	6,42	0,24	0,44	0,39	1,6	7,49	9,09	82,4
		C1	10,87	0,10	0,36	0,10	1,2	11,43	12,63	90,5
		C2	11,73	0,27	1,32	0,42	1,6	13,74	15,34	89,6
III-A	19	A	3,68	0,36	0,30	0,10	2,0	4,44	6,44	68,9
		Et	1,98	0,14	0,25	0,18	1,2	2,55	3,75	68,0
		Bt	9,80	0,33	0,92	0,13	1,2	11,18	12,38	90,3
		C	12,79	0,31	1,39	0,13	0,8	14,62	15,42	94,8
IV-A	30	A	3,00	0,35	0,31	0,13	2,8	3,79	6,59	57,5
		Et	1,80	0,28	0,33	0,16	2,4	2,57	4,97	51,7
		Bt	5,25	0,46	1,77	0,18	2,8	7,66	10,46	73,2
		C1	8,80	0,28	0,91	0,32	1,6	10,31	11,91	86,6
		C2	12,57	0,28	0,61	0,16	0,8	13,62	14,42	94,5
I-B	3	A	8,94	1,10	0,28	0,27	2,0	10,59	12,59	84,1
		Et	4,87	0,23	0,29	0,13	3,2	5,52	8,72	63,3
		EB	4,31	0,48	0,57	0,33	1,9	5,69	7,59	75,0
		Bt	5,61	0,84	0,81	0,41	1,7	7,67	9,37	81,9
		C	11,44	0,73	0,87	0,47	0,9	13,51	14,41	93,8
II-B	9	A	4,37	1,87	0,5	0,42	1,4	7,16	8,56	83,6
		Et	4,13	0,75	0,41	0,38	1,4	5,67	7,07	80,2
		E/B	4,61	0,8	0,64	0,41	1,0	6,46	7,46	86,6
		Bt	5,05	0,62	0,35	0,3	1,2	6,32	7,52	84,0
		C	10,3	0,74	0,45	0,35	1,0	11,84	12,84	92,2
III-B	19	A	3,32	1,32	0,55	0,32	3,5	5,51	9,01	61,2
		Et	3,82	0,91	0,23	0,2	3,0	5,16	8,16	63,2
		Bt1	4,27	1,41	0,32	0,41	2,1	6,41	8,51	75,3
		Bt2	4,91	0,94	0,56	0,32	1,7	6,73	8,43	79,8
		C	9,89	1,01	0,44	0,3	1,7	11,64	13,34	87,3
IV-B	27	A	3,18	1,71	0,52	0,21	4,3	5,62	9,92	56,7
		Et	3,02	0,51	0,71	0,29	3,7	4,53	8,23	55,0
		Bt1	3,73	0,64	0,6	0,33	3,2	5,30	8,50	62,4
		Bt2	3,63	0,71	0,42	0,25	3,3	5,01	8,31	60,3
		C	9,36	0,88	0,31	0,15	2,2	10,7	12,9	82,9

Hh – kwasowość hydrolityczna; TEB – suma zasadowych kationów; CEC – kationowa pojemność wymienna; (V) – stopień wysycenia zasadami

Tabela 10. Procentowy udział kationów w CEC

Nr	Wiek sadu	Budowa profilu	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Hh	Na+
			w CEC				
I-A	2	A	71,04	6,44	9,94	9,32	3,26
		AE	66,71	6,11	6,61	14,96	5,61
		Et	71,80	5,52	6,11	14,10	2,47
		Bt	76,88	4,84	4,96	9,69	3,63
		C	84,86	1,70	2,29	8,86	2,29
II-A1	9	A	72,00	7,33	5,05	14,42	1,20
		Bt	68,86	2,46	11,20	15,72	1,77
		C1	78,27	1,59	7,63	10,07	2,43
		C2	82,45	1,33	6,78	7,98	1,46
II-A2	12	A	47,17	5,44	9,07	31,75	6,58
		Bt	70,63	2,64	4,84	17,60	4,29
		C1	86,06	0,79	2,85	9,50	0,79
		C2	76,47	1,76	8,60	10,43	2,74
III-A	19	A	57,14	5,59	4,66	31,06	1,55
		Et	52,80	3,73	6,67	32,00	4,80
		Bt	79,16	2,67	7,43	9,69	1,05
		C	82,94	2,01	9,01	5,19	0,84
IV-A	30	A	45,52	5,31	4,70	42,49	1,97
		Et	36,22	5,63	6,64	48,29	3,22
		Bt	50,19	4,40	16,92	26,77	1,72
		C1	73,89	2,35	7,64	13,43	2,69
		C2	87,17	1,94	4,23	5,55	1,11
I-B	3	A	71,01	8,74	2,22	15,89	2,14
		Et	55,85	2,64	3,33	36,70	1,49
		EB	56,79	6,32	7,51	25,03	4,35
		Bt	59,87	8,96	8,64	18,14	4,38
		C	79,39	5,07	6,04	6,25	3,26
II-B	9	A	51,05	21,85	5,84	16,36	4,91
		Et	58,42	10,61	5,80	19,80	5,37
		E/B	61,80	10,72	8,58	13,40	5,50
		Bt	67,15	8,24	4,65	15,96	3,99
		C	80,22	5,76	3,50	7,79	2,73
III-B	19	A	36,85	14,65	6,10	38,85	3,55
		Et	46,81	11,15	2,82	36,76	2,45
		Bt1	50,18	16,57	3,76	24,68	4,82
		Bt2	58,24	11,15	6,64	20,17	3,80
		C	74,14	7,57	3,30	12,74	2,25
IV-B	27	A	32,06	17,24	5,24	43,35	2,12
		Et	36,70	6,20	8,63	44,96	3,52
		Bt1	43,88	7,53	7,06	37,65	3,88
		Bt2	43,68	8,54	5,05	39,71	3,01
		C	72,56	6,82	2,40	17,05	1,16

– optymalny udział w CEC (kationowa pojemność wymienna), \* – Hoskins (1997),

Poziomy solum w glebie najstarszych sadów wykazywały niższy od oczekiwanego procentowy udział  $\text{Ca}^{2+}$  w CEC i dotyczy to zwłaszcza sadów regionu B (Tab. 10). Kompleks sorpcyjny gleb w poziomie próchnicznym sadów regionu oraz materiał glebowy w profilach regionu B z wyjątkiem poziomu Et w sadzie I-B wysycony był powyżej 5% kationami potasu. Najwyższy procentowy udział  $\text{K}^+$  w CEC odnotowano w poziomie próchnicznym sadu II-B. Gleba prawie wszystkich poziomów genetycznych charakteryzowała się niższym od optymalnego procentowego udziału  $\text{Mg}^{2+}$  w CEC.

Wartości kwasowości hydrolitycznej wahały od 0,8 do 4,3  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  (Tab. 9). Gleba w poziomie próchnicznym, poziomach podpowierzchniowych oraz skale macierzystej gleb użytkowanych 27-30 lat wykazywała najwyższą średnią wartość Hh. W materiale glebowym skały macierzystej badanych profili odnotowano natomiast najniższą wartość Hh. W trakcie sadowniczego użytkowania gleba w poziomie próchnicznym uległa zakwaszeniu, na co wskazują średnie wartości Hh, które wynosiły 1,60  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  w sadach I-A oraz I-B oraz 3,55  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  w sadach IV-A i IV-B (Tab. 11). Suma zasadowych kationów wymiennych w poziomie próchnicznym gleb użytkowanych 2-3 lata wynosiła średnio 11,13  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ , natomiast w glebie sadów użytkowanych 9-12 lat średnia zawartość TEB uległa istotnemu zmniejszeniu ( $p = 0,008$ ) i wynosiła 6,77  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  oraz 4,97  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $p = 0,015$ ) w glebie sadów III-A i III-B do 4,71  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $p = 0,27$ ) w sadach IV-A i IV-B.

Tabela 11. Właściwości sorpcyjne gleb oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)

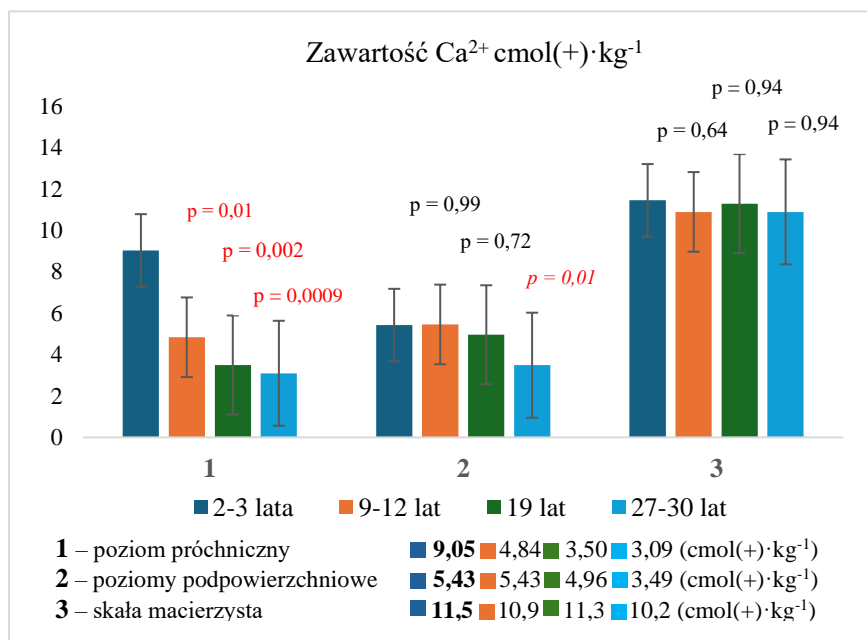
Profil	Wiek sadu	Hh	$p =$	TEB	$p =$	CEC	$p =$	(V) %	$p =$
Poziom próchniczny	<b>I-A, I-B</b>	<b>1,60</b>	-	<b>11,13</b>	-	<b>12,73</b>	-	<b>87,4</b>	-
	II-A1, II-A2 II-B	1,80	0,81	6,77	0,008	8,57	0,0007	79,17	0,39
	III-A, III-B	2,75	0,31	4,97	0,015	7,72	0,061	65,05	0,048
	IV-A, IV-B	3,55	0,14	4,71	0,027	8,25	0,11	57,1	0,012
Poziomy podpow.	<b>I-A, I-B</b>	<b>1,67</b>	-	<b>6,75</b>	-	<b>8,41</b>	-	<b>80,23</b>	-
	II-A1, II-A2 II-B	1,36	0,48	6,92	0,79	8,28	0,85	83,52	0,50
	III-A, II-B	1,84	0,74	6,41	0,81	8,25	0,90	75,32	0,46
	IV-A, IV-B	3,08	0,01	5,01	0,08	8,09	0,73	60,52	0,008
Skała macierzysta	<b>I-A i I-B</b>	<b>1,05</b>	-	<b>12,92</b>	-	<b>13,97</b>	-	<b>92,45</b>	-
	II-A1, II-A2 II-B	1,22	0,58	4,97	0,011	13,55	0,78	90,84	0,529
	III-A, III-B	1,25	0,71	13,13	0,91	14,38	0,75	91,05	0,76
	IV-A, IV-B	1,53	0,47	11,54	0,44	13,08	0,47	88,0	0,44

Hh – kwasowość hydrolityczna; TEB – suma zasadowych kationów; CEC – kationowa pojemność wymienna; (V) – stopień wysycenia zasadami

Materiał glebowy charakteryzował się najniższymi średnimi wartościami stopnia wysycenia zasadami (V) w profilach gleb po 27-30 latach sadowniczego użytkowania zarówno w poziomie próchnicznym (57,1%), poziomach podpowierzchniowych (60,52%) oraz skale macierzystej (88,0%). W glebie poziomu próchnicznego sadów jabłoniowych po 9-12 latach użytkowania średnia wartość CEC uległa istotnemu zmniejszeniu ( $8,57 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $p = 0,0007$ ) w porównaniu z wartością CEC w glebie sadów najkrócej użytkowanych ( $12,73 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

W sumie zasadowych kationów wymiennych dominował wapń, którego zawartość wahała się od  $1,8 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  w glebie poziomu Et profilu IV-A do  $12,79 \cdot \text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$  w skale macierzystej profilu III-A (Tab. 9). Materiał glebowy w skale macierzystej wszystkich badanych profili był zasobny w wymienne kationy wapnia, natomiast najniższą ich zawartość odnotowano w poziomach eluwalnych, co tłumaczyć należy przebiegiem procesu *lessivage*, w pedogenezie gleb płowych. Relatywnie wysoką zawartość kationów wymiennych wapnia w skale macierzystej profili III-A oraz IV-A tłumaczyć należy zawartością  $\text{CaCO}_3$ . Zawartość kationów wymiennych wapnia w glebie poziomu próchnicznego uległa zmniejszeniu się w trakcie sadowniczego użytkowania. Istotnie niższą średnią zawartość kationów wapnia odnotowano w glebie sadów użytkowanych 9-12 lat ( $p = 0,01$ ) oraz 19 lat ( $p = 0,002$ ) i 27-30 lat ( $p = 0,0009$ ) w porównaniu z ich zawartością w glebie sadów 2-3 letnich (Rys. 5). Średnia zawartość  $\text{Ca}^{2+}$  w glebie poziomu próchnicznego wynosiła na początku sadowniczego użytkowania  $9,05 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  i ulegała istotnemu zmniejszeniu, ponieważ w sadach II-A1, II-A2 i II-B wynosiła  $4,84 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ ; w sadach III-A i III-B –  $3,50 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ ; w sadach IV-A i IV-B –  $3,09 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ . W glebie poziomów podpowierzchniowych odnotowano niższą koncentrację kationów wymiennych wapnia, aniżeli w glebie poziomu próchnicznego.

W glebie sadów użytkowanych 27-30 lat średnia zawartość kationów  $\text{Ca}^{2+}$  była istotnie niższa ( $3,49 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $p = 0,01$ ) w porównaniu z ich zawartością w glebie sadów najmłodszych ( $5,43 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ ). W skale macierzystej gleb sadów jabłoniowych nie stwierdzono istotnego zróżnicowania zawartości kationów wymiennych wapnia w zależności od okresu użytkowania (Rys. 5). Stwierdzono wyższe zawartości kationów wapnia w profilach gleb o krótszym okresie sadowniczego użytkowania zarówno w poziomie próchnicznym, poziomach podpowierzchniowych oraz skale macierzystej.

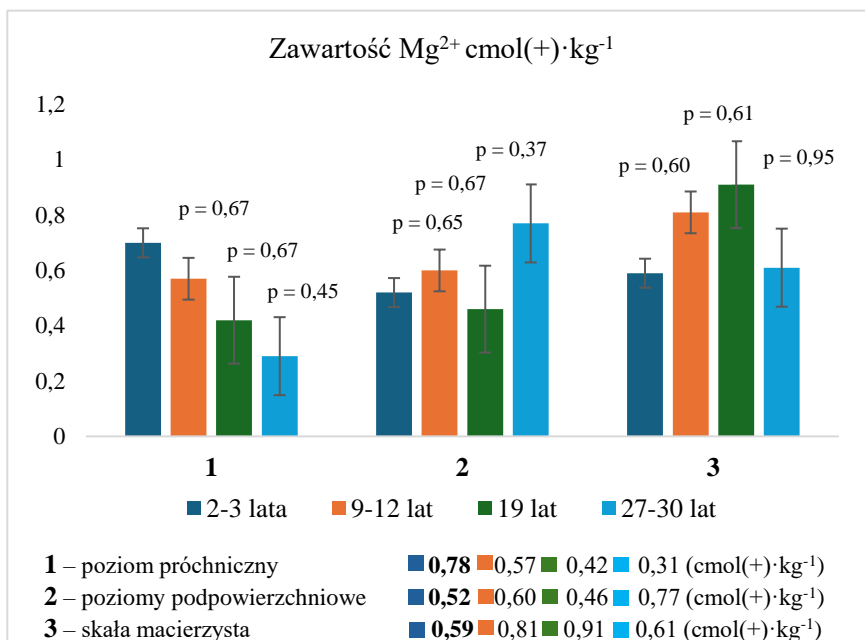


Rysunek 5. Koncentracja kationów wapnia, zawartość średnia oraz błąd standardowy, wartość poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)

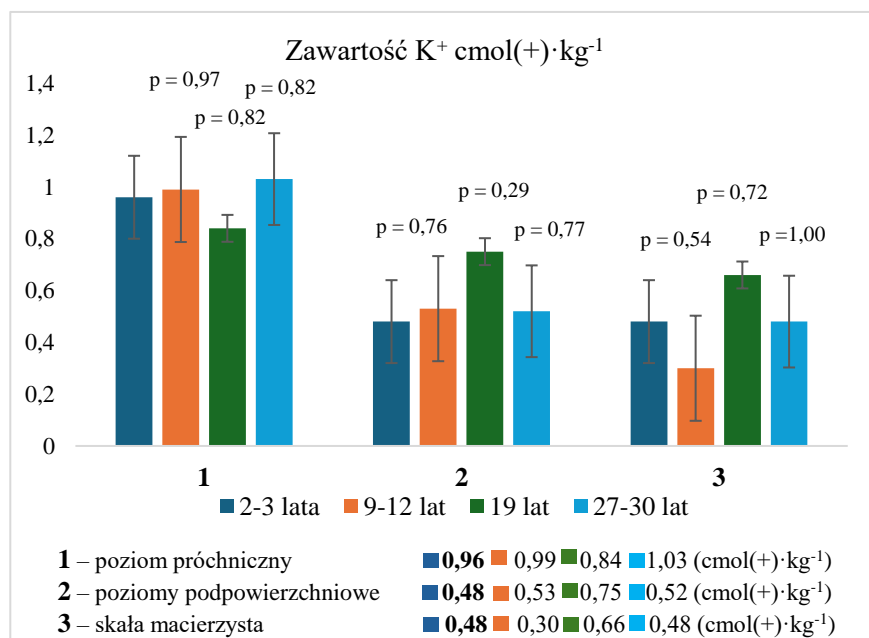
Zmniejszyła się średnia koncentracja kationów wymiennych magnezu w glebie poziomu próchnicznego w trakcie sadowniczego użytkowania z  $0,78 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  do  $0,31 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  w glebie najstarszych sadów (Rys. 6). Okres sadowniczego użytkowania badanych gleb nie determinował koncentracji  $\text{Mg}^{2+}$  w poziomach podpowierzchniowych oraz skale macierzystej. Najwyższą średnią zawartość kationów wymiennych magnezu stwierdzono w skale macierzystej gleb użytkowanych sadowniczo przez okres 19 lat.

Najwyższą koncentrację kationów wymiennych potasu odnotowano w glebie poziomu próchnicznego sadów jabłoniowych każdej kategorii wiekowej (Rys. 7). W glebie sadów użytkowanych sadowniczo 19 lat w porównaniu z sadami użytkowanymi 2-3 lata zawartość ta była wyższa w poziomie podpowierzchniowym oraz skale macierzystej. Najniższą średnią zawartość  $\text{K}^+$  ( $0,30 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ ) odnotowano w skale macierzystej gleb użytkowanych sadowniczo 9-12 lat.

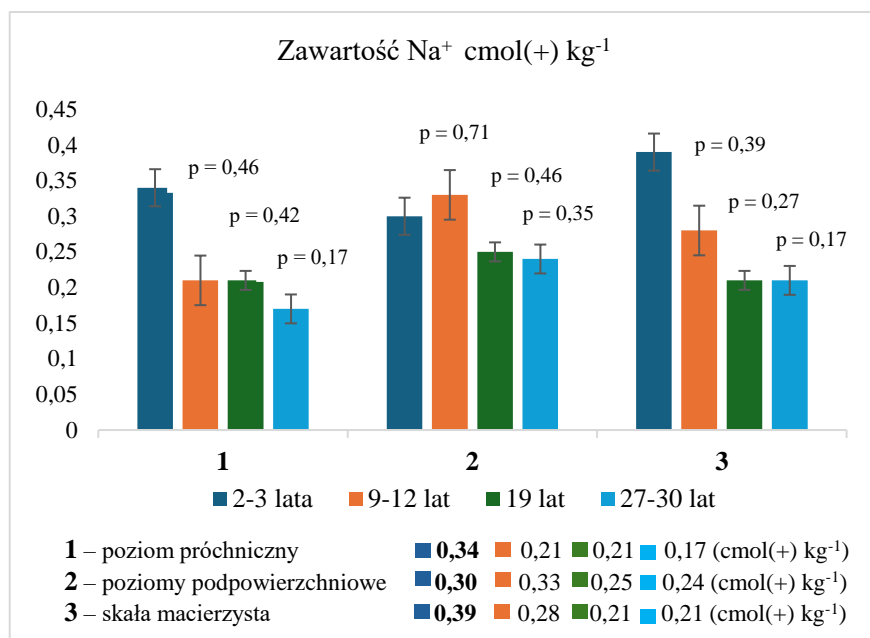




Rysunek 6. Koncentracja kationów magnezu, zawartość średnia oraz błąd standardowy, wartość poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)



Rysunek 7. Koncentracja kationów potasu, zawartość średnia oraz błąd standardowy, wartość poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)



Rysunek 8. Koncentracja kationów sodu, zawartość średnia oraz odchylenie standardowe wartość poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)

Średnia zawartość kationów wymiennych sodu była najwyższa w glebie poziomu próchniczego i skały macierzystej sadów najmłodszych, natomiast najniższa w glebie sadów najstarszych (Rys. 8). Nie były to jednak statystycznie istotne różnice. Jedynie w poziomach podpowierzchniowych średnia zawartość kationów wymiennych sodu (0,33 cmol(+)·kg<sup>-1</sup>) w glebie sadów użytkowanych 9-12 lat była wyższa w porównaniu z ich zawartością w glebie sadów użytkowanych 2-3 lata (0,30 cmol(+)·kg<sup>-1</sup>). Nie były to różnice istotne statystycznie.

Tabela 12. Koncentracja kationów wymiennych (zawartości średnie) w warstwie solum oraz skałe macierzystej, wartość poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)

Budowa profili	Wiek sadu w latach	Ca <sup>2+</sup>	p =	K <sup>+</sup>	p =	Mg <sup>2+</sup>	p =	Na <sup>+</sup>	p =
Poziomy solum	<b>I-A, I-B</b>	<u>6,34</u>		<u>0,60</u>		<u>0,59</u>		<u>0,31</u>	
	II-A1, II-A2, II-B	5,23	0,16	0,70	0,65	0,59	0,99	0,34	0,66
	III-A, III-B	4,54	0,14	0,77	0,45	0,45	0,39	0,24	0,22
	IV-A, IV-B	3,37	<b>0,003</b>	0,67	0,78	0,67	0,73	0,22	0,09
Skała macierzysta	<b>I-A, I-B</b>	<u>10,89</u>		<u>0,48</u>		<u>0,38</u>		<u>0,39</u>	
	II-A1, II-A2, II-B	10,93	0,98	0,30	0,54	0,81	0,29	0,28	0,39
	III-A, III-B	11,34	0,80	0,66	0,72	0,91	0,38	0,21	0,27
	IV-A, IV-B	10,24	0,73	0,48	1,00	0,61	0,43	0,21	0,17

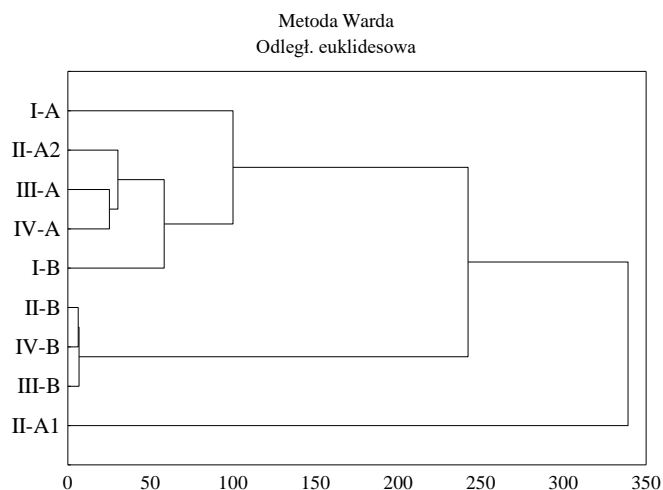
Porównując koncentrację kationów wymiennych w warstwie solum gleby (poziom próchniczny, poziomy podpowierzchniowe) w zależności od okresu sadowniczego użytkowania stwierdzono istotnie niższą zawartość  $\text{Ca}^{2+}$  w glebie najstarszych sadów jabłoniowych IV-A i IV-B (Tab. 12). wskazuje to na zużycie w kationy wymienne wapnia warstwy powierzchniowej gleb, w której znajduje się większość systemu korzeniowego drzew jabłoni.

Tabela 13. Wyniki analizy korelacji prostej Pearsona ( $p < 0,05$ )

Parametry (n=42)	$\text{K}^+$	% $\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	Corg	Hh	pH	$\rho_o$	CEC
fr. <0,002 mm	0,21	0,17		0,32*				0,51*	0,11
fr. <0,02 mm	0,26		0,20	0,29					
$\text{Ca}^{2+}$			0,39*		-0,38*	-0,59*	0,65*		0,94*
$\text{K}^+$					0,65*	0,33*			
$\text{Na}^+$	0,32*								
Corg		0,63				0,42*		-0,77*	-0,23
% $\text{Ca}^{2+}$	-0,42	-0,59*			-0,46	-0,83*	0,78*		0,70*
% $\text{K}^+$							-0,33*		-0,37
pH									0,46*

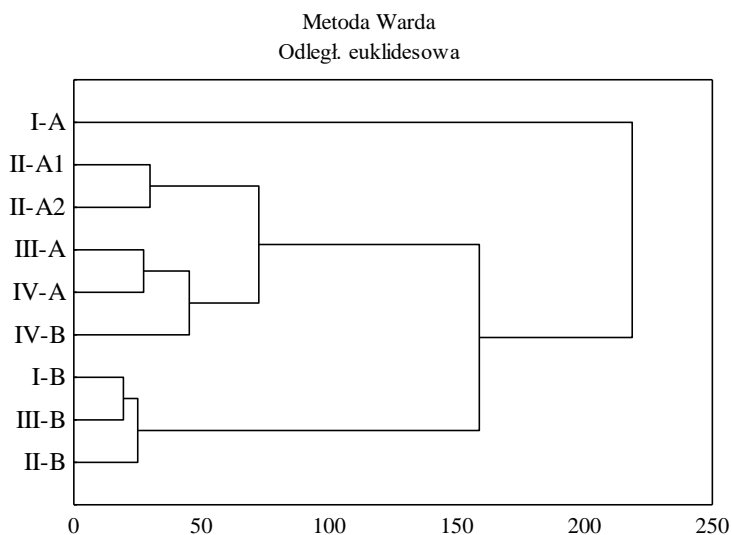
\* wartości istotne statystycznie dla  $p < 0,05$ , Hh – kwasowość hydrolityczna,  $\rho_o$  – gęstość objętościowa, CEC – kationowa pojemność wymienna

Stwierdzono istotnie ujemną korelację pomiędzy średnią zawartością  $\text{Ca}^{2+}$  a zawartością Corg ( $r = -0,38$ ) oraz kwasowością hydrolityczną (Tab. 13). Poziomy zasobne w Corg charakteryzowały się istotnie niższą zawartością  $\text{Ca}^{2+}$ . Odnotowano odwrotną zależność w odniesieniu do zawartości kationów potasu, których koncentracja była istotnie wyższa w glebie zasobnej w Corg ( $r = 0,65$ ). Próbkę zasobne we frakcje granulometryczne <0,02 mm zawierały wyższą zawartość kationów wymiennych potasu magnezu i sodu, aczkolwiek nie była to korelacja statystycznie istotna. Stwierdzono istotnie dodatnią korelację pomiędzy zawartością frakcji iłowej a zawartością kationów wymiennych sodu ( $r = 0,32$ ). Odnotowano synergizm pomiędzy zawartością kationów wymiennych potasu i sodu oraz wapnia i magnezu, co potwierdziły wyniki analizy korelacji. Próbkę gleb wykazujące wyższe wartości kwasowości hydrolitycznej zawierały istotnie wyższą zawartość  $\text{Na}^+$  ( $r = 0,33$ ) oraz Corg ( $r = 0,42$ ). Próbkę gleb o wyższej zawartości Corg charakteryzowały się istotnie wyższym procentowym udziałem  $\text{K}^+$  w CEC. Istotnie wyższe wartości CEC odnotowano w próbkach o wyższej wartości pH ( $r = 0,46$ ). Stwierdzono istotnie ujemną korelację pomiędzy procentowym udziałem kationów wapnia a potasu w kompleksie sorpcyjnym badanych gleb ( $r = -0,59$ ). Procentowa zawartość frakcji iłowej nie wpłynęła na wartość CEC. Odnotowano ujemną, aczkolwiek nieistotnie statystyczną korelację pomiędzy zawartością Corg a CEC.

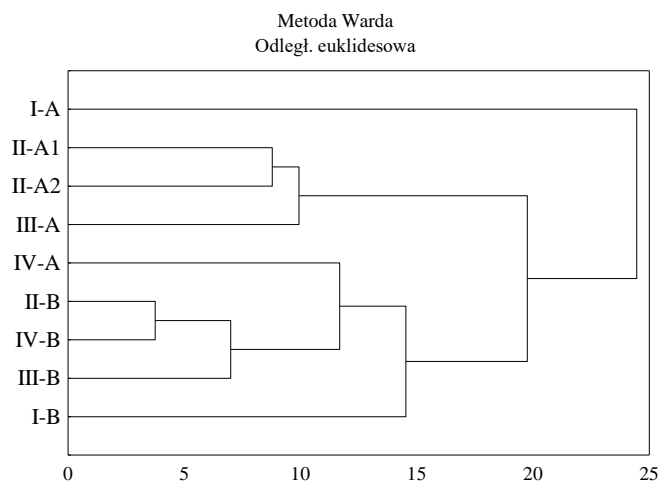


Rysunek 9. Analiza skupień, kationy  $\text{Ca}^{2+}$  oraz ich formy wodno-rozpuszczalne

Interpretując zawartość kationów wymiennych wapnia i potasu oraz ich form wodno-rozpuszczalnych odnotowano grupowanie poszczególnych sadów w zależności od okresu ich użytkowania (Rys. 9, 10). Stwierdzono grupowanie na sady starsze oraz o krótkim okresie użytkowania. Wyniki analizy skupień pozwoliły na wyróżnienie profilu II-A1 na tle pozostałych odnośnie do zawartości kationów wymiennych wapnia oraz I-A odnośnie do zawartości kationów wymiennych potasu.

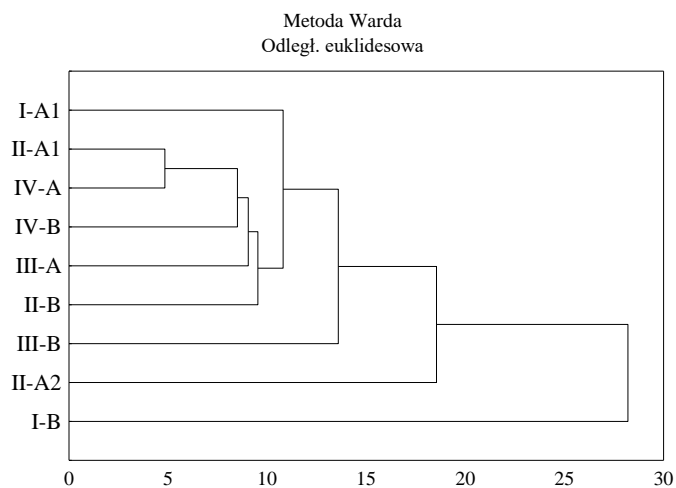


Rysunek 10. Analiza skupień, kationy  $\text{K}^+$  oraz ich formy wodno-rozpuszczalne



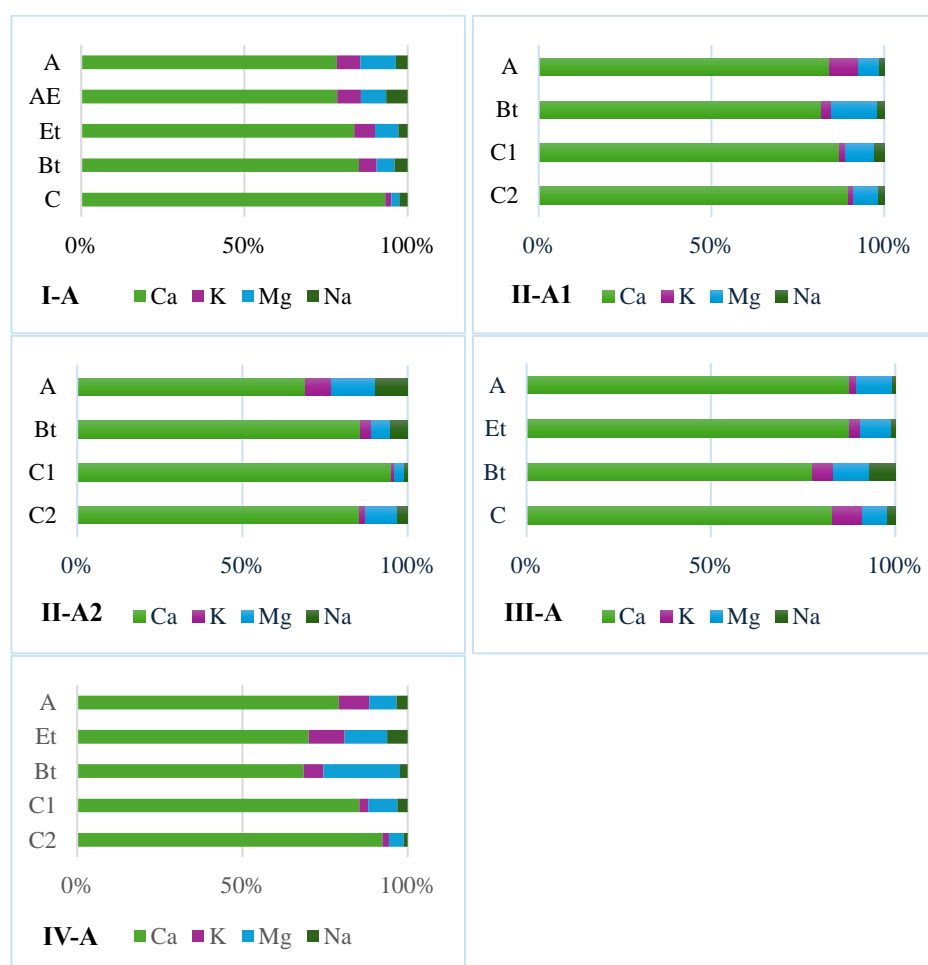
Rysunek 11. Analiza skupień, kationy  $Mg^{2+}$  oraz ich formy wodno-rozpuszczalne

Najbardziej zbliżoną zawartość kationów wymiennych i wodno-rozpuszczalnych magnezu stwierdzono w profilach sadów II-B i IV-B (Rys.11). Odnotowano grupowanie sadów II-A1, II-A2 i III-A. Na ich tle wyróżnia się gleba w sadzie I-A.



Rysunek 12. Analiza skupień, kationy  $Na^+$  oraz ich formy wodno-rozpuszczalne

Nie odnotowano wyraźnego grupowania poszczególnych sadów w odniesieniu do zawartości kationów wymiennych sodu oraz form wodno-rozpuszczalnych (Rys. 12). Kationy wapnia dominują w sumie zasadowych kationów wymiennych oznaczonych w próbkach gleb sadów obu lokalizacji (Rys. 13, 14). Stanowią one udział od 68,54% do 95,1% TEB w próbkach gleb pobranych z sadów regionu A oraz od 56,58% do 88,22% TEB w próbkach gleb w sadach regionu B. Stwierdzono, że średni udział  $\text{Ca}^{2+}$  w TEB w glebie sadów regionu A (83,02%) był istotnie wyższy ( $p = 0,003$ ) w porównaniu z udziałem tego kationu (74,54%) w TEB gleb w sadach regionu B (Tab. 14).

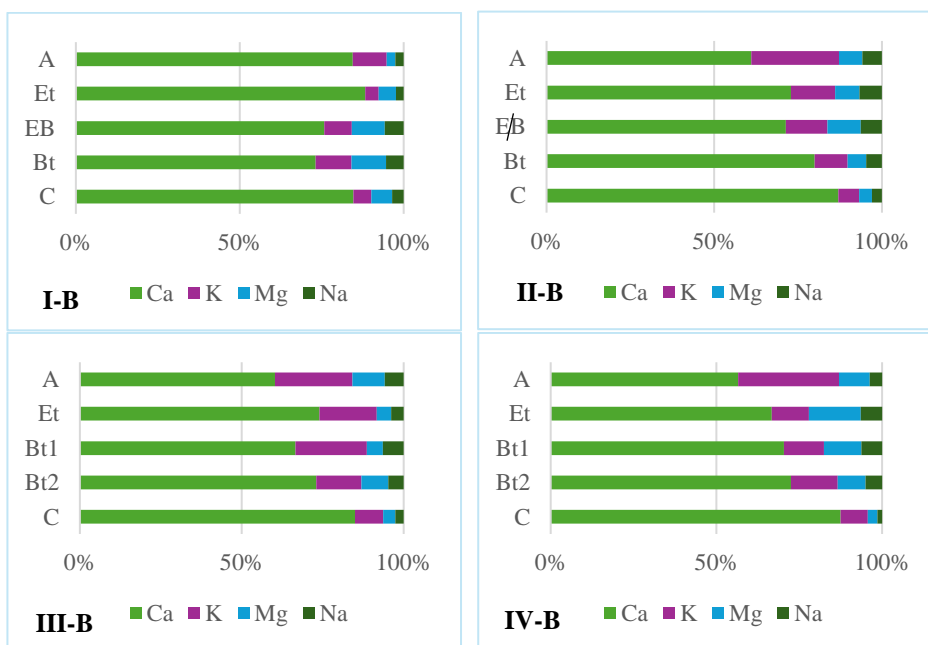


Rysunek 13. Procentowy udział kationów wymiennych Ca, K, Mg i Na w sumie zasadowych kationów wymiennych w profilach gleb sadów regionu A

Udział kationów wymiennych magnezu w TEB wynosił od 2,51% do 23,11% w glebach sadów regionu A oraz od 2,64% do 15,67% w glebach regionu B (Tab. 14). Nie odnotowano istotnego zróżnicowania, ponieważ średni procentowy udział kationów  $Mg^{2+}$  w TEB w glebie sadów regionu A wynosił 8,75%, natomiast 7,37% w glebach sadów regionu B ( $p = 0,27$ ). Średni procentowy udział kationów  $K^+$  w TEB gleb sadów regionu A wynosił 4,83% i był istotnie niższy ( $p = 0,0001$ ) w porównaniu z udziałem tego kationu (13,48%) w TEB gleb regionu B. Udział kationów  $Na^+$  w TEB gleb regionu A wynosił średnio 3,35% i 4,62% w glebach regionu B.

Tabela 14. Procentowy udział kationów wymiennych w TEB, poziom istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)

Region A				
	$Ca^{2+}$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Na^+$
Min.	68,54%	0,87%	2,51%	0,87%
Max.	95,1%	10,89%	23,11%	9,63%
średnia	83,02%	4,83%	8,75%	3,35%
Region B				
	$Ca^{2+}$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Na^+$
Min.	56,58%	4,17%	2,64%	1,40%
Max.	88,22%	30,43%	15,67%	6,70%
średnia	74,54%	13,48%	7,37%	4,62%
Poziom istotności	$p = 0,003$	$p = 0,0001$	$p = 0,27$	$p = 0,053$



Rysunek 14. Procentowy udział kationów wymiennych Ca, K, Mg i Na w sumie zasadowych kationów wymiennych w profilach gleb sadów regionu B

Średni procentowy udział kationów  $\text{Ca}^{2+}$  w TEB był istotnie wyższy w glebach regionu A (Tab. 14). Natomiast średni procentowy udział kationów  $\text{K}^+$  w TEB był istotnie wyższy w glebach regionu B.

Tabela 15. Skład chemiczny gleb w sadach

Nr	Wiek sadu	Budowa profilu	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O
			%			
I-A	2	A	2,02	0,44	0,46	0,32
		AE	2,14	0,35	0,36	0,50
		Et	3,21	0,32	0,53	0,31
		Bt	1,52	0,21	0,28	0,30
		C	1,69	0,34	0,36	0,62
II-A1	9	A	2,15	0,34	0,36	0,34
		Bt	1,94	1,26	0,46	0,36
		C1	2,46	0,34	0,76	0,39
		C2	2,23	1,47	0,66	0,36
II-A2	12	A	1,78	0,21	0,33	0,28
		Bt	1,68	0,13	0,22	0,70
		C1	1,44	0,08	0,20	0,88
		C2	2,09	0,25	0,58	0,36
III-A	19	A	1,90	0,46	0,41	0,39
		Et	1,91	0,34	0,30	0,54
		Bt	2,04	0,34	0,55	0,35
		C	2,36	1,47	0,76	0,68
IV-A	30	A	1,50	0,13	0,22	0,31
		Et	1,70	0,25	0,38	0,31
		Bt	2,46	0,25	0,63	0,31
		C1	1,64	1,68	0,76	0,47
		C2	3,52	5,33	1,21	0,35
I-B	3	A	1,50	0,43	0,38	0,52
		Et	1,53	0,31	0,50	0,56
		EB	1,91	0,48	0,93	0,56
		Bt	1,97	0,50	1,04	0,55
		C	1,76	0,69	0,99	0,69
II-B	9	A	1,52	0,38	0,40	0,56
		Et	1,58	0,39	0,43	0,61
		E/B	1,85	0,55	0,81	0,58
		Bt	1,86	0,57	0,88	0,51
		C	1,85	0,66	0,98	0,64
III-B	19	A	1,39	0,28	0,38	0,53
		Et	1,48	0,29	0,35	0,54
		Bt1	1,74	0,45	0,93	0,59
		Bt2	1,88	0,49	1,13	0,63
		C	1,59	0,91	0,86	0,52
IV-B	27	A	1,58	0,39	0,40	0,57
		Et	1,53	0,32	0,41	0,62
		Bt1	1,98	0,60	1,38	0,54
		Bt2	1,62	0,62	1,14	0,51
		C	1,97	0,92	1,24	0,93



Tabela 16. Średnie zawartości pierwiastków oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)

Profil	Wiek sadu	CaO %	$p =$	K <sub>2</sub> O %	$p =$	MgO %	$p =$	Na <sub>2</sub> O %	$p =$
Poziom próchniczny	<b>I-A, I-B</b>	<b>0,44</b>	-	<b>1,76</b>	-	<b>0,42</b>	-	<b>0,42</b>	-
	II-A1, II-A2, II-B	0,31	0,18	1,82	0,88	0,38	0,47	0,39	0,87
	III-A, III-B	0,37	0,54	1,64	0,78	0,35	0,92	0,46	0,77
	IV-A, IV-B	0,26	0,31	1,54	0,49	0,39	0,62	0,44	0,91
Poziomy podpow.	<b>I-A, I-B</b>	<b>0,36</b>	-	<b>2,04</b>	-	<b>0,61</b>	-	<b>0,46</b>	-
	II-A1, II-A2, I-B	0,58	0,27	1,78	0,40	0,56	0,81	0,55	0,29
	III-A, III-B	0,38	0,75	1,81	0,46	0,65	0,83	0,53	0,39
	IV-A, IV-B	0,41	0,63	1,86	0,58	0,79	0,46	0,46	0,95
Skała macierzysta	<b>I-A, I-B</b>	<b>0,51</b>	-	<b>1,72</b>	-	<b>0,41</b>	-	<b>0,65</b>	-
	II-A1, II-A2, II-B	0,56	0,93	2,01	0,44	0,38	0,90	0,53	0,56
	III-A, III-B	1,19	0,18	1,97	0,58	0,49	0,72	0,60	0,59
	IV-A, IV-B	2,64	0,35	2,38	0,48	0,65	0,33	0,58	0,79

Najwyższą całkowitą zawartość potasu oraz wapnia odnotowano w skale macierzystej profilu IV-A, odpowiednio: 3,52% K<sub>2</sub>O oraz 5,33% CaO (Tab. 15). W poziomie iluwalnym Bt1 profilu IV-B stwierdzono najwyższą zawartość MgO wynoszącą 1,38%. W tabeli 16 przedstawiono wyniki analizy wariancji na podstawie średnich całkowitych zawartości K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O w glebie poziomu próchnicznego w porównaniu z ich zawartością w glebie poziomów podpowierzchniowych oraz skale macierzystej. Średnie zawartości tych metali w glebach użytkowanych 2-3 lata porównano z ich średnią zawartością w glebach po dłuższym okresie sadowniczego użytkowania. Średnia zawartość CaO w glebie poziomu podpowierzchniowego gleb pod sadami jabłoniowymi najmłodszych sadów I-A i I-B wynosiła 0,36% i była nieco niższa w porównaniu ze średnią zawartością odnotowaną w glebie pod sadami dłużej użytkowanymi. Najniższą średnią zawartość CaO w poziomie próchnicznym odnotowano w glebach użytkowanych 27-30 lat. Nie były to jednak statystycznie istotne różnice, na co wskazują wartości poziomu istotności  $p = 0,18$  dla sadów II-A1, II-A2 i II-B oraz  $p = 0,54$  dla sadów III-A i III-B, a także  $p = 0,31$  dla sadów IV-A i IV-B (Tab. 16). Natomiast gleba poziomów podpowierzchniowych zawierała najniższą średnią zawartość CaO w profilach gleb pod sadami użytkowanymi 2-3 lata. Gleba w poziomach podpowierzchniowych starszych sadów zawierała wyższą średnią całkowitą zawartość wapnia w porównaniu z jego zawartością w sadach młodszych. Najbardziej zbliżoną średnią zawartością CaO w glebie skały macierzystej gleb użytkowanych 2-3 lata (0,36%) odnotowano w glebach użytkowanych sadowniczo 9-12 lat (0,38%,  $p = 0,75$ ). Natomiast skała macierzysta gleb pod sadami III-A i III-B oraz IV-A i IV-B wykazywała wyższą zawartość CaO w porównaniu z I-A i I-B, na co wpłynęła obecność CaCO<sub>3</sub> w materiale glebowym sadów starszych. Jest to prawdopodobnie efekt obecności minerałów kalcytu oraz dolomitu, ponieważ całkowita zawartość magnezu

w skale macierzystej profili IVA i IVB była wyższa (0,79%) w porównaniu z jego zawartością w glebie sadów I-A i I-B (0,41%), aczkolwiek była to różnica statystycznie nieistotna ( $p = 0,46$ ). Średnia całkowita zawartość potasu w glebie poziomu próchnicznego gleb w 2-3 roku od posadzenia drzew jabłoni była wyższa w porównaniu z jego średnią całkowitą zawartością w glebach użytkowanych 19 lat oraz 27-30 lat (Tab. 16). Gleba w poziomach podpowierzchniowych sadów najmłodszych charakteryzowała się także wyższą średnią całkowitą zawartością potasu (2,04%) w porównaniu z jego zawartością w sadach dłużej użytkowanych (odpowiednio  $K_2O$ : 1,78%, 1,81%, 1,86%). W warstwie solum gleby, który obejmuje poziom próchniczny oraz poziomy podpowierzchniowe sadów I-A i I-B odnotowano wyższą całkowitą zawartość potasu w porównaniu z jego zawartością w glebie starszych sadów. W wyniku sadowniczego użytkowania w glebie poziomu próchnicznego gleb pasów herbicydowych zmniejszyła się całkowita zawartość potasu. Najniższą średnią zawartość  $K_2O$  wynoszącą 1,54% odnotowano w glebie poziomu próchnicznego sadów użytkowanych 27-30 lat, jednocześnie w skale macierzystej tych samych gleb stwierdzono jego najwyższą całkowitą zawartość.

Tabela 17. Zawartość przyswajalnych dla roślin form fosforu, potasu i magnezu

Nr	Wiek sadu	Budowa profilu	mg·100g <sup>-1</sup>			Klasa zawartości		
			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Mg	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Mg
I-A	2	A	17,3	32,4	12,2	wysoka	b. wysoka	b. wysoka
		AE	7,8	22,5	4,5	niska	wysoka	niska
		Et	7,3	18,7	4,6	niska	średnia	niska
		Bt	7,4	15,2	3,6	niska	średnia	niska
		C	5,7	6,8	4,8	niska	b. niska	niska
II-A1	9	A	10,8	20,8	5,0	średnia	wysoka	niska
		Bt1	5,1	7,6	9,0	niska	b. niska	średnia
		C1	7,0	5,8	9,1	niska	b. niska	b. wysoka
		C2	6,1	7,4	12,2	niska	b. niska	b. wysoka
II-A2	12	A	10,1	13,7	7,8	średnia	średnia	wysoka
		Bt	13,0	8,8	5,0	średnia	niska	niska
		C1	9,2	2,0	1,8	niska	b. niska	b. niska
		C2	7,2	8,7	9,4	niska	b. niska	średnia
III-A	19	A	12,2	10,2	2,4	średnia	średnia	niska
		Et	3,8	3,7	3,1	b. niska	niska	średnia
		Bt	6,3	8,4	7,1	niska	b. niska	średnia
		C	7,0	7,3	11,0	niska	b. niska	wysoka
IV-A	30	A	6,6	11,5	1,0	niska	niska	b. niska
		Et	4,6	9,6	4,8	b. niska	niska	niska
		Bt	8,6	13,8	15,9	niska	niska	b. wysoka
		C1	8,4	4,4	8,3	niska	b. niska	wysoka
		C2	7,2	5,6	6,3	niska	b. niska	średnia
I-B	3	A	12,6	16,1	6,8	średnia	średnia	średnia
		Et	9,3	5,2	5	niska	b. niska	niska
		EB	6,1	7,0	5,9	niska	b. niska	niska
		Bt	5,4	5,7	5,3	niska	b. niska	niska
		C	3,8	9,7	5,9	b. niska	b. niska	niska

kontynuacja Tabeli 17								
II-B	9	A	14,1	23,6	5,7	średnia	wysoka	średnia
		Et	7,4	7,4	5,0	niska	b. niska	niska
		E/B	4,1	6,2	6,4	b. niska	b. niska	średnia
		Bt	5,2	8,0	6,7	niska	b. niska	średnia
		C	4,0	10,4	5,9	b. niska	niska	niska
III-B	19	A	13,3	17,7	5,0	średnia	średnia	niska
		Et	10,1	5,1	4,4	średnia	b. niska	niska
		Bt1	7,1	6,7	5,3	niska	b. niska	niska
		Bt2	5,7	8,8	6,0	niska	b. niska	niska
		C	3,1	9,5	4,9	b. niska	b. niska	niska
IV-B	27	A	17,9	38,3	6,3	wysoka	b. wysoka	średnia
		Et	8,7	18,4	4,4	niska	średnia	niska
		Bt1	5,2	6,6	5,5	niska	b. niska	niska
		Bt2	4,8	7,4	5,0	b. niska	b. niska	niska
		C	4,7	8,9	6,1	b. niska	b. niska	średnia

Zawartość przyswajalnych dla roślin form fosforu i potasu w glebie poziom próchniczego była wyższa w porównaniu z ich zawartością w poziomach podpowierzchniowych i skały macierzystej (Tab. 17). Ilości przyswajalnych dla roślin form fosforu i potasu w profilach gleb wahały się od bardzo wysokiej i wysokiej w poziomie próchnicznym do niskiej i bardzo niskiej w skałe macierzystej (Tab. 17). W materiale glebowym skały macierzystej w profilu II-A1 stwierdzono bardzo wysoką klasę zawartości magnezu przyswajalnego dla roślin. W glebie poziom próchniczego i poziomów podpowierzchniowych sadów najdłużej użytkowanych sadowniczo odnotowano zmniejszenie zawartości przyswajalnych dla roślin form fosforu w porównaniu z jego zawartością w glebie sadów I-A i I-B.

Tabela 18. Średnie zawartości przyswajalnych dla roślin form fosforu, potasu i magnezu ( $\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$ ) oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)

Profil	Wiek sadu	$\text{P}_2\text{O}_5$	$p =$	$\text{K}_2\text{O}$	$p =$	Mg	$p =$
Poziom próchniczny	<b>I-A, I-B</b>	<b>14,95</b>	-	<b>24,2</b>	-	<b>9,50</b>	-
	II-A1, II-A2	11,66	0,29	19,37	0,58	6,17	0,27
	II-B						
	III-A, III-B	12,75	0,46	13,9	0,40	3,70	0,19
	IV-A, IV-B	12,25	0,70	24,9	0,97	3,65	0,26
Poziomy podpow.	<b>I-A, I-B</b>	<b>7,22</b>	-	<b>12,38</b>	-	<b>4,82</b>	-
	II-A1, II-A2	6,96	0,88	7,60	0,21	6,42	0,07
	II-B						
	III-A, III-B	6,60	0,61	6,54	0,14	5,18	0,64
	IV-A, IV-B	6,38	0,46	11,17	0,71	7,12	0,30
Skała macierzysta	<b>I-A, I-B</b>	<b>4,75</b>	-	<b>8,25</b>	-	<b>5,35</b>	-
	II-A1, II-A2	6,70	0,33	6,56	0,66	7,68	0,54
	II-B						
	III-A, III-B	5,05	0,90	8,40	0,94	7,45	0,49
	IV-A, IV-B	6,77	0,33	6,30	0,45	6,90	0,25

Zawartość magnezu przyswajalnego dla roślin zmniejszała się w trakcie sadowniczego użytkowania gleb, jednakże nie były to różnice istotne statystycznie (Tab. 18). Najniższe średnie zawartości przyswajalnych dla roślin form fosforu, potasu w glebie stwierdzono w skale macierzystej, natomiast magnezu w poziomach podpowierzchniowych.

Średnia zawartość wodno-rozpuszczalnych form wapnia była najwyższa w glebie sadów najmłodszych, zarówno w poziomie próchnicznym, poziomach podpowierzchniowych, jak i skale macierzystej (Tab. 19). W glebie poziomu próchnicznego sadów użytkowanych 9-12 lat oraz poziomach podpowierzchniowych sadów użytkowanych 19 lat i 27-30 lat odnotowano istotnie niższą średnią zawartość  $Ca_w$  (odpowiednio:  $p = 0,049$  oraz  $p = 0,032$  i  $p = 0,039$ ) w porównaniu z ich koncentracją w sadach użytkowanych 2-3 lata (Tab. 19). Istotnie zmniejszyła się zawartość rozpuszczalnych w wodzie form wapnia w poziomach solum badanych gleb na skutek sadowniczego ich użytkowania. Gleba w skale macierzystej charakteryzowała się najwyższą zawartością  $Ca_w$  we wszystkich profilach, jednakże średnia zawartość wodno-rozpuszczalnych form wapnia uległa zmniejszeniu w glebie w trakcie sadowniczego użytkowania z  $109,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  w sadach I-A i I-B do  $38,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  w sadach III-A i III-B. Średnia zawartość  $Mg_w$  i  $K_w$  uległa zmniejszeniu w glebie poziomu próchnicznego i poziomów podpowierzchniowych w trakcie sadowniczego użytkowania.

Tabela 19. Zawartość kationów wodno-rozpuszczalnych w glebie

Nr	Wiek sadu	Budowa profilu	$Ca_w$	$Mg_w$	$K_w$	$Na_w$
			$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			
I-A	2	A	21,0	36,5	177	14,7
		AE	74,7	22,0	102	10,5
		Et	39,3	18,2	84,2	19,7
		Bt	119	19,1	47,2	8,33
		C	159	19,9	35,7	8,22
II-A1	9	A	9,40	8,53	114	4,24
		Bt	88,0	22,7	24,8	9,67
		C1	166	17,3	18,8	9,73
		C2	198	30,2	34,6	16,7
II-A2	12	A	5,02	13,4	92,9	29,9
		Bt	9,63	16,1	45,6	15,5
		C1	16,5	19,4	18,8	10,2
		C2	94,8	32,3	38,3	21,0
III-A	19	A	11,2	9,15	72,6	10,6
		Et	14,7	7,70	24,8	10,8
		Bt	24,1	18,4	59,8	16,0
		C	65,6	29,4	26,9	17,6
IV-A	30	A	5,00	4,25	81,4	8,19
		Et	31,1	8,43	46,1	11,1
		Bt	22,4	18,4	53,4	7,33
		C1	82,6	10,3	13,8	16,6
		C2	81,0	19,9	19,1	15,6

kontynuacja Tabeli 19						
I-B	3	A	37,6	20,6	22,5	7,63
		Et	29,2	12,3	21,3	33,3
		EB	22,5	5,7	24,4	10,9
		Bt	48,9	9,4	10,0	38,4
		C	59,0	11,9	7,7	46,2
II-B	9	A	2,31	7,58	40,8	12,4
		Et	1,32	7,08	36,5	11,7
		E/B	3,5	5,48	22,1	21,9
		Bt	9,12	5,64	6,51	24,8
		C	15,5	4,87	11,2	20,4
III-B	19	A	4,85	3,21	32,6	18,5
		Et	5,89	3,3	20,5	23,1
		Bt1	7,2	2,48	7,89	17,4
		Bt2	6,32	3,11	9,41	10,8
		C	10,9	4,89	7,32	23,4
IV-B	27	A	3,32	4,63	77,4	2,02
		Et	1,76	6,95	47,2	5,67
		Bt1	4,1	7,42	22,1	7,18
		Bt2	3,33	6,85	5,82	23,4
		C	4,71	9,2	24,4	47,5

Najniższą średnią zawartość form magnezu rozpuszczalnego w wodzie ( $4,44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) odnotowano w glebie poziomu próchnicznego sadu użytkowanego 27-30 lat (Tab. 20). Długość okresu sadowniczego użytkowania badanych gleb nie wpłynęła znacząco na zawartość  $K_w$  w materiale glebowym skały macierzystej, co potwierdzają wyniki analizy wariancji. Okres sadowniczego użytkowania nie wpłynął jednak w istotny sposób na zawartość  $Na_w$  w profilach badanych gleb (Tab. 20).

Tabela 20. Średnia zawartość kationów wodno-rozpuszczalnych oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)

Profil	Wiek sadu	$Ca_w$	$p =$	$Mg_w$	$p =$	$K_w$	$p =$	$Na_w$	$p =$
Poziomy próchniczny	<b>I-A, I-B</b>	<b>29,30</b>	-	<b>28,5</b>	-	<b>99,7</b>	-	<b>11,2</b>	-
	II-A1, II-A2	5,58	0,049	9,84	0,07	82,6	0,82	15,5	0,72
	II-B								
	III-A, III-B	8,02	0,14	6,18	0,12	52,6	0,61	14,5	0,59
	IV-A, IV-B	4,16	0,09	4,44	0,09	79,4	0,81	5,10	0,32
Poziomy podpow.	<b>I-A, I-B</b>	<b>55,6</b>	-	<b>14,45</b>	-	<b>48,1</b>	-	<b>20,2</b>	-
	II-A1, II-A2	22,31	0,18	11,40	0,51	27,1	0,29	16,7	0,61
	II-B								
	III-A, III-B	11,64	0,032	7,00	0,11	24,4	0,26	15,6	0,50
	IV-A, IV-B	12,54	0,039	9,61	0,22	34,9	0,51	10,9	0,21
Skała macierzysta	<b>I-A, I-B</b>	<b>109,0</b>	-	<b>15,90</b>	-	<b>21,7</b>	-	<b>27,2</b>	-
	II-A1, II-A2	98,2	0,90	20,81	0,65	24,3	0,85	15,6	0,41
	II-B								
	III-A, III-B	38,2	0,34	17,14	0,93	17,1	0,81	20,5	0,76
	IV-A, IV-B	81,8	0,64	13,13	0,67	19,1	0,84	26,6	0,98

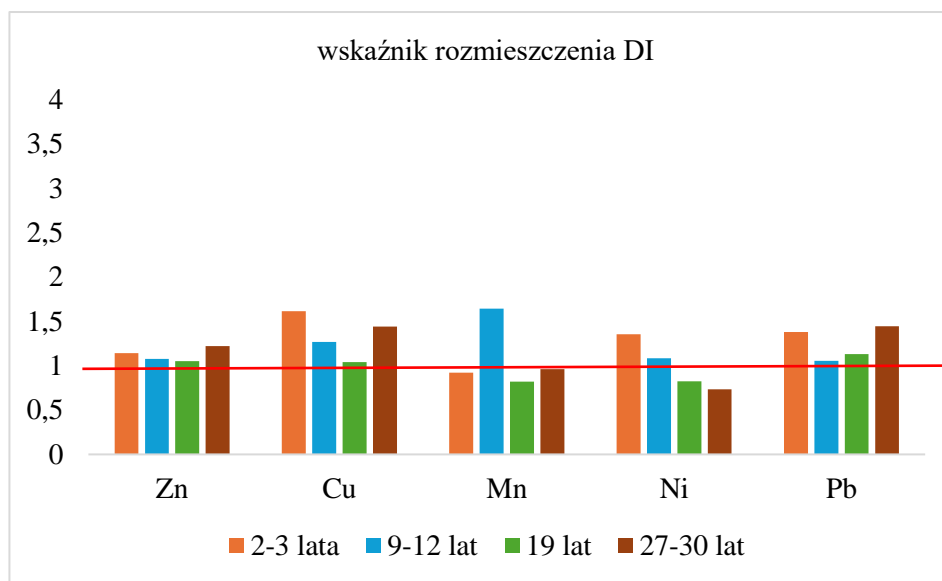
Tabela 21. Całkowita zawartość pierwiastków śladowych oraz żelaza w glebie

Nr	Wiek sadu	Budowa profilu	Zn <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>	Fe <sub>t</sub>
			mg·kg <sup>-1</sup>					
I-A	2	A	42,1	10,7	513	8,16	10,5	15,4
		AE	35,7	6,01	572	5,68	10,6	13,4
		Et	32,9	5,33	547	5,64	5,91	10,3
		Bt	33,4	5,75	586	6,04	9,49	26,8
		C	32,4	4,75	648	5,22	8,83	18,6
II-A1	9	A	38,5	12,2	238	14,4	12,5	16,9
		Bt	29,9	5,87	314	6,22	17,7	24,8
		C1	30,0	7,79	402	10,9	18,1	16,1
		C2	37,5	7,58	209	8,48	10,7	20,0
II-A2	12	A	43,2	10,7	463	7,23	8,67	8,46
		Bt	23,1	3,36	332	4,99	3,20	30,8
		C1	17,9	2,36	138	3,55	2,64	22,4
		C2	33,8	9,31	203	11,1	10,1	25,3
III-A	19	A	38,3	15,8	290	4,45	14,8	9,09
		Et	24,2	2,96	153	3,36	10,8	6,99
		Bt	32,2	7,45	581	10,2	20,4	33,3
		C	37,4	9,48	443	15,0	9,15	19,0
IV-A	30	A	36,0	9,05	218	3,86	11,1	8,32
		Et	34,2	6,23	270	7,45	15,2	9,86
		Bt	37,1	11,7	443	13,1	14,3	27,7
		C1	32,2	9,70	455	11,5	14,5	21,7
		C2	30,9	7,19	558	11,4	7,83	25,2
I-B	3	A	35,3	9,42	375	10,8	13,8	7,62
		Et	27,1	5,89	244	7,42	9,78	7,67
		EB	38,3	9,60	277	9,67	8,62	18,3
		Bt	39,9	11,3	258	10,0	9,70	22,6
		C	36,2	9,62	358	9,38	8,78	18,2
II-B	9	A	34,2	10,3	431	7,78	11,3	7,30
		Et	28,7	5,64	548	6,40	7,40	7,64
		E/B	33,5	8,67	205	8,42	9,38	19,4
		Bt	38,9	11,0	222	9,10	12,7	22,1
		C	37,3	9,91	285	8,67	10,0	17,6
III-B	19	A	41,7	17,5	328	12,3	11,8	7,41
		Et	24,4	5,29	397	7,78	8,10	9,10
		Bt1	41,3	11,5	332	10,4	8,32	18,6
		Bt2	47,2	12,5	336	9,19	11,0	20,4
		C	38,7	9,90	330	9,11	9,31	17,7
IV-B	27	A	48,4	17,7	465	11,2	14,1	8,29
		Et	31,3	5,42	474	5,78	7,90	8,12
		Bt1	50,9	13,1	336	7,20	9,33	19,8
		Bt2	39,2	12,3	268	9,71	9,67	18,6
		C	38,0	10,9	304	9,89	8,22	17,2

Najwyższą całkowitą zawartość cynku stwierdzono w glebie poziomym Bt1 w profilu IV-B, która wynosiła  $50,9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , natomiast najniższą ( $17,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) w poziomie C1 w profilu II-A2 (Tab. 21). W skale macierzystej tej gleby odnotowano także najniższą całkowitą zawartość miedzi ( $2,36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

Gleba w poziomie eluwialnym profili gleb regionu B wykazywała zubożenie w  $\text{Cu}_t$ . Najwyższą całkowitą zawartość miedzi ( $17,7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) odnotowano w glebie poziomym próchnicznego w profilu IV-B. Najwyższą całkowitą zawartością  $\text{Mn}_t$   $648 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  charakteryzowała się gleba w skale macierzystej w profilu I-A, zaś najniższą ( $138 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) odnotowano w profilu II-2. Całkowita zawartość niklu wahała się od  $3,36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  w glebie poziomym Et, profil III-A do  $15,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  w skale macierzystej tego samego profilu glebowego. Najwyższą całkowitą zawartość żelaza odnotowano w poziomie iluwialnym wszystkich badanych profili glebowych tj. do  $33,3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  w profilu III-A.

Gleba w poziomie Et w tym samym profilu zawierała najniższą całkowitą zawartość żelaza, która wynosiła  $6,99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Całkowita zawartość pierwiastków śladowych lokalnego tła geochemicznego (skała macierzysta) wynosiła:  $\text{Zn}_t = 33,53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\text{Cu}_t = 8,21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\text{Mn}_t = 361,08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\text{Ni}_t = 9,52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\text{Pb}_t = 9,85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\text{Fe}_t = 14,61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Tab. 20).



Rysunek 15. Średnie wartości wskaźnika DI w poziomie próchnicznym

Całkowita zawartość Zn była w większości badanych profili glebowych wyższa w poziomach powierzchniowych niż w skale macierzystej. Najwyższą całkowitą zawartość miedzi stwierdzono w poziomie próchnicznym większości badanych gleb. Całkowite zawartości manganu, niklu i ołowiu były

zróznicowane w poziomach badanych profili glebowych (Tab. 21) i posłużyły do obliczenia wartości wskaźnika rozmieszczenia (DI) w profilach (Tab. 22).

Tabela 22. Wartości wskaźnika rozmieszczenia DI całkowitej zawartości metali w profilach glebowych

Nr	Wiek sadu	Budowa profilu	Zn <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>
I-A	2	A	1,30	2,25	0,79	1,56	1,19
		AE	1,10	1,27	0,88	1,09	1,20
		Et	1,02	1,12	0,84	1,08	0,67
		Bt	1,03	1,21	0,90	1,16	1,07
		C	-	-	-	-	--
II-A1	9	A	1,03	1,61	1,14	1,70	1,17
		Bt	0,80	0,77	1,50	0,73	1,65
		C1	-	-	-	-	-
		C2	-	-	-	-	-
II-A2	12	A	1,28	1,15	2,28	0,65	0,86
		Bt	0,68	0,36	1,64	0,45	0,32
		C1	-	-	-	-	-
		C2	-	-	-	-	-
III-A	19	A	1,02	1,67	0,65	0,30	1,62
		Et	0,65	0,31	0,35	0,22	1,18
		Bt	0,86	0,79	1,31	0,68	2,23
		C	-	-	-	-	-
IV-A	30	A	1,17	1,26	0,39	0,34	1,42
		Et	1,11	0,87	0,48	0,65	1,94
		Bt1	1,20	1,63	0,79	1,15	1,83
		C1	-	-	-	-	-
		C2	-	-	-	-	-
I-B	3	A	0,98	0,98	1,05	1,15	1,57
		Et	0,75	0,61	0,68	0,79	1,11
		EB	1,06	1,00	0,77	1,03	0,98
		Bt	1,10	1,18	0,72	1,06	1,10
		C	-	-	-	-	-
II-B	9	A	0,92	1,04	1,51	0,90	1,13
		Et	0,77	0,57	1,92	0,74	0,74
		E/B	0,90	0,88	0,72	0,97	0,94
		Bt	1,04	1,11	0,78	1,05	1,27
		C	-	-	-	-	-
III-B	19	A	1,08	1,77	0,99	1,35	1,27
		Et	0,63	0,54	1,20	0,86	0,87
		Bt1	1,07	1,16	1,01	1,14	0,89
		Bt2	1,22	1,26	1,02	1,01	1,18
		C	-	-	-	-	-
IV-B	27	A	1,27	1,62	1,53	1,13	1,72
		Et	0,82	0,50	1,56	0,59	0,96
		Bt1	1,34	1,20	1,11	0,73	1,13
		Bt2	1,03	1,13	0,88	0,98	1,18
		C	-	-	-	-	-



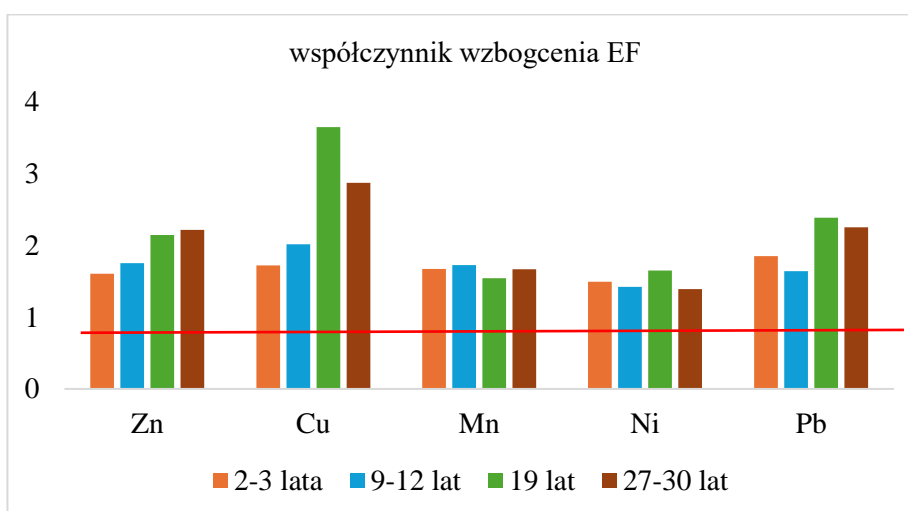
Tabela 23. Wartości wskaźnika wzbogacenia EF metali w glebie

Nr	Wiek sadu	Budowa profilu	Zn <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>
I-A	2	A	1,19	1,24	1,35	0,81	1,01
		AE	1,16	0,80	1,73	0,65	1,17
		Et	1,39	0,92	2,15	0,84	0,85
		Bt	0,54	0,38	0,88	0,35	0,53
		C	-	-	-	-	-
II-A1	9	A	0,99	1,28	0,57	1,31	1,10
		Bt	0,53	0,42	0,51	0,38	1,06
		C1	-	-	-	-	-
		C2	-	-	-	-	-
II-A2	12	A	2,23	2,25	2,21	1,31	1,52
		Bt	0,33	0,19	0,44	0,25	0,15
		C1	-	-	-	-	-
		C2	-	-	-	-	-
III-A	19	A	1,84	3,09	1,29	0,75	2,41
		Et	1,51	0,75	0,89	0,74	2,29
		Bt	0,42	0,40	0,71	0,47	0,91
		C	-	-	-	-	-
IV-A	30	A	1,89	1,94	1,06	0,71	1,98
		Et	1,51	1,12	1,11	1,16	2,29
		Bt	0,58	0,75	0,65	0,73	0,77
		C1	-	-	-	-	-
		C2	-	-	-	-	-
I-B	3	A	2,02	2,20	1,99	2,18	2,69
		Et	1,54	1,37	1,29	1,48	1,89
		EB	0,91	0,93	0,61	0,81	0,70
		Bt	0,77	0,89	0,46	0,68	0,64
		C	-	-	-	-	-
II-B	9	A	2,04	2,51	2,39	1,64	2,30
		Et	1,64	1,31	2,90	1,29	1,44
		E/B	0,75	0,80	0,43	0,67	0,72
		Bt	0,77	0,89	0,41	0,63	0,85
		C	-	-	-	-	-
III-B	19	A	2,45	4,20	1,79	2,55	2,36
		Et	1,17	1,03	1,77	1,31	1,32
		Bt1	0,97	1,10	0,72	0,86	0,66
		Bt2	1,01	1,09	0,67	0,69	0,80
		C	-	-	-	-	-
IV-B	27	A	2,54	3,80	2,27	2,07	2,52
		Et	1,68	1,19	2,36	1,09	1,44
		Bt1	1,12	1,18	0,69	0,56	0,70
		Bt2	0,92	1,18	0,58	0,80	0,77
		C	-	-	-	-	-

W przypadku całkowitej zawartości cynku, miedzi, niklu i ołowiu wyższe wartości DI odnotowano w glebie poziomu próchnicznego i poziomów podpowierzchniowych. Nie odnotowano nagromadzenia całkowitej zawartości metali w glebie poziomu próchnicznego badanych profili glebowych. W glebach użytkowanych sadowniczo 9-12 lat wartości DI były nieznacznie wyższe od 1,0

w odniesieniu do wszystkich badanych metali (Rys. 15). Na podstawie koncentracji metali w skale macierzystej gleb przyjętej jako zawartości ich tła geochemicznego obliczono wartości współczynnika EF (Tab. 23). W odniesieniu do zawartości metali tła geochemicznego odnotowano niewielkie wzbogacenie w poziomie próchnicznym w całkowitą zawartość miedzi oraz cynku. W glebie poziomu próchnicznego sadów użytkowanych 19 lat stwierdzono najwyższą wartość EF dla Cu, (Rys. 16).

Najwyższe wartości współczynnika wzbogacenia (EF) stwierdzono w poziomach próchnicznym i podpowierzchniowych. Odnotowano średnie nagromadzenie badanych metali, co nie stanowi zagrożenia dla środowiska glebowego oraz jakości uzyskiwanych owoców. Nie odnotowano wyraźnego wpływu okresu sadowniczego użytkowania na zawartość całkowitej zawartości Zn, Cu, Mn, Ni oraz Pb. Zaznaczyła się jedynie tendencja zwiększenia całkowitej zawartości miedzi, cynku i ołowiu w poziomie próchnicznym (Rys. 16).



Rysunek 16. Średnie wartości wskaźnika EF w poziomie próchnicznym

Gleba charakteryzowała się zróżnicowaną zawartością przyswajalnych dla roślin form cynku, miedzi, manganu i żelaza (Tab. 24). W glebie profilu III-A odnotowano zarazem najwyższą zawartość cynku przyswajalnego dla roślin ( $12,8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) w poziomie próchnicznym, jak i najniższą w jego poziomie Et ( $1,63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

Tabela 24. Zawartość w glebie metali przyswajalnych dla roślin

Nr	Wiek sadu	Profil	Zn <sub>p</sub>	Cu <sub>p</sub>	Mn <sub>p</sub>	Fe <sub>p</sub>
			mg·kg <sup>-1</sup>			
I-A	2	A	7,61	4,56	30,3	778,5
		AE	5,80	2,38	23,9	614,6
		Et	4,87	2,49	23,2	600,4
		Bt	4,79	3,19	22,8	278,5
		C	4,11	1,98	25,8	721,7
II-A1	9	A	6,98	3,95	14,6	621,5
		Bt	4,24	2,99	3,24	922,5
		C1	4,95	3,86	3,87	368,7
		C2	4,85	3,94	3,24	425,4
II-A2	12	A	12,6	5,11	27,0	738,7
		Bt	3,42	1,83	10,5	597,1
		C1	1,88	1,04	5,45	506,2
		C2	2,79	4,79	6,12	1148
III-A	19	A	12,8	4,54	15,8	610,8
		Et	1,63	1,86	1,66	357,0
		Bt	3,27	3,07	7,35	1422
		C	5,18	2,78	6,98	973,7
IIV-A	30	A	9,56	3,40	8,46	439,3
		Et	5,62	2,69	7,28	407,5
		Bt	9,54	4,79	16,3	761,6
		C1	3,56	2,45	4,68	916,5
		C2	5,35	3,88	17,2	1022
I-B	3	A	8,12	4,41	12,1	624,3
		Et	5,55	2,22	6,87	642,3
		EB	7,12	3,45	6,45	845,1
		Bt	7,58	3,35	6,87	1452
		C	6,89	4,11	7,45	1252
II-B	9	A	7,45	4,24	21,2	678,2
		Et	4,57	2,11	20,4	712,0
		E/B	4,05	3,32	6,78	1104
		Bt	5,24	4,15	7,98	985,4
		C	3,23	3,23	11,1	678,4
III-B	19	A	12,4	5,58	24,3	562,7
		Et	4,12	1,98	14,6	776,9
		Bt1	8,78	6,05	15,2	1024
		Bt2	8,91	5,10	9,87	946,9
		C	6,65	4,45	8,97	788,1
IV-B	27	A	10,21	5,82	21,8	756,0
		Et	3,35	2,01	10,8	746,7
		Bt1	5,51	5,47	11,3	922,4
		Bt2	4,28	4,12	7,42	875,6
		C	3,15	3,33	8,12	745,1

Najwyższą zawartość Cu<sub>p</sub> odnotowano w poziomie Bt1 profilu III-B, natomiast najniższą w poziomie C1 profilu II-A2. Glebę o najwyższej zasobności w Mn<sub>p</sub> stwierdzono w profilu I-A. Gleba w poziomie Bt w profilu I-B charakteryzowała się natomiast najwyższą zawartością Fe<sub>p</sub> (1452 mg·kg<sup>-1</sup>). Materiał glebowy w profilach gleb regionu B charakteryzował się wyższą średnią

zawartością przyswajalnych dla roślin form Cu oraz Fe (Tab. 24). Średnia zawartość  $Mn_p$  była zbliżona w materiale glebowym poziomu próchnicznego oraz skały macierzystej gleb obu regionów, co zostało potwierdzone wynikami analizy statystycznej (Tab. 25). W poziomie próchnicznym regionu A i B odnotowano także zbliżone średnie zawartości  $Zn_p$  oraz  $Fe_p$ , odpowiednio  $9,91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  i  $9,95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $p = 0,84$ ) oraz  $637,8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  i  $655,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $p = 0,83$ ). Gleby wykazywały najczęściej niską i średnią zasobność w przyswajalne dla roślin formy cynku, miedzi, manganu i żelaza (Tab. 26).

Tabela 25. Średnie zawartości przyswajalnych dla roślin form Zn, Cu, Mn i Fe w glebie oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey)

Parametr	Poziom próchniczny		Poziomy podpowierzchniowe		Skała macierzysta	
	A	B	A	B	A	B
$Zn_p$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	9,91	9,54	4,80	5,75	4,08	4,98
	$p = 0,84$		$p = 0,33$		$p = 0,43$	
$Cu_p$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4,31	5,01	2,81	3,61	3,09	3,78
	$p = 0,21$		$p = 0,18$		$p = 0,39$	
$Mn_p$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	19,23	19,85	12,91	10,39	9,17	8,91
	$p = 0,91$		$p = 0,43$		$p = 0,96$	
$Fe_p$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	637,8	655,3	662,4	919,4	760,3	865,9
	$p = 0,83$		$p = 0,06$		$p = 0,61$	

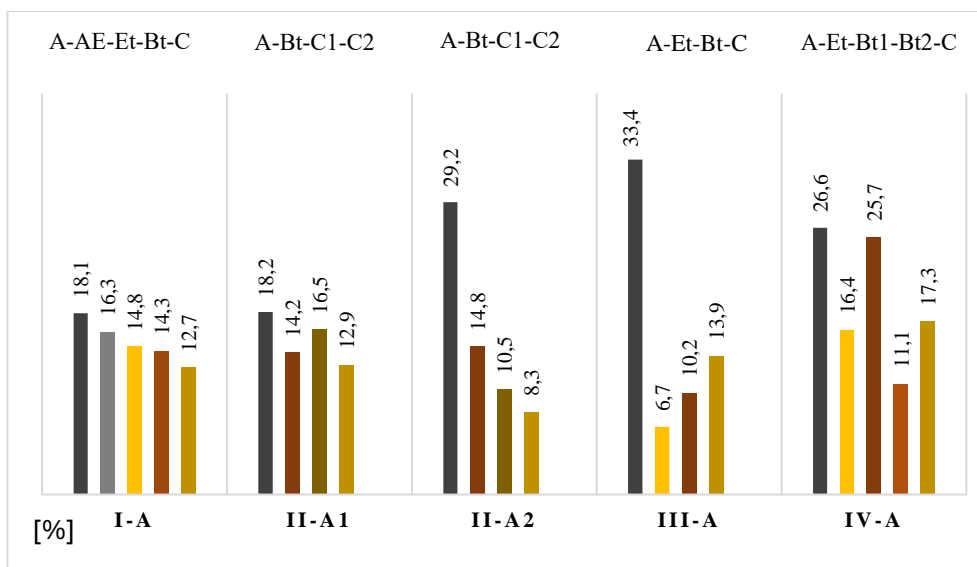
Tabela 26. Klasy zawartości metali przyswajalnych dla roślin

Nr	Wiek sadu	Profil	$Zn_p$	$Cu_p$	$Mn_p$	$Fe_p$
			Klasy zawartości			
I-A	2	A	średnia	wysoka	niska	średnia
		AE	średnia	średnia	niska	niska
		Et	średnia	średnia	niska	niska
		Bt	średnia	średnia	niska	niska
		C	niska	średnia	niska	średnia
II-A1	9	A	średnia	średnia	niska	niska
		Bt	niska	niska	niska	średnia
		C1	średnia	średnia	niska	niska
		C2	średnia	średnia	niska	niska
II-A2	12	A	średnia	wysoka	średnia	średnia
		Bt	niska	średnia	niska	niska
		C1	niska	niska	niska	niska
		C2	niska	niska	niska	średnia
III-A	19	A	wysoka	wysoka	niska	niska
		Et	średnia	średnia	niska	niska
		Bt	niska	niska	niska	średnia
		C	niska	średnia	niska	średnia
IV-A	30	A	średnia	średnia	niska	niska
		Et	średnia	średnia	niska	niska
		Bt	niska	średnia	średnia	średnia
		C1	niska	średnia	niska	średnia
		C2	niska	średnia	niska	średnia

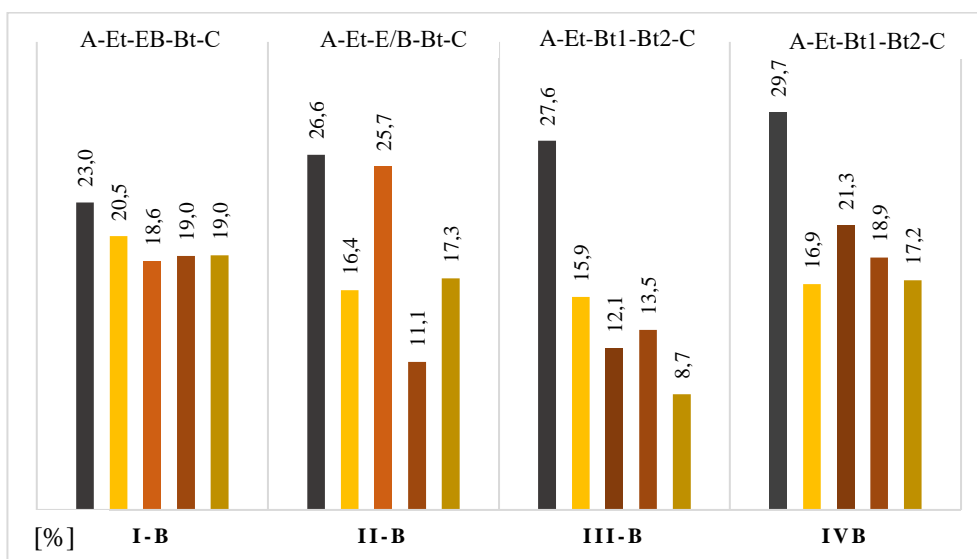
kontynuacja Tabeli 26						
I-B	3	A	średnia	średnia	niska	niska
		Et	niska	niska	niska	niska
		EB	niska	niska	niska	średnia
		Bt	niska	niska	niska	średnia
		C	niska	niska	niska	średnia
II-B	9	A	średnia	średnia	niska	niska
		Et	niska	niska	niska	średnia
		E/B	niska	niska	niska	średnia
		Bt	niska	niska	niska	średnia
		C	niska	niska	niska	niska
III-B	19	A	średnia	średnia	średnia	niska
		Et	niska	niska	niska	średnia
		Bt1	niska	średnia	niska	średnia
		Bt2	niska	średnia	niska	średnia
		C	niska	niska	niska	średnia
IV-B	27	A	niska	średnia	niska	średnia
		Et	niska	niska	niska	średnia
		Bt1	niska	średnia	niska	średnia
		Bt2	niska	niska	niska	średnia
		C	niska	niska	niska	średnia

Jedynie w kilku przypadkach próbek glebowych odnotowano wysoką zawartość miedzi przyswajalnej dla roślin w glebie poziomu próchnicznego sadów regionu A. Odnotowano niską zawartość manganu przyswajalnego dla roślin w większości poziomów genetycznych badanych profili glebowych. Niską klasę zawartości  $Zn_p$  i  $Cu_p$  odnotowano w glebie większości poziomów powierzchniowych i skale macierzystej (Tab. 26).

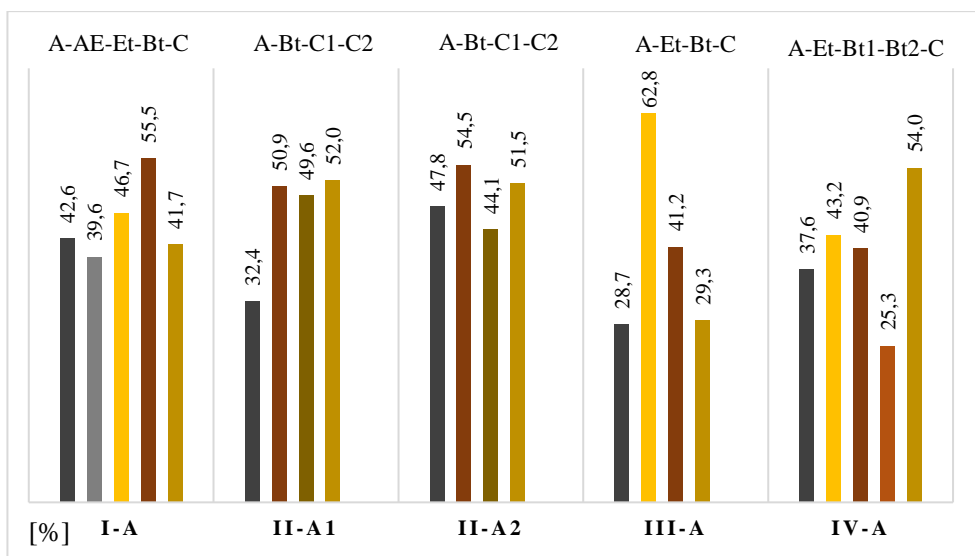
Odnutowano, że wraz z okresem sadowniczego użytkowania w glebie poziomu próchnicznego sadów regionu A i B zwiększył się procentowy udział przyswajalnych dla roślin form Zn w jego całkowitej zawartości (Rys. 17, 18). Udział ten był najwyższy w glebie poziomu próchnicznego wszystkich sadów regionu A i B. Najwyższy procentowy udział  $Zn_p$  w całkowitej zawartości metalu sadu odnotowano w sadzie III-A i wynosił 33,4%.



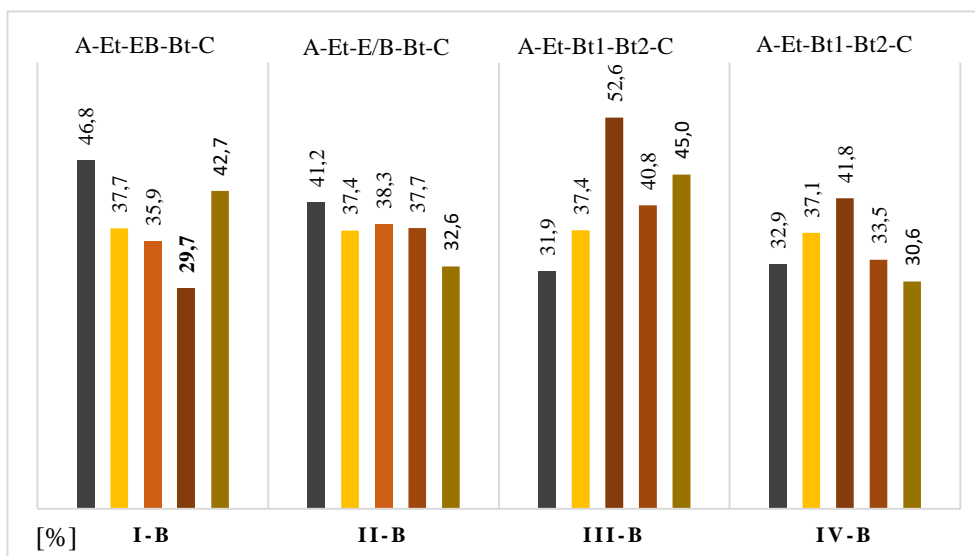
Rysunek 17. Procentowy udział form  $Zn_p$  w jego całkowitej zawartości – region A



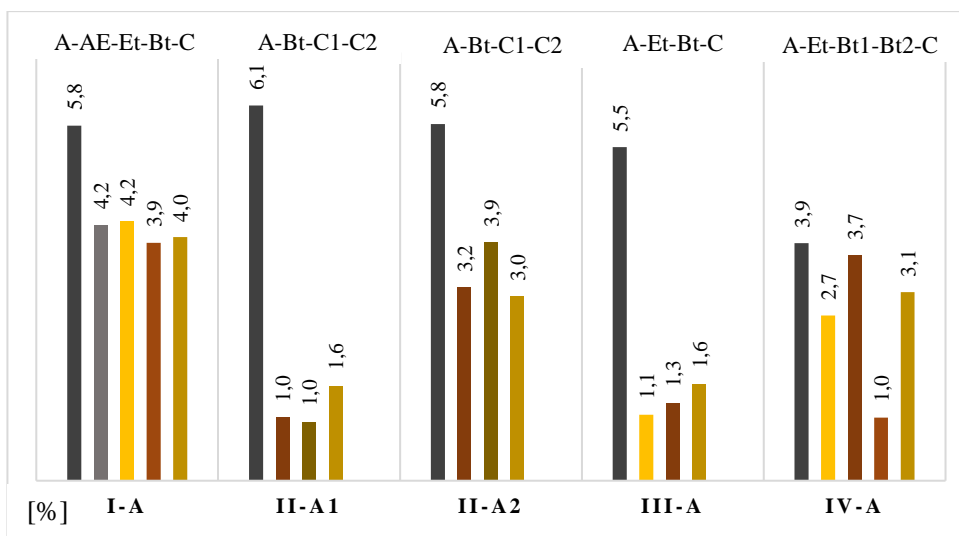
Rysunek 18. Procentowy udział form  $Zn_p$  w jego całkowitej zawartości – region B



Rysunek 19. Procentowy udział form Cu<sub>p</sub> w jej całkowitej zawartości – region A

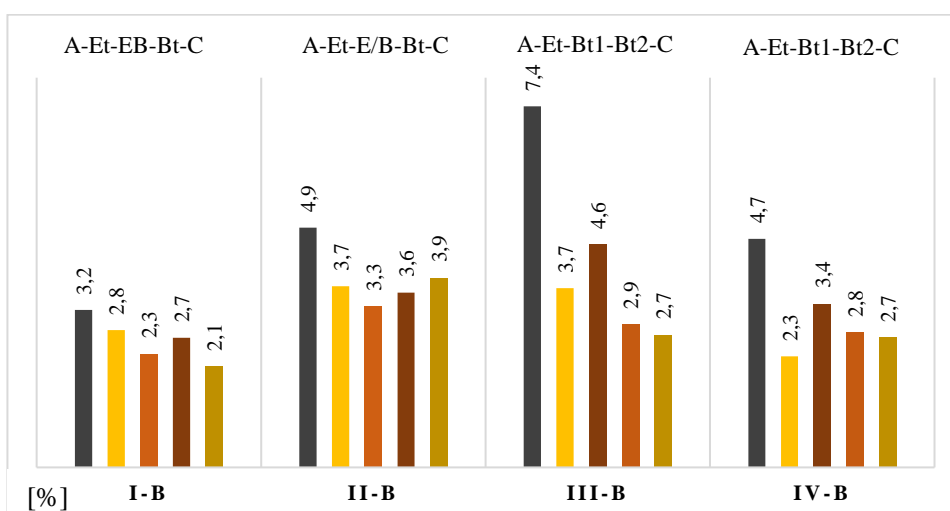


Rysunek 20. Procentowy udział form Cu<sub>p</sub> w jej całkowitej zawartości – region B



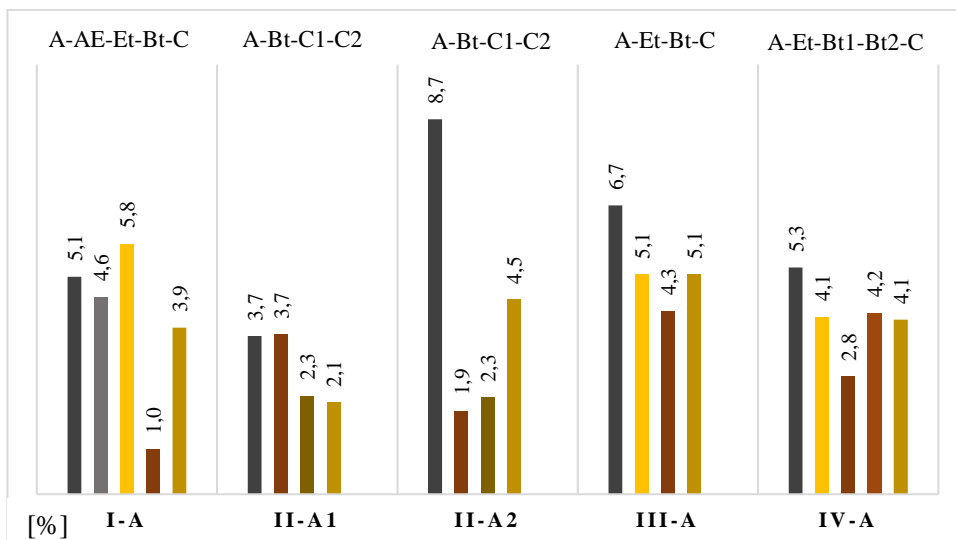
Rysunek 21. Procentowy udział  $Mn_p$  w jego całkowitej zawartości – region A

Procentowy udział  $Cu_p$  w  $Cu_t$  w glebie poziomu próchnicznego sadów regionu A był relatywnie wysoki i wynosił od 28,7% do 47,8% oraz od 31,9% do 46,8% w glebie sadów regionu B (Rys. 19, 20). Najwyższy procentowy udział  $Cu_p$  w  $Cu_t$  odnotowano w poziomie genetycznym Et profilu III-A (62,6%). Procentowy udział przyswajalnych form manganu i żelaza w jego całkowitej zawartości był niewielki w glebach obu regionów (Rys. 21, 22, 23, 24).

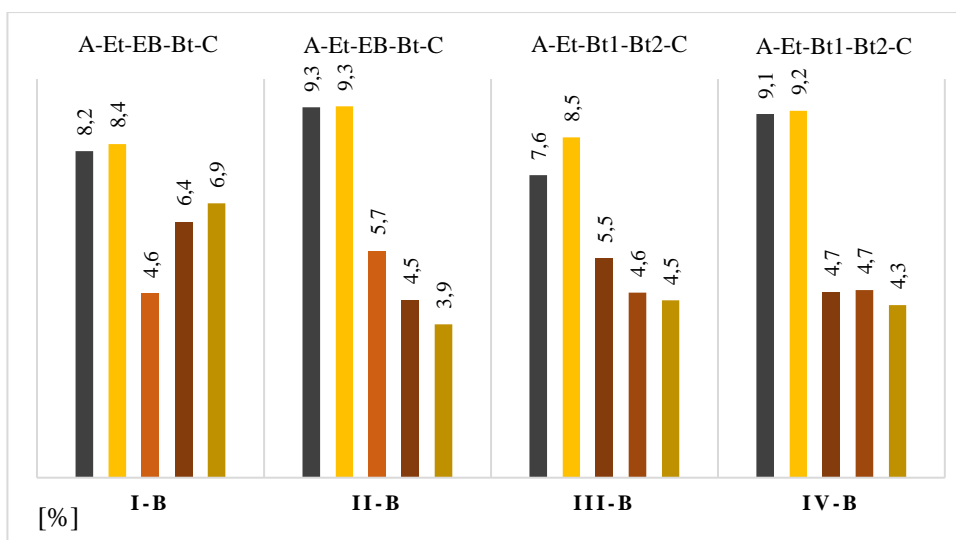


Rysunek 22. Procentowy udział  $Mn_p$  w jego całkowitej zawartości – region B





Rysunek 23. Procentowy udział Fe<sub>p</sub> w jego całkowitej zawartości – region A



Rysunek 24. Procentowy udział Fe<sub>p</sub> w jego całkowitej zawartości – region B

Najwyższe wartości procentowego udziału Mn<sub>p</sub> w Mn<sub>t</sub> stwierdzono w glebie poziomu próchnicznego każdego z profili. Odnotowano niskie wartości procentowego udziału Fe<sub>p</sub> w Fe<sub>t</sub> w glebach sadów regionu A oraz B, odpowiednio: od 1,0% do 8,7% oraz od 3,9% do 9,3% (Rys. 23, 24).

## 5. DYSKUSJA WYNIKÓW

Działalność rolnicza w terenie urzeźbionym skutkuje denudacją antropogeniczną, którą można zaobserwować na obszarze zlodowacenia bałtyckiego w Polsce. Poziom próchniczny dwóch badanych gleb znajduje się bezpośrednio nad poziomem iluwialnym (Bt), co świadczy o włączeniu pierwotnego poziomu luvic (Et) do miąższości współczesnej warstwy ornej. Obecność wzbogaconego we frakcję iłową poziomu podpowierzchniowego oraz wyściółki frakcji iłowej widoczne na powierzchni agregatów glebowych świadczą o występowaniu diagnostycznego poziomu argik. Na podstawie obserwacji terenowych i badań laboratoryjnych stwierdzono efekty procesu związanego z denudacją antropogeniczną w profilach II-A1 i II-A2. Prowadzą one do nieodwracalnych zmian w morfologii gleb (Kobierski 2013; Świtoniak i in. 2016). Erozja uprawowa przyczynia się do redystrybucji materiału glebowego w obrębie uprawianych stoków i jest identyfikowana jako ważna przyczyna degradacji gleby (Öttl i in. 2021). Kobierski (2013) oraz Świtoniak i in. (2016) wskazali, że gleby płowe o profilu Ap–Bt–C wytworzone z utworów morenowych zlodowacenia bałtyckiego w Polsce należą do podtypu gleb płowych zerodowanych, co jest zgodne ze współczesnym stanem wiedzy gleboznawczej oraz najnowszą Systematyką Gleb PTG (Kabała i in 2019) oraz klasyfikacją międzynarodową (IUSS Working Group WRB. 2022). Średnia procentowa zawartość frakcji iłowej była zbliżona w poziomie próchnicznym sadów jabłoniowych regionu A oraz B. Poziom wzbogacania Bt w profilach gleb sadów regionu B charakteryzował się istotnie wyższą średnią zawartością frakcji iłowej, co w niewielkim stopniu może determinować właściwości badanych gleb. Należą one do gleb bardzo zwięzłych w całym profilu glebowym. Wieloletnie użytkowanie rolnicze może powodować wzrost zagęszczenia w całym profilu glebowym lub być pierwotną cechą materiału glebowego, z którego powstały (Wojtasik 1998; Kobierski i Wojtasik 2009). Bouwman i Arts (2000) stwierdzili, że optymalny poziom zagęszczenia gleby zależy od typu gleby. Średnia wartość  $\rho_0$  w poziomie próchnicznym badanych gleb użytkowanych sadowniczo 2-3 lata była najniższa, jednakże zwiększyła się w trakcie sadowniczego użytkowania. Wysokie wartości gęstości objętościowej świadczą o podwyższonej zwięzłości badanych gleb, co znacząco pogarsza prawidłowy wzrost systemu korzeniowego. Do podobnych wniosków doszli Wei in. (2021) którzy ocenili zmiany zagęszczania gleby w sadach jabłkowych o różnym okresie użytkowania tj. mniej niż 10 lat, 10-20 lat i powyżej 20 lat. Autorzy wskazali, że trakcie sadowniczego użytkowania wartości  $\rho_0$  (powyżej  $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ ) i PD gleby na głębokości 20-30 cm były niekorzystne dla prawidłowego wzrostu korzeni jabłoni. Głównym powodem zagęszczania gleby w warstwie podpowierzchniowej była niewielka zawartość SOM materii organicznej gleby, słaba agregacja oraz nagromadzenie

frakcji ilowej. Zagęszczanie gleby ogranicza dostępność i transport wody i składników pokarmowych poprzez zwiększenie gęstości objętościowej gleby oraz zmniejszenie porowatości (Shah i in. 2017). Odzwierciedleniem nadmiernego zagęszczenia są bardzo niskie wartości porowatości ogólnej ( $0,30 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) w poziomach podpowierzchniowych badanych gleb. Wojtasik (1989) wskazuje, że wartości porowatości ogólnej niższe od  $0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  odpowiadają glebie zagęszczonej. Wartości BD pomiędzy  $1,3$  a  $1,5 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$  są uznawane jako najbardziej korzystne dla prawidłowego wzrostu systemu korzeniowego (Pabin i in. 1998; Paluszek 2011). Gleby charakteryzujące się niższymi wartościami porowatości ogólnej wykazują gorsze warunki do rozwoju systemu korzeniowego, ponieważ są słabiej napowietrzone. Mezopory, które mogą być wypełnione wodą lub powietrzem wpływają na prawidłowy rozwój korzeni roślin. Powstawanie i trwałość struktur glebowych zależą od zawartości SOM powodujących agregację materiału glebowego i powstanie mezo- i makroporów (Shah i in. 2017). Należy z wielką starannością dbać o właściwości strukturotwórcze gleb związane z zachowaniem optymalnych stosunków powietrzno-wodnych van. Zwięzłość gleby w badanych sadach wzrastała wraz z głębokością w profilu glebowym. Stopień zagęszczenia gleby znacznie utrudnia penetrację korzeni i zmniejsza zdolność wykorzystania wody i nawozów (Tracy i in. 2011). Wzrastający poziom upakowania cząstek glebowych oraz spadek ilości makroporów opóźnia przenikanie korzeni roślin uprawnych do głębszych warstw gleby (Lipiec i Hatano 2003; White i Kirkegaard 2010).

Obecność porowatych struktur agregatowych wpływa na prawidłowe napowietrzenie gleby. Zbyt duże zagęszczenie gleb może po intensywnych, nawalnych opadach doprowadzić do okresowego podtapianie. Jest to szczególnie niekorzystne zjawisko dla większości roślin sadowniczych, które charakteryzują się wysoką wrażliwością na zalewanie systemu korzeniowego (Olien 1989). Sprzyja temu niewielka zawartość materii organicznej w glebie oraz niska wodoodporność struktur agregatowych (Le Bissonnais 2010).

Na glebach zwięzłych dochodzi także do ich ubicia po nawalnych opadach, kiedy krople deszczu niszczą struktury glebowe (Li i in. 2023). Po odparowaniu wody powstaje wówczas zbita, zaskorupiona warstwa utrudniająca aerację gleby (Keller i in. 2021). Jest to szczególnie niekorzystne zjawisko w młodych sadach. Kobierski i in. (2005) odnotowali, że w glebach województwa kujawsko-pomorskiego różnie użytkowanych, w tym sadowniczo wartości gęstości objętościowej były znacząco wyższe od optymalnych. Zagęszczenie gleby obniża retencję wody oraz zmniejsza jej infiltrację, w wyniku czego w lokalnych zagłębieniach terenu mogą tworzyć się zastoiska. Wystąpienie spływu powierzchniowego na stokach o niewielkim nachyleniu może wystąpić w pokrywie glebowej charakteryzującej się niewielką retencją wody oraz słabą przepuszczalnością. Zwiększa to ryzyko wystąpienia erozji wodnej, która może

być przyczyną zanieczyszczenia wód powierzchniowych oraz lokalnych zbiorników wodnych (Van Den Akker i in. 2003).

Wyniki analizy korelacji pomiędzy parametrami badanych gleb wykazały, że procentowa zawartość frakcji iłowej była istotnie dodatnio skorelowana z wartością gęstości objętościowej. Odnotowano, że gleby zawierające wyższą zawartość frakcji iłowej wykazywały wyższą wartość PD. Na podstawie wartości PD zaproponowane przez Jones`a i in. (2003) badane gleby wykazywały w poziomach podpowierzchniowych wysoką kategorię upakowania ( $PD > 1,75$ ), zwłaszcza dotyczy to poziomu iluwialnego Bt. Średnia zawartość Corg była istotnie ujemnie skorelowana z wartościami gęstości objętościowej (Tab. 13). Czynniki wpływające na zagęszczenie gleby w badanych sadach były związane z relatywnie niską zawartością Corg oraz iluwialnym nagromadzeniem frakcji iłowej w poziomie Bt, co jest charakterystyczne dla typu gleb płowych. Pozytywnym aspektem nadmiernego zwięznięcia może być fakt, iż niższe wartości porowatości ogólnej gleby sprzyjają spowolnieniu procesu mineralizacji materii organicznej (Thomsen i in. 2003). Naturalne nagromadzenie frakcji iłowej w poziomie Bt badanych gleb przyczynia się także do wzrostu ich zagęszczenia. Podobnie Wei i in. (2021) stwierdzili, że na zagęszczenie gleby sadów jabłoniowych miały głównie wpływ procesy naturalne. Autorzy wskazali na niewielką trwałość agregatów spowodowaną brakiem SOM, co prowadzi do przyspieszenia przemieszczenia frakcji iłowej i jej nagromadzenia w poziomie iluwialnym.

Czynniki wpływającymi na porowatość oprócz zawartości materii organicznej jest rodzaj minerałów ilastych oraz udział kationów wymiennych. Obecne w glebie struktury agregatowe oddziałują na porowatość, zwięzłość i właściwości wodno-powietrzne oraz wpływają na penetrację korzeni roślin (Lipiec i in. 2003; Lal 2007). Trwałość struktur agregatowych wpływa na stan fizyczny gleby, ponieważ przeciwdziała nadmiernemu zagęszczeniu się gleby (Bronick i Lal 2005).

Decydujące znaczenie mają także sposób użytkowania gleb i wykonywane zabiegi uprawowe oraz ilość i intensywność opadów atmosferycznych. Węgiel organiczny i azot w glebie odgrywają ważną rolę w zrównoważonym rozwoju gleby i produkcji roślinnej. Średnia zawartość Corg w glebie poziomu próchnicznego sadów regionu B była statystycznie istotnie wyższa ( $12,6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) w porównaniu ze średnią zawartością ( $7,2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) w glebie sadów lokalizacji A. Zawartość węgla organicznego w badanych sadach jabłoniowych była zbliżona do tej jaką odnotował Pranagal i in. (2018). glebach płowych po 20 latach intensywnego sadowniczego użytkowania ( $7,7-9,7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Bielińska i Głowacka (2004) wskazują, że zawartość Corg w badanych przez autorki glebach płowych sadów jabłoniowych zależała od sposobu ich utrzymania. Gleba ugoru mechanicznego miała zbliżoną zawartość Corg z glebą ściółkowaną słomą i była o ponad 15% wyższa w porównaniu z zawartością w glebie ugoru herbicydowego

i w glebie mulczowaną czarną folią. Jednoroczne chwasty, które są niszczone i pozostawione na powierzchni gleby ugoru mechanicznego stanowią źródło materii organicznej w odróżnieniu od ujemnych skutków długotrwałego stosowania ugoru herbicydowego. Zawartość Corg w glebie badanych sadach była relatywnie niska i wymaga zastosowania zabiegów zwiększających jego zapas, z uwagi na funkcje jakie pełni w glebie aktywnej biologicznie. Średnia zawartość Corg uległa zmniejszeniu w trakcie sadowniczego użytkowania zarówno w poziomie próchnicznym, jak poziomach podpowierzchniowych i skale macierzystej. Sposób utrzymania gleby w rzędach drzew w formie pasów herbicydowych spowodowało zmniejszenie zawartości Corg, co jest jednym ze wskaźników informujących o spadku żyzności badanych gleb. Wysokie zasoby próchnicy w glebie pozwalają na utrzymanie jej produkcyjnych funkcji oraz decydują o sekwestracji dwutlenku węgla. Sekwestracja węgla jest metodą redukcji emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery poprzez wiązanie i długoterminowe przechowywanie węgla w glebie, co pomaga złagodzić skutki globalnego ocieplenia (Sompouviset i in. 2023). Zawartość węgla, który opuszcza ekosystem po zbiorze owoców jest zróżnicowana i zależy od wysokości uzyskiwanego plonu. Przycięty materiał drzew, opadnięte liście i owoce, a także skoszone rośliny zielne z międzyrzędzi przyczyniają się do magazynowania węgla w sadach, jednakże różnią się roczną biomasą oraz dynamiką rozkładu (Zanotelli i in. 2015; Scandellari i in. 2016). Ściółka z liści, aby w pełni się rozłożyć, może potrzebować roku lub dłużej, co zależy od lokalnych uwarunkowań klimatycznych (Tagliavini i in. 2007). Dodatkowym elementem obiegu węgla jest materia organiczna strefy ryzosferowej drzew i chwastów (Grayston i in. 1997; Martinez i in. 2016).

Średnia wartość pH w glebie poziomym próchnicznym sadów najmłodszych wynosiła 5,96 i uległa zmniejszeniu do pH w sadach najstarszych oraz w poziomach podpowierzchniowych odpowiednio pH 5,76 i pH 4,25 oraz skale macierzystej pH 6,23 i 5,93. Bielińska i Głowacka (2004) oraz Pranagal i in. 2018 uzyskali podobne wartości pH w badanych przez nich glebach płowych. Długotrwałe użytkowanie badanych sadów z ograniczonym wapnowaniem doprowadziło do obniżenia wartości pH oraz wzrostu wartości Hh. W poziomach podpowierzchniowych gleb badanych sadów użytkowanych przez okres 27-30 lat stwierdzono istotnie niższe wartości pH w porównaniu z sadami użytkowymi 2-3 lata (I-A i I-B). Na tej podstawie można wnioskować, że w trakcie sadowniczego użytkowania doszło do obniżenia wartości pH. Odczyn gleb w sadach województwa kujawsko-pomorskiego badanych przez Kobierskiego (2003) był zróżnicowany od kwaśnego w poziomach próchnicznych do zasadowego w poziomach skały macierzystej, zasobnej w CaCO<sub>3</sub>. Pranagal i in. (2018) twierdzą, że zakwaszenie gleb pasów herbicydowych należy łączyć z ich sadowniczym użytkowaniem, nawożeniem i stosowaniem środków ochrony roślin. Badane gleby w poziomie próchnicznym

profilu II-A2, IV-A, III-B i IV B wykazywały odczyn wskazujący na konieczną potrzebę wapnowania. Według IUNG dawkę środków wapnujących, którą należałoby zastosować przed założeniem sadu wynosi 4,5 tony CaO na hektar. W odniesieniu do pH w zakresie 5,0-5,5 w zależności od kategorii agronomicznej dawka CaO wynosiłaby 3,0 Mg·ha<sup>-1</sup>. Praktyczne wykorzystanie parametru kwasowości hydrolitycznej umożliwia bardziej precyzyjne określenie dawki środków wapnujących poprawiających odczyn gleby badanych sadów. Na podstawie wyników obliczeń według wzoru  $CaO = Hh \times 0,89$ , do odkwaszenia gleby w poziomie próchnicznym należałoby zastosować dawkę CaO, dla: I-A – 1,07 Mg·ha<sup>-1</sup>; II-A1 – 1,07 Mg·ha<sup>-1</sup>; II-A2 – 2,5 Mg·ha<sup>-1</sup>; III-A – 1,8 Mg·ha<sup>-1</sup>; IV-A – 2,5 Mg·ha<sup>-1</sup>; I-B – 1,8 Mg·ha<sup>-1</sup>; II-B – 1,3 Mg·ha<sup>-1</sup>; III-B – 3,1 Mg·ha<sup>-1</sup>; IV – 3,8 Mg·ha<sup>-1</sup>. Jednorazowe dawki wapna stosowanego w pasach herbicydowych sadów podścielonych glebą o średniej kategorii agronomicznej zależą od odczynu i wynoszą odpowiednio dla: pH <4,5 – 2,0 Mg·ha<sup>-1</sup>; pH 4,5-5,5 – 1,5 Mg·ha<sup>-1</sup>; pH 5,6-6,0 – 0,8 Mg·ha<sup>-1</sup> (Wójcik i Kowalczyk 2021).

Sposób pielęgnacji gleby w sadzie ma istotny wpływ na kształtowanie się odczynu Bielińska i Głowacka (2004) donoszą, że na stanowisku po zlikwidowanym 20-letnim sadzie jabłoniowym gleba utrzymywana w ugorze mechanicznym cechowała się wyższymi wartościami pH niż gleba ugoru herbicydowego. Kopytko i in. (2017), stwierdzili, że po 50 latach eksperymentu nawozowego, najwyższe wartości kwasowości hydrolitycznej odnotowano w glebie sadów, w których stosowano tylko nawożenie mineralne. Dlatego też strategia nawożenia drzew w sadach powinna opierać się na znajomości zasobności gleb dzięki wynikom analiz zawartości makro- i mikroelementów. Nabiera to szczególnego znaczenia w przypadku replantacji sadu. Przed założeniem sadu należy uregulować odczyn gleby i na podstawie aktualnego pH określić potrzeby wapnowania w zależności kategorii agronomicznej gleby w jej warstwie powierzchniowej i podpowierzchniowej. Jarociński (2005) skłania się do podobnego wnioskowania, że przed założeniem sadu należy wykonać oznaczenia wartości pH w poziomach solum gleb obejmującego poziom eluwalny i iluwalny. Autor zaobserwował, że zaniechanie wapnowania pól przed założeniem sadów jabłoniowych doprowadziło do bardzo silnego zakwaszenia gleb, na co wpłynęła także nieodpowiednia aplikacja nawozów azotowych. Kozanecka i Scherer 1996 wskazały, że wysokie dawki nawozów azotowych mogły przyczynić się do zakwaszenia gleb w sadach. W klimacie umiarkowanym wapnowanie gleby w sadach jabłoniowych jest konieczne, aby uniknąć nadmiernego zakwaszenia gleby. Uzyskane przez Wójcika (2018) wyniki badań wskazują, że sześciolletni okres fertygacji z azotanem amonu sprzyjało zakwaszaniu gleby w sadach jabłoniowych oraz że w celu neutralizacji zakwaszenia corocznie należy stosować wapnowanie w dawce 400 kg CaO ha<sup>-1</sup>. Sposób kropłowego nawadniania gleb w sadach jabłoniowych prowadzi także do

znacznego obniżenia wartości pH oraz zmniejszenia zawartości węgla organicznego (Čabilovski 2019). Wyniki pokazały, że pomimo licznych zalet, system kroplowej feretygacji może prowadzić do negatywnych zmian właściwości gleb zwłaszcza glin piaszczystych.

Zastosowanie pasów herbicydowych spowodowało nasilenie procesu wymycia kationów zasadowych z warstwy próchnicznej badanych gleb, ponieważ powierzchnia gleby nie była pokryta roślinnością. Brogowski i Chojnicki (2019) wykazali, że w badanych przez nich glebach najbardziej wymywanym kationem był  $\text{Ca}^{2+}$ , co sprzyja zakwaszeniu. Próbkę badanych gleb charakteryzujące się wyższymi wartościami kwasowości hydrolitycznej zawierały istotnie niższą zawartość kationów wymiennych wapnia. Gleby o odczynie kwaśnym zawierały mniej kationów zasadowych, zwłaszcza wapnia oraz wykazywały mniejszą pojemność sorpcyjną oraz niskie wartości stopnia wysycenia zasadami. Podobną zależność zaobserwował Jarociński (2005). Próbkę badanych gleb charakteryzujące się wyższą wielkością CEC zawierały więcej frakcji ilowej. Soenne i in. (2016) wskazują, że gleby o wyższej zawartości frakcji ilowej oraz SOC mają zazwyczaj wyższe wartości CEC. Zdolność do wymiany kationów jest wyższa w glebach drobnoziarnistych. Wśród sumy zasadowych kationów wymiennych dominowały w badanych glebach kationy wapnia. Procentowy udział kationów wymiennych potasu w TEB gleb regionu B, które zawierały istotnie wyższą zawartość frakcji ilowej, był istotnie wyższy w porównaniu z regionem A.

Interpretując uzyskane wyniki procentowego udziału poszczególnych kationów wymiennych w CEC wskazać należy na nieco wyższy udział kationów wymiennych potasu, co w efekcie zawęża stosunek kationów  $\text{Ca}^{2+}:\text{K}^+$ . Eckert (1987) wskazuje, że nadmiar kationów  $\text{Ca}^{2+}$  może ograniczać pobieranie kationów  $\text{Mg}^{2+}$ , zwłaszcza gdy ich udział jest niższy niż 5% w CEC. Nadmierne wysycenie  $\text{K}^+$  hamuje natomiast pobieranie  $\text{Mg}^{2+}$  przez rośliny. Optymalny zakres wysycenia kompleksu sorpcyjnego gleb kationami wapnia to 60-80% CEC. Procentowy udział kationów  $\text{Ca}^{2+}$  przekraczający 80% CEC, jest oceniany jako nadmierny. Opcjonalny zakres nasycenia  $\text{Mg}^{2+}$  to 10-25% CEC. Zalecane jest nawożenie magnezem wówczas, gdy wysycenie  $\text{Mg}^{2+}$  zmniejszy się do 15% CEC lub wartość stosunku  $\text{Mg}^{2+}$  do  $\text{K}^+$  jest niższa od 2:1. Wysycenie kationami magnezu jest oceniane jako nadmierne, gdy przekracza 25% CEC. Pożądany zakres wysycenia  $\text{K}^+$  różni się w zależności od uprawy, ale zwykle wynosi 3-5% CEC. Wysycenie kompleksu sorpcyjnego w potas jest oceniane jako nadmierne, gdy przekracza optymalny zakres (Hoskins 1997). Wysoki poziom wysycenia  $\text{K}^+$  w kompleksie sorpcyjnym badanych gleb może działać antagonistycznie na pobieranie  $\text{Mg}^{2+}$ . Kompleks sorpcyjny badanych gleb był wysycony kationami sodu od 0,79% do 6,58%. W glebie wykazującej wysoki poziom wysycenia kompleksu sorpcyjnego  $\text{Na}^+$  (powyżej 15% CEC) dochodzi do osłabienia trwałości struktur agregatowych, zaskorupienia gleby na jej powierzchni oraz

pogorszenia napowietrzania i drenażu (Hoskins 1997). Stwarza to większe ryzyko wystąpienia erozji wodnej. Podejmowanie prób osiągnięcia stanu optymalnego wysycenia kompleksu sorpcyjnego kationami wymiennymi jest możliwe dzięki systematycznemu monitorowaniu zawartości składników pokarmowych. Zdecydowanie większe znaczenie ma w tym względzie zastosowanie zbilansowanych dawek nawozów organicznych i mineralnych zawierających poszczególne składniki (Kopittke i Menzies 2007; Kondratowicz-Maciejewska i Kobierski 2011).

Współczesne sadownictwo w Polsce charakteryzuje się wieloletnim stosowaniem jednakowych zabiegów pielęgnacyjnych oraz zbliżonym nawożeniem. Odczyn gleby determinuje wówczas zasobność w składniki pokarmowe, ponieważ w warunkach odczynu kwaśnego rośliny odczuwają niedobór Ca, Mg i P, natomiast zawartość Mn i Al bywa toksyczna. W warunkach odczynu zasadowego zachodzi natomiast unieruchomienie zarówno makro-, jak i mikroelementów (Jarociński 2005). Doglebowy sposób nawożenia jest podstawową formą dostarczania roślinom składników pokarmowych potrzebnych dla ich wzrostu i rozwoju oraz uzyskania wysokiej jakości owoców. Plonowanie drzew oraz jakość owoców w równym stopniu zależy od niedoboru, jak i nadmiaru któregośkolwiek ze składnika. Należy zwrócić szczególną uwagę na negatywne oddziaływanie nawozów na glebę (Filipczak i Olszewski 2005). Niejednokrotnie po wykonaniu analiz glebowych konieczne jest zastosowanie znaczących dawek nawozów fosforowych i potasowych w celu zaspokojenia potrzeb pokarmowych roślin. Zapotrzebowanie drzew owocowych na fosfor jest stosunkowo niewielkie, natomiast potas jest składnikiem pobieranym w największej ilości i jest niezbędny do prawidłowego wybarwienia i jędrności owoców (Brzozowski i in. 2023).

Warstwa podpowierzchniowa badanych gleb charakteryzowała się w większości przypadków niską zawartością w fosfor przyswajalny dla roślin. Długotrwałe nawożenie fosforem mogło spowodować jego akumulację w poziomie próchnicznym sadu IV-B. Pacholak i Komosa (1993) tłumaczą nagromadzenie fosforu w warstwie powierzchniowej gleb niewielką ruchliwością tego pierwiastka w glebie systematycznie nawożonej. W odniesieniu do sadu IV-A gleba w całym profilu glebowym wykazywała niską i bardzo niską zawartość w fosfor przyswajalny dla roślin, Według założeń Wójcik i Kowalczyk (2021) przed założeniem sadu należałoby zastosować nawożenie fosforowe w dawce 50-70 kg  $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ , natomiast w trakcie sadowniczego użytkowania zastosować dawkę 30-50 kg  $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ . Zapotrzebowanie jabłoni w fosfor jest relatywnie niewielkie w porównaniu z potasem, azotem czy magnezem. Obecny w glebie fosfor wpływa na wielkość owoców ich barwę oraz jędrność. Pomimo doglebowego nawożenia fosforem pobieranie tego pierwiastka przez korzenie starszych drzew może być utrudnione, ponieważ w niewielkim stopniu ulega on przemieszczeniu w głąb profilu gleby



do strefy korzeni. Czynnikiem ograniczającym dostępność fosforu jest niskie pH gleby, zwłaszcza w glebie o pH poniżej 5,5. W glebach zakwaszonych należy stosować polifosforany, ponieważ fosfor w tej formie może być efektywniej pobierany przez korzenie drzew. Skuteczność wolniej działających superfosfatów jest w takich warunkach glebowych zazwyczaj mniejsza i dotyczy zwłaszcza sadów starszych (Filipczak 2020).

Gleba w profilu IV-A wykazywała niską i bardzo niską zawartość potasu przyswajalnego dla roślin, podobnie jak przypadku zawartości dostępnych dla roślin form fosforu, co stanowi poważne utrudnienie w przypadku replantacji sadu. W glebach przeznaczonych pod nasadzenia drzew owocowych, które należą do średniej kategorii agronomicznej i wykazują niską klasę zasobności w potas przyswajalny dla roślin zalecane jest nawożenie dawką 100-140 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, natomiast w trakcie sadowniczego użytkowania dawka nawozu jest nieco niższa i wynosi 60-100 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. W glebie poziomu próchnicznego dwóch profili gleb w sadach I-A, IV-B odnotowano bardzo wysoką zawartość potasu przyswajalnego dla roślin oraz wysoką w profilach w II-A1 i II-B, co wskazuje, że nawożenie potasem powinno zostać ograniczone. Wysoka zawartość potasu może oddziaływać antagonistycznie na pobieranie wapnia, co zwiększa ryzyko występowanie gorzkiej plamistości podskórnej jabłek. Według licznych badań gorzka plamistość to zaburzenie fizjologiczne które znacznie obniża jakość jabłek powstaje w wyniku niedoboru wapnia w owocach (Jemrić i in. 2016). Pomimo ponad stuletnich badań, etiologia gorzkiej plamistości nadal nie jest w pełni wyjaśniona. Objawy objawiają się z rozpadem komórek pod skórka, powodując martwicze i korkowe zmiany o gorzkim smaku. Objawy gorzkiej plamistości podskórnej jabłek mogą pojawić się na drzewie lub w pierwszych miesiącach przechowywania (Serban i in. 2019; Torres i in. 2024). Występowanie gorzkiej plamistości może być bardziej związana z interakcją Ca z K i/lub Mg aniżeli następstwem niedoboru Ca (Wińska-Krysiak i Łata 2010). Występowanie gorzkiej plamistości owoców jabłek jest obserwowana na plantacjach rosnących na glebach o odczynie kwaśnym. Wang i in. (2005) wskazują, że zastosowanie wapnowania zmniejsza występowanie gorzkiej plamistości o ponad 75%.

Gleba w profilu II-A1, III-A, IV-A, III-B wykazywała cechy zubożenia w Mg przyswajalny dla roślin. Zastosowana dawka nawożenia w sadach użytkowanych powinna wynosić 100-120 kg MgO·ha<sup>-1</sup>, natomiast przed ponownym założeniem sadu należy zastosować nawożenie wyższą dawką wynoszącą 120-140 MgO·ha<sup>-1</sup>. Na tle wszystkich sadów wyróżnia się gleba w sadzie III-B, w którym odnotowano niską zawartość magnezu przyswajalnego dla roślin w całym profilu glebowym. Magnez, który jest pobierany w postaci jonu Mg<sup>2+</sup> jest ważnym składnikiem mającym znaczenie w doglebowym nawożeniu drzew w sadach, ponieważ jest składnikiem chlorofilu oraz bierze udział w procesie fotosyntezy (Filipczak 2020). Niedobory magnezu występują

w sadach rosnących na glebach lekkich (poziom Ap sad III-A), gdzie jest on łatwo wymywany w głąb profilu glebowego.

Wapń występuje w glebie w związkach słabo przyswajalnych dla roślin, które stają się bardziej dostępne, jeśli gleba jest zasobniejsza w substancje humusowe. Wapń jest wymywany oraz pobierany przez rośliny, a następnie wynoszony wraz z plonem. Przyspiesza to proces zakwaszania gleb. Z uwagi na pochodzenie geologiczne gleb w Polsce, z których większość jest wytworzona z utworów polodowcowych są one ubogie w minerały zawierające kationy o charakterze zasadowym. Proces zakwaszenia gleb może być przyspieszony przez człowieka na skutek braku wapnowania oraz wadliwego nawożenia mineralnego. Zawartość kationów wymiennych wapnia w glebie poziomu próchnicznego badanych sadów uległa zmniejszeniu w trakcie sadowniczego użytkowania, Wapń odgrywa ważną rolę w glebie, ponieważ może zwiększać zapas SOC oraz pełnić funkcję łącznika pomiędzy koloidami organicznymi i minerałami, co wpływa na pojemność sorpcyjną (Rowley in. 2018; Borretto i in. 2021). W poziomach solum badanych gleb na skutek sadowniczego ich użytkowania istotnie zmniejszyła się zawartość rozpuszczalnych w wodzie form wapnia.

Ugór herbicydowy i niebilansowane nawożenie NPK oraz wieloletnie stosowanie środków ochrony może powodować wzrost całkowitej zawartości metali ciężkich w poziomach próchnicznych gleb w sadach, przy jednoczesnym spadku zawartości próchnicy glebowej i wzroście zakwaszenia (Bielińska i in. 2001, 2004). Badane gleby nie wykazują cech zanieczyszczenia Zn, Cu, Mn, Ni i Pb oraz nie odnotowano wyraźnego wpływu okresu sadowniczego użytkowania na ich całkowitą zawartość. W odniesieniu do zawartości metali lokalnego tła geochemicznego odnotowano niewielkie wzbogacenie w całkowitą zawartość miedzi oraz cynku w glebie poziomu próchnicznego. Badane gleby wykazywały najczęściej niską i średnią zasobność w przyswajalne dla roślin formy cynku, miedzi, manganu i żelaza. Wartości EF w zależności od zawartości metali tła geochemicznego wskazują w kilku przypadkach na średnie ich nagromadzenie, jednakże ich zawartość co nie stanowi zagrożenia dla środowiska glebowego oraz jakości uzyskiwanych owoców. W warunkach intensywnego rolniczego użytkowania gleb może dochodzić do nagromadzenia w nich pierwiastków śladowych co wpływa szkodliwie na aktywność biologiczną oraz działa toksycznie na rośliny. W konsekwencji zakumulowane w roślinach metale trafiają do łańcucha pokarmowego, co stwarza zagrożenie dla zdrowia ludzi. Imobilizacja pierwiastków śladowych w glebie zależy od właściwości sorpcyjnych gleb uwarunkowanych obecnością frakcji ilowej, substancji humusowych i odczynem (Rogóż 2003).

W profilach badanych gleb charakterystyczne było rozmieszczenie wapnia z jego najwyższą zawartością w skale macierzystej. Całkowita zawartość wapnia, potasu i magnezu w glebie poziomym próchnicznym uległa zmniejszeniu w trakcie

sadowniczego użytkowania. Zawartość CaO w glebie poziomu próchnicznego uległa zmniejszeniu z 0,44% w sadach użytkowanych 2-3 lata do 0,26% w sadach użytkowanych 27-30 lat. Gleba w poziomach podpowierzchniowych charakteryzowała się wyższą zawartością K<sub>2</sub>O oraz MgO w porównaniu z ich całkowitą zawartością w poziomie próchnicznym oraz skały macierzystej, co wskazuje na nagromadzenie tych pierwiastków w wyniku przebiegu procesu glebotwórczego z ich nagromadzeniem w poziomie iluwialnym Bt. Zawartość poszczególnych składników masy glebowej była typowa dla gleb wytworzonych z glin zwałowych zlodowacenia bałtyckiego (Kobierski i Dąbkowska-Naskręt 2003, 2005; Kobierski i Długosz 2011, Kobierski 2013).

W okresie intensyfikacji sadownictwa skraca się okres użytkowania plantacji do kilkunastu lat co powoduje, że nowe nasadzenia występują często w tych samych lokalizacjach. Żyzność gleby obejmuje złożone interakcje czynników fizycznych, chemicznych i biologicznych, które wpływają na dostępność składników pokarmowych i wzrost roślin. Aktywnie biologiczna gleba zawiera odpowiednią ilość materii organicznej gleby oraz mieści się w zakresie pH, który nie zaburza dostępności makro- i mikroelementów, a także nie wpływa negatywnie na mikroorganizmy, uczestniczące w obiegu materii organicznej. Optymalne warunki glebowe nie dotyczą ograniczeń związanych z zagęszczaniem oraz skutkami nieracjonalnego nawożenia. Praktyki podtrzymujące oraz poprawiające żyzność gleby, mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia długoterminowej produktywności użytkowanych gleb. Na podstawie wykonanych badań należy stwierdzić, że wyraźnie zachwiane zostały procesy związane z utrzymaniem żyzności gleb zwłaszcza w sadach najdłużej użytkowanych. Dotyczy to zmniejszenia zawartości próchnicy, zagęszczenia gleb w całym profilu glebowym, kwaśnego odczynu ograniczającego dostępność makroelementów zwłaszcza fosforu, niskimi wartościami zapasu węgla organicznego, zachwiania stosunku kationów Ca/K i Mg.

W przypadku likwidacji starych sadów i zakładania w ich miejsce nowych może pojawić się problem choroby replantacyjnej, który nabiera coraz większego znaczenia, z uwagi na skrócenie okresu użytkowania sadowniczego (Sienkiewicz 2006). Przyczyną choroby replantacyjnej mogą być choroby grzybowe obecność nicieni, zawartość wydzielin korzeniowych starych drzew, niedobór składników pokarmowych, wadliwa struktura gleb w warstwie powierzchniowej i podpowierzchniowej (Sobiczewski i in. 2018; Politycka i in. 2001; Pacholak i in. 2004).

Sady z chorobą replantacyjną są zazwyczaj mało rentowne, dlatego sadownicy powinni uwzględniać wszystkie przyczyny jej wystąpienia (Merwin i in. 2001). Replantacja w miejsca najstarszych badanych sadów skutkować może słabym rozwojem wegetatywnym nowych drzew oraz zmniejszoną ich produktywnością, ponieważ gleba w trakcie wieloletniego intensywnego użytkowania została zubożona w niektóre makroelementy i materię organiczną

przez co osłabiona została jej funkcja produkcji biomasy. Wieloletnia uprawa tego samego gatunku osłabia wzrost, natomiast zmiana gatunku zmniejsza ryzyko zmęczenia gleby (Zydlik i Pacholak 2007). Nowe nasadzenia w miejscach starych sadów powinny być poprzedzone pracami terenowymi oraz kompleksowymi badaniami właściwości fizycznych, fizykochemicznych i chemicznych próbek glebowych pobranych z całej miąższości profili. Wyeliminowanie zagrożenia choroby replantacyjnej pozwoli wówczas odnieść sukces produkcyjny.

## 6. WNIOSKI

1. Wieloletnie użytkowanie sadownicze gleb spowodowało wzrost ich zagęszczenia. Odzwierciedleniem nadmiernego zagęszczenia w poziomach podpowierzchniowych były bardzo wysokie wartości wskaźnika upakowania oraz bardzo niskie wartości porowatości ogólnej ( $0,30 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ). Głównym powodem zagęszczania gleby w pasach herbicydowych była niewielka zawartość Corg oraz nagromadzenie frakcji iłowej. Potwierdzają to wyniki analizy korelacji, która wykazała, że zawartość frakcji iłowej była istotnie dodatnio skorelowana z wartościami gęstości objętościowej.
2. Wartości pH gleby w warstwie powierzchniowej i podpowierzchniowej jednoznacznie wskazują, że przed replantacją sadu należy uregulować odczyn. Wieloletnie sadownicze użytkowanie spowodowało obniżenie wartości pH w glebie poziomym próchnicznym oraz istotne w glebie poziomów podpowierzchniowych.
3. Średnia zawartość Corg uległa zmniejszeniu w trakcie sadowniczego użytkowania zarówno w poziomie próchnicznym, jak w poziomach podpowierzchniowych i skale macierzystej. Z uwagi, iż zawartość Corg jest jednym ze wskaźników oceny jakości gleb należy stwierdzić, że sposób utrzymania gleb w pasach herbicydowych badanych sadów przyczynił się do obniżenia ich jakości.
4. Podstawowym czynnikiem ograniczającym dostępność fosforu w glebie pasów herbicydowych był kwaśny odczyn, który należy zmienić stosując wapno nawozowe odpowiednio dobrane to kategorii agronomicznej. Odkwaszenie gleby do wartości pH optymalnej dla uprawy jabłoni przyczyni się do poprawy dostępności fosforu oraz przyniesie lepsze efekty, aniżeli dodatkowe nawożenie fosforem.
5. W glebie poziomym próchnicznym czterech z dziewięciu badanych profili gleb odnotowano bardzo wysoką i wysoką zawartość potasu przyswajalnego dla roślin. Nawożenie doglebowe potasem w tych sadach powinno zostać ograniczone, ponieważ może on oddziaływać antagonistycznie na pobieranie wapnia.
6. Poważnym utrudnieniem w przypadku replantacji sadu użytkowanego 30 lat w regionie A jest niska i bardzo niska zawartość przyswajalnych dla roślin form fosforu i potasu w większości całego profilu glebowego.
7. Gleba w poziomie solum najstarszych sadów charakteryzowała się niższym od optymalnego procentowym udziałem wapnia w kompleksie

sorpcyjnym. Relatywnie wysoki procentowy udział kationów wymiennych potasu w CEC wskazuje, że w glebie sadów regionu B może dojść do zakłócenia równowagi w dostępności magnezu i wapnia dla roślin.

8. Nie odnotowano wyraźnego wpływu okresu sadowniczego użytkowania na całkowitą zawartość Zn, Cu, Mn, Ni oraz Pb. Na podstawie koncentracji tych metali w skale macierzystej gleb, przyjętej jako zawartości tła geochemicznego, stwierdzono niewielkie wzbogacenie w całkowitą zawartość miedzi i cynku. Metale te nie stanowią zagrożenia dla prawidłowego rozwoju drzew oraz jakości jabłek.
9. Badane gleby charakteryzowały się w większości poziomów genetycznych niską i średnią zasobnością w przyswajalne dla roślin formy cynku, miedzi, manganu i żelaza. W glebie poziomym próchnicznym w trakcie sadowniczego użytkowania zwiększył się procentowy udział Zn przyswajalnego dla roślin w jego całkowitej zawartości.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Aggelopoulou K.D., Wulfsohn D., Fountas S., Gemtos T.A., Nanos, G.D. Blackmore S., 2010. Spatial Variation in Yield and Quality in a Small Apple Orchard. *Precis. Agric.*, 11, 538-556.
2. Andziak J., Tomala K., Sadowski A., Dziuban R., 2004. Stan odżywienia składnikami mineralnymi i zdolność przechowalnicza jabłek 'Šampion' w zależności od podkładki. *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus*, 3, 2, 179-187.
3. Arsov T., Kiprijanovski M., Gjamovski V., 2012. The effect of different training system on yield and fruit quality of 'jonagold' apple variety. *Acta Horticulturae*, 981, 1, 243-248.
4. Atucha A., Merwin I.A., Brown M.G., 2011. Long-term effects of four groundcover management systems in an apple orchard. *HortScience*, 46, 1176-1183.
5. Barreto M.S.C., Elzinga E.J., Ramlogan M., Rouff A.A., Alleoni L. R.F., 2021. Calcium enhances adsorption and thermal stability of organic compounds on soil minerals. *Chem. Geol.* 559, 119804.
6. Batey T., 2009. Soil compaction and soil management-a review. *Soil Use Manage.*, 25, 335-345.
7. Bear F.E. Toth, S.J., 1948. Influence of Ca on availability of other cations. *Soil Sci.*, 65, 69-74.
8. Beylich A., Oberholzer H.-R., Schrader S., Höper H., Wilke B.-M., 2010. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil Till. Research.*, 109, 2, 133-143.
9. Bielińska E.J., Głowacka A., 2004. Zawartość mineralnych form azotu w glebie sadu jabłoniowego w zależności od metody jej pielęgnacji. *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus*, 3,2, 131-145.
10. Bielińska E.J., Domżał H., Świca M., 2001. Influence of orchard use on the changes in selected soil properties. *Acta Agroph.*, 48, 29-39.
11. Bielińska E.J., Mocek A., 2003. Aktywność enzymatyczna gleby użytkowanej sadowniczo jako wskaźnik stanu środowiska wywołany stosowaniem ściółek z tworzyw sztucznych. *Zesz. Probl. Postęp. Nauk Rol.*, 492, 25-37.
12. Bielińska E.J., Domżał H., Lipecki J., 2004. Oddziaływanie różnych metod pielęgnacji gleby w sadzie na jej właściwości biochemiczne i plonowanie jabłoni. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska*, LIX, nr 1 SECTIO E.
13. Bielińska E.J., Lipecki J., 1998. Wpływ sposobu utrzymywania gleby w sadzie jabłoniowym na możliwości ograniczenia degradacji chemicznej i biologicznej gleby. *Ann. UMCS, Lublin* 6, 1-7.
14. Bielińska E.J., Lipecki J., Magierski J., 1998. Zawartość niektórych pierwiastków śladowych w glebie w sadzie jabłoniowym GD Felin

- koło Lublina. Zesz. Nauk. AR w Krakowie 333, Sesje naukowe 57, 179-182.
15. Bokszczanin K.Ł., Wrona D., Przybyłko S., 2021. Influence of an alternative soil management system to herbicide use on tree vigor, yield, and quality of apple fruit. *Agronomy*, 11, 58.
  16. Bouwman L.A., Arts W.B.M., 2000. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties. *Appl. Soil Ecol.*, 14, 213-222.
  17. Brogowski Z. Chojnicki J., 2019. Sorption properties of granulometric fractions in Haplic Cambisol developed from boulder loam. *Soil Sci. Annu.*, 70, 2,147-157.
  18. Bronick C.J., Lal R. 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124:3-22.
  19. Brown J.R. (editor), 1987. *Soil Testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, Special publication No. 21, 1-144.
  20. Brzozowski P., Buler Z., Filipczak J., Głos H., Kruczyńska D. E., Mieszczakowska-Frać M., Miszczak A., Rutkowski K. P., Sekrecka M., Warabieda W., Zmarlicki K. Filipczak J., 2023. Kontrolowane nawożenie sadów. *Miesięcznik praktycznego sadownictwa. SAD*, 3, 75-78.
  21. Čabilovski R., Brayek A., Magazin N., Petković K., Majlonović M., 2019. Drip fertigation in apple orchards: impact on soil chemical properties and nutrient distribution in relation to soil texture. *J. Agric. Sci.*, 25,4, 481-490.
  22. Casero T., Benavides A.L., Recasens I., 2010. Interrelation between fruit mineral content and pre-harvest calcium treatments on ‘Golden Smoothee’ apple quality. *J. Plant Nutr.*, 33, 27-37.
  23. Chen Y., Wen X., Sun Y., Zhang J. Wu W., Liao Y., 2014. Mulching practices altered soil bacterial community structure and improved orchard productivity and apple quality after five growing seasons. *Sci. Hortic.*, 172, 248-257.
  24. Cheng L. Raba R., 2009. Accumulation of Macro-and Micronutrients and Nitrogen Demand-supply Relationship of ‘Gala’/‘Malling 26’ Apple Trees Grown in Sand Culture. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 1, 3-13.
  25. Cornille A., Gladieux,P., Smulders M.J., Roldán-Ruiz I., Laurens F., Le Cam B., Nersesyan A., Clavel, J., Olonova M., Feugey L., Gabrielyan I., Zhang X.G. and Giraud T., 2012. New Insight into the History of Domesticated Apple: Secondary Contribution of the European Wild Apple to the Genome of Cultivated Varieties. *PLoS Genetics*, 8, e1002703.



26. Crock J.G., Severson R., 1987. Four reference soil and rock samples for measuring element availability in the Western Energy Regions: U.S. Geochemical Survey circular, 841, 1-16.
27. Czyż E.A., 2004. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil Till. Res.*, 79, 153-66.
28. Danner M.A., Scariotto S., Citadin I., Penso A. G., Cassol L. C. 2015. Calcium sources applied to soil can replace leaf application in 'Fuji' apple tree. *Pesq. Agropec. Trop.*, Goiania, 45, 3, 266-273.
29. Dobrzański B., Rabcewicz J., Rybczynski R., 2006. Handling of Apple. Institute of Agrophysics polishes Academy of Sciences (IA PAS) Press, Lublin, Poland, 1-13.
30. Domżał H., Wójcikowska-Kapusta A., Pranagal J., 1995. Zawartość miedzi, cynku, ołowiu i manganu w glebach w zależności od sposobu wieloletniego rolniczego użytkowania. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 414, 99-104.
31. Dz. U. 2024 poz. 630. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 21 marca 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o środkach ochrony roślin.
32. Dz. U. z 2022 r. poz. 824. Obwieszczenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 2 marca 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi w sprawie szkoleń w zakresie środków ochrony roślin.
33. Dz. U. z 2023 r. poz. 126. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 21 grudnia 2022 r. zmieniające Rozporządzenie w sprawie dokumentowania działań związanych z integrowaną produkcją roślin.
34. Dz. U. z 2023 r. poz. 1397 Obwieszczenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 10 lipca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi w sprawie kwalifikacji osób prowadzących czynności kontrolne przestrzegania wymagań integrowanej produkcji roślin oraz wzoru certyfikatu poświadczającego stosowanie integrowanej produkcji roślin.
35. Eckert D.J., 1987. Soil test interpretations: Basic cation saturation ratios and sufficiency levels. (in) *Soil testing: Sampling, correlation, calibration, and interpretation*. J.R. Brown editor, SSSA Special Publication No. 21. Soil Science Society of America, 53-64.
36. Egner H., Riehm H., Domingo W.R., 1960. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Boden, II: Chemische Extraktionsmethoden zu Phosphor und Kaliumbestimmung. *Kunigliga Lantbrukshögskolans Annaler*, 26, 199-215.

37. Fageria N.K., Baligar V.C., Bailey B.A., 2005. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. *Comm. In Soil Sci. Plant Anal.*, 36:2733-2757.
38. Ferree D.C., Streeter J.G., Yuncong Y., 2004. Response of container-grown apple trees to soil compaction. *HortScience*, 39, 40-48.
39. Filipczak J., 2020. Kontrolowane nawożenie sadów. *Miesięcznik praktycznego sadownictwa. SAD*, 3, 75-78.
40. Filipczak J., Olszewski T., 2005. Różne spojrzenia na nawożenie azotem sadów jabłoniowych. *Zesz. Nauk. Inst. Sadow. Kwiac.*, 13, 5-15.
41. Forge T.A., Hogue E., Neilsen G., Neilsen D., 2003. Effects of organic mulches on soil microfauna in the root zone of apple: implications for nutrient fluxes and functional diversity of the soil food web. *Appl. Soil Ecol.*, 22, 39-54.
42. Glover J.D., Reganold J.P., Andrews P.K., 2000. Systematic method for rating of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agricult. Ecosyst. Environ.*, 80, 29-45.
43. Graham E.R., 1959. An explanation of theory and methods of soil testing. *Agric. Exp. Stn. Bull. 734. Univ. Missouri, Columbia.*
44. Grayston S.J., Vaughan D., Jones D., 1997. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. *Appl. Soil Ecol.*, 5, 29-56.
45. Hamza M.A. Anderson W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems. *Soil Till. Res.*, 82, 121-145.
46. Han M.Y., Zhang L.X., Fan C.H., Liu L.H., Zhang L.S., Li B.Z., Alva A.K., 2011. Release of nitrogen, phosphorus, and potassium during the decomposition of apple (*Malus domestica*) leaf litter under different fertilization regimes in Loess Plateau, China. *Soil Sci., Plant Nutr.*, 57, 549-557.
47. Hancock G.R., Lowry J.B.C., Saynor M., 2017. Surface armour and erosion—impacts on long-term landscape evolution. *Land Degrad. Dev.*, 28, 7, 2121-2136.
48. Harrington K.C., Hartley M.J., Rahman A., James T.K., 2005. Long term ground cover options for apple orchards. *New Zealand Plant Prot.*, 58, 164-168.
49. Hartley M.J., Reid J.B., Rahman A., Springett J.A., 1996. Effect of organic mulches and a residual herbicide on soil bioactivity in an apple orchard. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.*, 24, 183-190.
50. Heckrath G., Djurhuus S. J., Quine T. A., van Oost K., Govers G., Zhang Y., 2005. Tillage erosion and its effect on soil properties and crop yield in Denmark. *J. Environ. Qual.*, 34, 312-324.

51. Hippias N.A., Samuelson T.J., 1991. Effects of long-term herbicide use, irrigation and nitrogen-fertilizer on soil fertility in an apple orchard. *J. Sci. Food Agric.*, 55, 377-387.
52. Hoagland L., Carpenter-Boggs L.A., Granatstein D., Mazzola M., Smith J., Peryea F., Reganold J.P., 2008. Orchard floor management effects on nitrogen fertility and soil biological activity in a newly established organic apple orchard. *Biol. Fertil. Soils*, 45, 11-18.
53. Hogue E.J., Neilsen G.H., 2011. Orchard floor vegetation management. *Hortic. Rev.*, 9, 377-430.
54. Hoskins B.R., 1997. *Soil Testing Handbook for Professionals in Agriculture, Horticulture, Nutr., Resid. Manag.* Third Edition. 1-118.
55. IUSS Working Group WRB, 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
56. Jarociński B.Z., 2006. Zasobność gleb użytkowanych sadowniczo w wapń. *Bibliotheca Fragm. Agron.*, 10, 27-30.
57. Jarociński B.Z., 2005. Ocena zasobności gleb użytkowanych sadowniczo w niezbędne składniki mineralne. *Zesz. Nauk. Inst. Sadow. Kwiac.*, 13, 17-28.
58. Jemrić T., Fruk I., Fruk M., Radman S., Sinkovič L., Fruk G., 2016. Bitter pit in apples: pre- and postharvest factors: A review. *Span. J. Agric. Res.*, 14, 4, e08R01.
59. Jones R.J.A., Spoor G., Thomasson A.J., 2003. Experiences with the impact and prevention subsoil compaction in the European Union. *Soil Till. Res.*, 73, 131-143.
60. Kabała C., Charzyński P., Chodorowski J., Drewnik M., Głina B., Greinert A., Hulisz P., Jankowski M., Jonczak J., Łabaz B., Łachacz A., Marzec M., Mendyk Ł., Musiał P., Musielok Ł., Smreczak B., Sowiński P., Świtoniak M., Uzarowicz Ł., Waroszewski J., 2019. Polish Soil Classification, 6th edition – principles, classification scheme and correlations. *Soil Sci. Annu.*, 70, 2, 71-97.
61. Kai T., Mukai M., Araki K.S., Adhikari D., Kubo M., 2015. Physical and Biochemical Properties of Apple Orchard Soils of Different Productivities. *J. Soil Sci.*, 5, 149-156.
62. Kobierski M., 2004. Zawartość miedzi, cynku, manganu i żelaza w glebach sadów jabłoniowych w 27. i 30. roku ich użytkowania. *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus*, 3, 2, 161-170.
63. Kobierski M., 2013. Morphology, properties, and mineralogical composition of eroded Luvisols in selected morainic areas of the Kujavian and Pomeranian Province. Monograph no 166, pp. 1-121. University of Technology and Life Sciences, Bydgoszcz (in Polish with English summary).

64. Kobierski M., Dąbkowska-Naskręt H., 2003. Skład mineralogiczny i wybrane właściwości fizykochemiczne zróżnicowanych typologicznie gleb Równiny Inowrocławskiej. Cz. II. Skład mineralogiczny frakcji ilastej. *Roczn. Glebozn.*, 54, 4, 29-44.
65. Kobierski M., Dąbkowska-Naskręt H., 2005. Potas w zróżnicowanych typologicznie glebach Równiny Inowrocławskiej. *Nawozy i Nawożenie. Fert. Fertiliz.*, 3, 24, 171-181.
66. Kobierski M., Długosz J., 2011. Wpływ pedogenezy na skład mineralogiczny frakcji ilastej gleb wytworzonych z gliny zwałowej. *Roczn. Glebozn., Soil Sci. Annu.*, 62, 1, 91-103.
67. Kobierski M., Wojtasik M., 2009. Zasoby węgla organicznego i nieorganicznego w glebach ornym i użytkowanych sadowniczo wybranych mezoregionów Pojezierza Południowobałtyckiego. *Roczn. Glebozn., Soil Sci. Annu.*, 60, 4, 57-64.
68. Kobierski M., Wojtasik M., Jaworska H., 2005. Porównanie właściwości gleb brunatnych różnie użytkowanych. *Ekol. Techn.* 7(6):240-246.
69. Kobierski M., Kondratowicz-Maciejewska K., Banach-Szott M., Wojewódzki P., Peñas Castejón J.M., 2018. Humic substances and aggregate stability in rhizospheric and non-rhizospheric soil. *J. Soils Sediments*, 18, 2777-2789.
70. Komamura, K., Suzuki, A., Fukumoto, M., Kato, K. and Sato, Y., 2000. Effects of long-term nitrogen application on tree growth, yield, and fruit qualities in a "Jonathan" apple orchard. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.*, 69, 617-623.
71. Kondracki J., 2009. *Geografia regionalna Polski*, wydanie III uzupełnione, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, s. 441.
72. Kondratowicz-Maciejewska K., Kobierski M., 2011. Content of available magnesium, phosphorus and potassium forms in soil exposed to varied crop rotation and fertilisation. *J. Elem.*, 16, 4, 543-553.
73. Kopittke P.M., Menzies N.W., 2007. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 259-265.
74. Kozanecka T., 1995. Zawartość mineralnych form  $N-NH_4^+$  i  $N-NO_3^-$  w glebie sadu jabłoniowego. *Rocz. Glebozn.*, 44, 1/2, 105-117.
75. Kozanecka T., Rekosz-Burlaga H., Russel S., 1996. Aktywność mikrobiologiczna gleby w sadzie jabłoniowym w zależności od sposobu jej utrzymania, nawożenia azotem i wapnowania. *Rocz. Glebozn.*, 47, 75-84.
76. Kozanecka T., Scherer H.W., 1996. Wpływ nawożenia azotem i potasem oraz sposobu utrzymania gleby w sadzie jabłoniowym na zawartość niewymiennych jonów amonowych w glebie. *Rocz. Glebozn.*, 1/2, 55-64.

77. Labaz B., Waroszewski J., Dudek M., Bogacz A., Kabala C., 2022. Persistence of arable Chernozems and Chernic Rendzic Phaeozems in the eroded undulating loess plateau in Central Europe. *Catena*, 216, Part B, 106417. 5.
78. Lal R., 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degrad. Dev.*, 12, 6, 519-539.
79. Lal R., 2007. Carbon management in agricultural soils. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, 12, 303-322.
80. Lanauskas J., Kviklys D., Kviklien E.N., Uselis N., Viskelis P., Rubauskis E., 2014. Effect of soil management on tree nutrition and yield in apple organic orchards. *Acta Hortic.*, 1058, 175-180.
81. Le Bissonnais Y., 2010. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *E. J. Soil Sci.*, 48, 39-48.
82. Li J., Luo B., Liu B., Wei X., Zhong S., Wei C., 2023. Raindrop-impact-induced ejection characteristics of surface particles for soils with a textural gradient. *Catena*, 223, 106930.
83. Li Z., Wang M., Yang Y., Zhao S., Zhang Y., Wang X. 2017. Effect of composted manure plus chemical fertilizer application on aridity response and productivity of apple trees on the loess plateau, China. *Arid Land Res. Manag.*, 31, 388-403.
84. Li S., Lobb D.A., Lindstrom M.J., 2007. Tillage translocation and tillage erosion in cereal-based production in Manitoba, Canada. *Soil Tillage Res.*, 94, 164-182.
85. Licznar M., Licznar-Malmiczuk M., Licznar S.E., 2001. Influence of the intensive planting systems of apple tree Jonagold cultivar on soil fertility and productivity. *Acta Agroph.*, 56, 145-154.
86. Licznar-Małańczuk M., 2006. Training system and fruit quality in the apple cultivar 'Jonagold'. *J. Fruit Ornam. Plant Res.*, 14 (Suppl. 2), 213-218.
87. Lipecki J., 1998. Współczesne poglądy na pielęgnację gleby w sadach. *Post. Nauk Roln.*, 4, 3-15.
88. Lipiec J., Hatano R., 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116, 1-2, 107-136.
89. Lipiec J., Medvedev V., Birkas M., Dumitru E., Lyndina T., Rousseva S., Fulajtár, E., 2003. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *Int. Agrophys.*, 17, 2, 61-69.
90. Lisek J., 2014. Possibilities and limitations of weed management in fruit crops of the temperate climate zone. *J. Plant Prot. Res.*, 54, 4, 318-436.
91. Liu D., Sun H., Liao X., Luo J., Lindsey, S., Yuan J., He, T., Zaman M., Ding W., 2020. N<sub>2</sub>O and NO emissions as affected by the

- continuous combined application of organic and mineral N fertilizer to soil on the North China Plain. *J. Agron.*, 10, 1965.
92. Lotze E., Theron K.I., 2007. Evaluating the effectiveness of pre-harvest calcium applications for bitter pit control in 'Golden Delicious' apples under South African conditions. *J. Plant Nutr.*, 30, 471-485.
  93. Maillard E., Angers D.A., 2014. Animal manure application and soil organic carbon stocks: A meta-analysis. *Glob. Chang. Biol.*, 20, 666-679.
  94. Markuszewski B., Kopytowski J., 2008. Zachwaszczenie i koszty jego regulowania w sadzie jabłoniowym z produkcją integrowaną. *Zesz. Nauk. Inst. Sadow. Kwiac.*, 16, 35-50.
  95. Martin J.-M., Meybeck M., 1979. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry*, 7,3, 173-206.
  96. Martinez C., Alberti G., Cotrufo M.F., Magnani F., Zanutelli D., Camin F., Gianelle D., Cescatti A., Rodeghiero M., 2016. Belowground carbon allocation patterns as determined by the in-growth soil <sup>13</sup>C technique across different ecosystem types. *Geoderma*, 263, 140-150.
  97. Mazzola M., Manici L.M., 2011. Apple Replant Disease: Role of Microbial Ecology in Cause and Control. *Annual Annu. Rev. Phytopathol.*, 50, 1, 45-65.
  98. Merwin I.A., Rosenberger D.A., Engle C.A., Rist D.L., Fargione M., 1995. Comparing mulches, herbicides, and cultivation as orchard groundcover management systems. *HortTechnology*, 5, 2, 151-15.
  99. Merwin I.A., Stiles W.C., van Es H.M., 1994. Orchard groundcover management system impacts on soil physical properties. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 119, 216-222.
  100. Merwin I.A., Stiles W.C., 1989. Root-lesion nematodes, potassium deficiency, and prior cover crops as factors in apple replant disease. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 114, 5, 724-728.
  101. Merwin I.A., 1995. Comparing mulches, herbicides, and cultivation as orchard groundcover management systems. *Hort Techn.*, 5, 151-158
  102. Merwin I.A., Byard R., Robinson T.L., Carpenter S., Hoying S.A., Iungerman K.A., Fargione M., 2001. Developing an integrated program for diagnosis and control of replant problems in New York apple orchards. *NY Fruit Quart.*, 9, 1, 11-15.
  103. Mia J., Massetani F., Murri G., Facchi J., Monaci E., Amadio L., Neri D., 2020. Integrated weed management in high density fruit orchards. *Agronomy*, 10, 1492.
  104. Mika A., 2010. *Sad dochodowy*. Wydawnictwo Hortpress Sp. z o.o., 1-307.

105. Mochecki i in. (Bielenin A., Jaworska K., Kuczynski D., Lisek J., Mika A., Niemczyk E., Olszak R., Pluciennik Z., Treder W.) *Metodyka integrowanej produkcji jabłek* (wydanie trzecie). Na podstawie art. 5 ust. 3 pkt 2 ustawy z dnia 18 grudnia 2003 r. o ochronie roślin (Dz. U. z 2004 r. Nr 11, poz. 94 z późn. zm.), Państwowy Inspektorat Ochrony Roślin i Nasiennictwa, Główny Inspektorat Warszawa, 1-35.
106. Munsell Color., 2000. *Munsell soil color charts*. Gretag macbeth. New Windsor, NY.
107. Neilsen G.H., Hogue E. J., Forge T., Neilsen D., 2003. Surface application of mulches and biosolids affect orchard soil properties after 7 years. *Can. J. Soil Sci.*, 83, 131-137.
108. Neilsen D., Neilsen, G.H., 2002. Efficient Use of Nitrogen and Water in High-density Apple Orchards. *Hort Technology horttech*, 12, 1, 19-25
109. Olien W.C., 1989. Seasonal soil waterlogging influences water relations and leaf nutrient content of bearing apple trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 114, 4, 537-542.
110. Olszewski T., 2001. Wpływ wybranych czynników agrotechnicznych na wzrost drzew, wielkość i jakość plonu oraz zawartość składników mineralnych w liściach i owocach jabłoni. *Zesz. Nauk. Inst. Sadownictwa i Kwaciarnictwa, Skierniewice, Wyd. ISiK*, 1-91.
111. Öttl L.K., Wilken F., Auerswald K., Sommer M., Wehrhan M., Fiener P., 2021. Tillage erosion as an important driver of in-field biomass patterns in an intensively used hummocky landscape. *Land Degrad. Devel.*, 32, 10, 3077-3091.
112. Pabin J., Wodek S., Biskupski A., 1998. Optymalna gęstość – kryterium oceny właściwości fizycznych gleb w dobrej kulturze rolniczej. *Mat. Kof. Nauk. IUNG Puławy, K 15, 1*, 413-422.
113. Pacholak E., Komosa A., 1993. Zmiany zasobności gleby w sadzie jabłoniowym pod wpływem 12-letniego nawożenia NPK i nawadniania. *Zesz. Nauk. AR im. H. Kołłątaja w Krakowie*, 37, II, 421-430.
114. Pacholak E., Rutkowski K., 2001. Wpływ sposobów zapobiegania zmęczeniu gleby na liczebność nicieni oraz wzrost i plonowanie jabłoni odmiany 'Elstar' w warunkach zróżnicowanej wilgotności gleby. *Zesz. Nauk. ISiK*, 9, 5-16,
115. Pacholak E., Zydlik Z., Rutkowski K., Przybyła Cz., 2004. Effect of fertilization and irrigation on the growth and yielding of apple tree 'Sampion' cultivar in a replanted orchard in the years 1994-2002. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis, Agricultura*, 96, 143-148.

116. Paluszek J., 2011. Kryteria oceny jakości fizycznej gleb. *Acta Agroph. Rozprawy i monografie* (2)191. 1-139.
117. Parker M.L., Hull J., Perry R.L., 1993. Orchard floor management affects peach rooting. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 118, 6, 714-718.
118. Pavičić, N., Miljčević, I., 1991. Investigations of indexes of bitter pit, K/Ca ratio and calcium concentration in apples. *Informatore Agrario*, 47, 44, 94-96.
119. Peng X.H., Horn R., Zhang B., Zhao Q.G., 2004. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenised and recompacted Udisols. *Soil Till. Res.*, 76, 125-137.
120. Pieniążek S. A., 1995. *Sadownictwo. praca zbiorowa pod redakcją naukową prof. dr S. A. Pieniążka. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa. ISBN: 83-09-01622-0, 1-661.*
121. Pindral S., Świtoniak M., 2017. The usefulness of soil-agricultural maps to identify classes of soil truncation *Soil Sci. Annual*, 68, 1, 2-10.
122. Politycka B., Adamska D., Pacholak E., 2001. Changes in content of phenolic compounds in orchard soil after replantation of apple trees in relation to fertilization and irrigation. *Folia Hort.*, 13/1: 55-63.
123. PN-EN ISO 11260: 2011. Jakość gleby – Oznaczanie efektywnej pojemności wymiennej kationowej i stopnia wysycenia zasadami z zastosowaniem roztworu chlorku baru.
124. PN-ISO 10390:1997. Jakość gleby. Oznaczanie pH;
125. PN-ISO 10693:2002. Jakość gleby. Oznaczanie zawartości węglanów. Metoda objętościowa.
126. PN-ISO-11277: 2005. Jakość gleby – Oznaczanie rozkładu wielkości cząstek w mineralnym materiale glebowym – Metoda przez przesiewanie i sedymentację.
127. PN-R-04031: 1997. Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Pobieranie próbek.
128. PN-R-04023:1996, Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Oznaczanie zawartości przyswajalnego fosforu w glebach mineralnych.
129. PN-R-04022:1996/Az1:2002, Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Oznaczanie zawartości przyswajalnego potasu w glebach mineralnych.
130. PN-R-04020:1994/Az1:2004, Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Oznaczanie zawartości przyswajalnego magnezu.



131. Podhrázká, J., Kučera, J., Karásek, P., Konečná, J., 2015. Land degradation by erosion and its economic consequences for the region of South Moravia (Czech Republic). *Soil Water Res.*, 10, 2, 105-113
132. Pranagal J., Konopiński M., Czernyszewicz E., 2017. Effects of long-term use of apple orchards on some aspects of soil physical quality. *Acta Agroph.*, 24, 2, 289-299.
133. Pranagal J., Ligęza S., Smal H., Gmitrowicz-Iwan J., 2018. Wpływ wieloletniego użytkowania sadu jabłoniowego na wybrane właściwości chemiczne gleb wytworzonych z pyłów. Effect of long-term use of apple orchard on selected chemical properties of soils developed from silts. *Acta Agroph.*, 25,4, 437-448.
134. Przewoźna B., 2014. Changes of bulk density, air-water properties and morphology of soils in basins without outlets as an effect of erosion and anthropogenic denudation (a study from northwestern Poland). *Soil Science and Plant Nutrition* 60, 30-37.
135. PTG 2008, 2009: Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych. *Rocz. Glebozn.*, 60, 2. Warszawa
136. Rabcewicz J., Białkowski P., 2011. Ocena skuteczności mechanicznego niszczenia chwastów w ekologicznej uprawie jabłoni. [The efficiency of mechanical weed control in ecological apple production]. *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, 56, 4, 79-83.
137. Rabcewicz J., Wawrzyńczak P., Cianciara Z., 1998. Możliwość ograniczenia zużycia herbicydów w zwalczaniu chwastów w sadach. *Roczniki AR w Poznaniu* 54, 243-250.
138. Rätty M., Keskinen R., Yli-Halla M., Hyvönen J. Soinne H., 2021. Estimating cation exchange capacity and clay content from agricultural soil testing data. *Agr. Food Sci.*, 30, 131-145.
139. Reganold J.P., Glover J.D. Andrews P.K. Hinman H.R., 2001. Sustainability of three apple production systems. *Nature*, 410, 926-930.
140. Robinson T.L., 2007. Common mistakes in planting and establishing high-density apple orchards. *New York Fruit Quarterly*, Geneva, 15, 4, 1-7.
141. Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2023. Główny Urząd Statystyczny GUS., 1-441.
142. Rogóż A., 2003. Właściwości fizykochemiczne gleb i zawartość pierwiastków śladowych w uprawianych warzywach. Cz. I Zawartość pierwiastków śladowych w glebach. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 493, 209-217.
143. Rose M.T., Cavagnaro T.R., Scanlan C.A., Rose T.J., Vancov, T., Kimber S., Kennedy I.R., Kookana R.S., Van Zwieten L., 2016. Impact of herbicides on soil biology and function. *Adv. Agron.*, 136, 133-220.

144. Rowley M.A., Ransom C.V., Reeve J.R., Black B.L., 2011. Mulch and organic herbicide combinations for in-row orchard weed suppression. *Int. J. Fruit Sci.*, 11, 4, 316-331.
145. Rowley M.C., Grand S. Verrecchia É.P., 2018. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry*, 137, 27-49.
146. Sadowski A., Nurzyński J., Pacholak E., Smolarz K., 1990. Określenie Potrzeb Nawożenia Roślin Sadowniczych. SGGW-AR, Warszawa, 1-25.
147. Sadowski A., Piwnicka B., 1983. Rozmieszczenie korzeni jabłoni pod murawą w międzyrzędziach i pod ugiorem herbicydowym w rzędach drzew. *Prace ISK seria C*, nr 1-3(77-79), 39-40.
148. Sas-Paszt L., Pruski J., Żurawicz, Sumorok B., Derkowska E., Gluszek S., 2014. The effect of organic mulches and mycorrhizal substrate on growth, yield and quality of Gold Milenium apples on M.9 rootstock. *Can. J. Plant Sci.*, 94, 281-291.
149. Scandellari F., Caruso G., Liguori G., Meggio F., Palese A.M., Zanutelli D., Celano G., Gucci R., Inglese P., Pitacco A., Tagliavini M., 2016. A survey of carbon sequestration potential in orchards and vineyards in Italy. *Eur. J. Hortic. Sci.* 81, 2, 106-114.
150. Serban C., Kalcsits L., DeEll J., Mattheis J.P., 2019. Responses of 'Honeycrisp' apples to short-term controlled atmosphere storage established during temperature conditioning. *HortScience*, 54, 1532-1539.
151. SgP 2019. Systematyka gleb Polski. 2019. Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, Komisja Genezy Klasyfikacji i Kartografii Gleb. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, Wrocław–Warszawa, 1-290.
152. Shah A. N., Tanveer M., Shahzad B., Yang G., Fahad S., Ali S., 2017. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: An overview. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24, 10056-10067.
153. Sienkiewicz P., 2006. Wpływ głęboszowania i nawożenia na wzrost jabłoni i grusz posadzonych po zlikwidowanym sadzie jabłoniowym. *Acta Agrophysica*, 8, 4, 949-961.
154. Sobiczewski P. Cieślińska M., 2023. Opracowanie zbiorowe pod kierunkiem Sobiczewski P. Cieślińska M. Zespół autorów: Paweł Bielicki P., Borański M., Bryk H., Buler Z., Filipczak J., Hubert Głós H., Damian Gorzka D., Hołdaj M., Kruczyńska D., Lisek J., Łabanowska B.H., Malinowski T., Masny S., Mieszka B., Morgaś H., Piotrowski W., Płuciennik Z., Sekrecka M., Tartanus M., Treder W., Warabieda W., Wójcik P., *Metodyka Integrowanej Produkcji Jabłek*, Główny Inspektorat Ochrony Roślin i Nasiennictwa, Instytut Ogrodnictwa-PIB, 1-75.

155. Sobiczewski P., Treder W., Bryk H., Klamkowski K., Krzewińska D., Mikiciński A., Berczyński S., Tryngiel-Gać A., 2018. The impact of phytosanitary treatments in the soil with signs of fatigue on the growth of apple seedlings and populations of bacteria and fungi. *Polish J. Agron.*, 34, 11-22.
156. Soinne H., Hyväluoma J., Ketoja E., Turtola E., 2016. Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils. *Soil Till. Res.*, 158, 1-9.
157. Soinne H., Keskinen R., Rätty M., Kanerva S., Turtola E., Kaseva J., Nuutinen V., Simojoki A., Salo T., 2021. Soil organic carbon and clay content as deciding factors for net nitrogen mineralization and cereal yields in boreal mineral soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 72, 1497-1512.
158. Sompouviset T., Ma Y., Zhao Z., Zhen Z., Zheng W., Li Z., Zhai B., 2023. Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers Effects on the Global Warming Potential and Greenhouse Gas Emission in Apple Orchard in Loess Plateau Region of China. *Forests*, 14, 337.
159. Stojanowska J., 1994. Influence of mulching with perforated black foil on growth and bearing of cherry trees. *J. Fruit Orn. Plant Res.* 2: 1-7.
160. Stojanowska J., 1998. Ściółkowanie gleby w sadach czarną folią jako metoda walki z chwastami. *Roczniki AR w Poznaniu*, 54, 305-310.
161. Świtoniak M., 2014. Use of soil profile truncation to estimate influence of accelerated erosion on soil cover transformation in young morainic landscapes, North-Eastern Poland. *Catena*, 116, 173-184.
162. Świtoniak M., Mroczek P., Bednarek R., 2016. Luvisols or Cambisols? Micromorphological study of soil truncation in young morainic landscapes – Case study: Brodnica and Chelmno Lake Districts (North Poland). *Catena*, 137, 583-595.
163. Szczygieł A., Zepp A.L., 1996. Badania nad występowaniem choroby replantacyjnej jabłoni i możliwością jej zwalczania. XXXIV Ogólnopolska Naukowa Konferencja Sadownicza, Skierniewice, 46-52.
164. Szewczuk A., Gudarowska E., 2004. The effect of different types of mulching on yield, size, color, and storability of 'Jonagored' apples. *J. Fruit Orn. Plant Res.* 12 (Special ed.), 207-214.
165. Tagliavini M., Tonon G., Scandellari F., Quiñones A., Palmieri S., Menarbin G., Gioacchini P., Masia A., 2007. Nutrient recycling during the decomposition of apple leaves (*Malus domestica*) and mowed grasses in an orchard. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 118, 191-200.
166. Thalheimer M., Aguzzoni A., Wittmann M. S., Carlino U., Tagliavini M., 2024. Root water uptake and water transport to above-

- ground organs compensate for winter water losses and prevent shoot dehydration in apple trees. *Agric. Water Manag.*, 291, 108622.
167. TerAvest D., Smith J.L., Carpenter-Boggs L., Hoagland L., Granatstein D., Reganold J.P., 2010. Influence of orchard floor management and compost application timing on nitrogen partitioning in apple trees. *HortScience*, 45, 637-642.
  168. Thomsen I.K., Schjonning P., Olesen J.E., Christensen B.T., 2003. C and N turnover in structurally intact soils of different texture. *Soil Biol. Biochem.*, 35, 765-774.
  169. Tworkoski T.J., Glenn D.M., 2001. Yield, shoot and root growth, and physiological responses of mature peach trees to grass competition. *HortScience*, 36,7, 1214-1218.
  170. Tworkoski T.J., Glenn D.M., 2012. Weed suppression by grasses for orchard floor management. *Weed Technol.*, 26, 559-565.
  171. Torres E., Kalcsits L., Nieto L.G., 2024. Is calcium deficiency the real cause of bitter pit? A review. *Front. Plant Sci.*, 15, 1383645.
  172. Torres E., Recasens I., Lordan J., Alegre S., 2017. Combination of strategies to supply calcium and reduce bitter pit in 'Golden Delicious' apples. *Scientia Horticulturae*, 217, 179-188.
  173. Tracy S.R., Black C.R., Roberts, J.A., Mooney S.J., 2011. Soil compaction: A review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *J. Sci. Food Agric.*, 91, 1528-1537.
  174. Treder W., Klamkowski K., Mika A., Wójcik P., 2004. Response of young apple trees to different orchard floor management system. *J. Fruit Orn. Plant Res.*, 12, 113-123.
  175. Van Den Akker J.J.H., Arvidsson J., Horn R., 2003. Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil Till. Res.*, 73, 1-8.
  176. van Dijck S.J.E., van Asch T.W.J., 2002. Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in Southern France. *Soil Tillage Res.*, 63, 141-153.
  177. Varga C., Buban T., Piskolczi M., 2004. Effect of organic mulching on the quantity of microorganisms in soil of apple plantation. *J. Fruit Orn. Plant Res.*, 12, 147-155.
  178. Vogeler I., Cichota R., Sivakumaran S., Deurer M., McIvor I., 2006. Soil assessment of apple orchard under conventional and organic management. *Aust. J. Soil Res.*, 44, 745-752.
  179. Wang G.H., Yu S.C., Chen L.P., Yu X.F., Cong M.L., 2005. Experiment of applying lime for correction of the soil acidification in apple orchards. *China Fruits* 4, 11-12.
  180. Wawer R., Nowocień E., 2007. Digital Map of Water Erosion Risk in Poland: A Qualitative, Vector-Based Approach. *Pol. J. of Environ. Stud.*, 16, 5, 763-772.
  181. Wei B, Li Z, Wang Y., 2021. Study on soil compaction and its

- causative factors at apple orchards in the Weibei Dry Highland of China. *Soil Use Manage.*, 38, 790-801.
182. White G.R., Kirkegaard J.A., 2010. The distribution and abundance of wheat roots in adense, structured subsoil – implications for water uptake. *Plant, Cell Environ.*, 33, 133-148.
  183. Wiesmeier M., Urbanski L., Hobley E., Lang B., von Lützwow, M., Marin-Spiotta E., van Wesemael B., Rabot E., Ließ M., Garcia-Franco N., Wollschläger U., Vogel H.-J., Kögel-Knabner I., 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333: 149-162.
  184. Wińska-Krysiak M., Łata B., 2010. Influence of lipoxygenase activity and calcium and potassium contents on bitter pit occurrence in commercial apple cultivars. *Folia Hortic.*, 22, 13-17.
  185. Wojtasik M., 1989. Ocena gęstości gleb wytworzonych z glin zwałowych. *Rocz. Glebozn.*, XL, 2, 29-42.
  186. Wooldridge J., Harris R.E., 1991. Effect of organic mulches and plastic sheet on soil temperature. *Decid. Fruit Grow.*, 41, 118-121.
  187. Wójcik P., Kowalczyk W., 2021. Nawożenie roślin sadowniczych na podstawie analizy gleby – uaktualnienie liczb granicznych oraz użycie nowych wskaźników glebowych. Instytut Ogrodnictwa – Państwowy Instytut Badawczy, Skierniewice, 1-20.
  188. Wójcik P., 2018. Response of ‘Red Delicious’ apple trees to different liming strategies after drip fertigation with ammonium nitrate. *J. Elem.*, 23, 3, 913-925.
  189. Wójcik P., Kowalczyk W., 2021. Nawożenie roślin sadowniczych na podstawie analizy gleby – uaktualnienie liczb granicznych oraz użycie nowych wskaźników glebowych, Instytutu Ogrodnictwa – Państwowy Instytut Badawczy, Skierniewice, 1-20.
  190. Zanotelli D., Montagnani L., Manca, G., Scandellari F., and Tagliavini M., 2015. Net ecosystem carbon balance of an apple orchard. *Eur. J. Agron.*, 63, 97-104.
  191. Zielenkiewicz J., Szafranek R., 1999. Wpływ dawki i miejsca zastosowania azotu na zawartość składników mineralnych w glebie i liściach jabłoni. *Biul. Nauk.*, 3, 221-231.
  192. Zydlik Z., 2004. Effect of locality on the microbiological condition of soil from replanted apple orchard. *Folia Univ. Agric. Stetin. Agricultura*, 96, 219-224.
  193. Zydlik Z., Pacholak E., 2007. Effect of soil locality on the growth and content of mineral components in M.9 rootstock. *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus*, 6, 4, 11-20.
  194. Zydlik Z., Rutkowski K., Pacholak E., 2006. Effect of soil fatigue prevention methods on microbiological soil status in replanted apple tree orchard. Part III. Number of fungi and Actinomycetes. *EJPAU* 9, 4, #58.

## ***SPIS RYSUNKÓW***

Rysunek 1. Średnia procentowa zawartość frakcji piaskowej, pyłowej oraz frakcji <0,02 mm) w glebach regionu A (n = 22) oraz B (n = 20); Sd – błąd standardowy.....	30
Rysunek 2. Średnia procentowa zawartość frakcji >2,0 mm oraz <0,002 mm w glebach regionu A (n = 22) oraz B (n = 20); Sd – błąd standardowy .....	31
Rysunek 3. Średnia procentowa zawartość frakcji piaskowej, pyłowej oraz <0,02 mm w poziomie próchnicznym .....	31
Rysunek 4. Średnia procentowa zawartość frakcji iłowej w profilach badanych gleb ...	32
Rysunek 5. Koncentracja kationów wapnia, zawartość średnia oraz błąd standardowy, wartość poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey).....	40
Rysunek 6. Koncentracja kationów magnezu, zawartość średnia oraz błąd standardowy, wartość poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey).....	41
Rysunek 7. Koncentracja kationów potasu, zawartość średnia oraz błąd standardowy, wartość poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey).....	41
Rysunek 8. Koncentracja kationów sodu, zawartość średnia oraz odchylenie standardowe wartość poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey).....	42
Rysunek 9. Analiza skupień, kationy $Ca^{2+}$ oraz ich formy wodno-rozpuszczalne .....	44
Rysunek 10. Analiza skupień, kationy $K^{+}$ oraz ich formy wodno-rozpuszczalne .....	44
Rysunek 11. Analiza skupień, kationy $Mg^{2+}$ oraz ich formy wodno-rozpuszczalne .....	45
Rysunek 12. Analiza skupień, kationy $Na^{+}$ oraz ich formy wodno-rozpuszczalne .....	45
Rysunek 13. Procentowy udział kationów wymiennych Ca, K, Mg i Na w sumie zasadowych kationów wymiennych w profilach gleb sadów regionu A .....	46
Rysunek 14. Procentowy udział kationów wymiennych Ca, K, Mg i Na w sumie zasadowych kationów wymiennych w profilach gleb sadów regionu B .....	47
Rysunek 15. Średnie wartości wskaźnika DI w poziomie próchnicznym .....	55
Rysunek 16. Średnie wartości wskaźnika EF w poziomie próchnicznym.....	58
Rysunek 17. Procentowy udział form $Zn_p$ w jego całkowitej zawartości – region A.....	62
Rysunek 18. Procentowy udział form $Zn_p$ w jego całkowitej zawartości – region B.....	62
Rysunek 19. Procentowy udział form $Cu_p$ w jej całkowitej zawartości – region A.....	63
Rysunek 20. Procentowy udział form $Cu_p$ w jej całkowitej zawartości – region B.....	63
Rysunek 21. Procentowy udział $Mn_p$ w jego całkowitej zawartości – region A .....	64
Rysunek 22. Procentowy udział $Mn_p$ w jego całkowitej zawartości – region B.....	64
Rysunek 23. Procentowy udział $Fe_p$ w jego całkowitej zawartości – region A.....	65
Rysunek 24. Procentowy udział $Fe_p$ w jego całkowitej zawartości – region B .....	65

## ***SPIS TABEL***

Tabela 1. Kategorie wzbogacenia EF .....	23
Tabela 2. Cechy morfologiczne gleb w sadach regionu A .....	24
Tabela 3. Cechy morfologiczne gleb w sadach regionu B .....	26
Tabela 4. Zawartość frakcji oraz kategoria agronomiczna gleb (PTG 2009) .....	28
Tabela 5. Skład granulometryczny próbek glebowych .....	29
Tabela 6. Wybrane parametry glebowe .....	32
Tabela 7. Średnie zawartości parametrów glebowych oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey) w sadach A i B .....	33
Tabela 8. Średnie zawartości parametrów glebowych w profilach glebowych oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey) .....	34
Tabela 9. Właściwości sorpcyjne gleb .....	36
Tabela 10. Procentowy udział kationów w CEC .....	37
Tabela 11. Właściwości sorpcyjne gleb oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey) .....	38
Tabela 12. Koncentracja kationów wymiennych (zawartości średnie) w warstwie solum oraz skale macierzystej, wartość poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey) .....	42
Tabela 13. Wyniki analizy korelacji prostej Pearsona ( $p < 0,05$ ) .....	43
Tabela 14. Procentowy udział kationów wymiennych w TEB, poziom istotności (Anova, test Post-hoc Tukey) .....	47
Tabela 15. Skład chemiczny gleb w sadach .....	48
Tabela 16. Średnie zawartości pierwiastków oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey) .....	49
Tabela 17. Zawartość przyswajalnych dla roślin form fosforu, potasu i magnezu .....	50
Tabela 18. Średnie zawartości przyswajalnych dla roślin form fosforu, potasu i magnezu ( $\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$ ) oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey) .....	51
Tabela 19. Zawartość kationów wodno-rozpuszczalnych w glebie .....	52
Tabela 20. Średnia zawartość kationów wodno-rozpuszczalnych oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey) .....	53
Tabela 21. Całkowita zawartość pierwiastków śladowych oraz żelaza w glebie .....	54
Tabela 22. Wartości wskaźnika rozmieszczenia DI całkowitej zawartości metali w profilach glebowych .....	56
Tabela 23. Wartości wskaźnika wzbogacenia EF metali w glebie .....	57
Tabela 24. Zawartość w glebie metali przyswajalnych dla roślin .....	59
Tabela 25. Średnie zawartości przyswajalnych dla roślin form Zn, Cu, Mn i Fe w glebie oraz wartości poziomu istotności (Anova, test Post-hoc Tukey) .....	60
Tabela 26. Klasy zawartości metali przyswajalnych dla roślin .....	60

## **STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM**

### **WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I CHEMICZNE GLEB W SADACH JABŁONIOWYCH W ZALEŻNOŚCI OD OKRESU UŻYTKOWANIA**

**Słowa kluczowe:** sady jabłoniowe, sadownicze użytkowanie, właściwości gleb, makro- i mikropierwiastki

Gleby stanowią integralną część zasobów naturalnych, dlatego ich racjonalne wykorzystanie jest ważnym elementem zrównoważonego rozwoju. W tym celu należy systematycznie monitorować właściwości gleb intensywnie użytkowanych rolniczo, w tym sadowniczo. Nadrzędnym celem pracy było określenie wpływu długotrwałych praktyk uprawy drzew jabłoni na właściwości gleb. Badania przeprowadzono na glebach płowych wytworzonych z gliny zwałowej złodowacenia bałtyckiego. Próbkę gleb pobrano w obrębie pasów herbicydowych w połowie odległości między linią rzędu drzew, a skrajem murawy z 5 profili zlokalizowanych z sąsiedztwie miejscowości Lisewo Kościelne – region A oraz 4 profili glebowych w sąsiedztwie miejscowości Wtelno – region B, gmina Koronowo, województwo kujawsko-pomorskie. Próbkę glebową pobrano według obowiązujących procedur oraz po przetransportowaniu do laboratorium Pracowni Gleboznawstwa i Biochemii Politechniki Bydgoskiej, poddano wstępnej preparatyce. Przez wszystkie lata sadowniczego użytkowania wykonywane były podobne zabiegi agrotechniczne, w tym zbliżone nawożenie, ochrona przed chorobami i szkodnikami. Ochrona drzew przed chorobami i szkodnikami była prowadzona zgodnie z zaleceniami dla produkcyjnych sadów jabłoniowych. Ocenę właściwości gleb przeprowadzono na podstawie porównania wyników badań próbek glebowych pobranych z profili glebowych zlokalizowanych w sadach użytkowanych 2-3 lata, z tymi użytkowanymi w trzech zakresach czasowych tj. przez 9-12 lat, 19 lat oraz 27-30 lat.

Ocenę jakości gleb dokonano na podstawie wyników badań w terenie oraz analiz laboratoryjnych. Kierując się wyborem wskaźników jakości gleb, oceniona została głównie ich funkcja produkcyjna. Do określenia jakości gleb wykorzystano parametry, które uwzględniły ich właściwości fizyczne (barwa gleby, zmiana uziarnienia w profilu i jego morfologia, skład granulometryczny, gęstość właściwa i objętościowa), fizykochemiczne (pH, kationowa pojemność wymienna wraz z kwasowością hydrolityczną) i chemiczne (zawartość węgla organicznego, całkowita zawartość makro- i mikroelementów oraz zawartość ich form przyswajalnych dla roślin).

Na podstawie wyników badań obliczono kationową pojemność wymienną po zsumowaniu koncentracji  $H^+$  (kwasowość hydrolityczna) i sumy zasadowych kationów wymiennych ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ); porowatość na podstawie wartości gęstości właściwej i objętościowej; zapas węgla w  $kg \cdot m^{-2}$  na podstawie zawartości węgla, gęstość objętościowej, miąższości poziomu i procentowej



zawartość frakcji  $\sigma > 2,0$  mm; gęstość upakowania na podstawie gęstości objętościowej procentowej zawartość frakcji iłowej (%). Poszerzając możliwości interpretacyjne wyników badań obliczono wartości rozmieszczenia pierwiastków DI w profilu glebowym, wartości współczynnika wzbogacenia EF. Jako zawartość tła geochemicznego przyjęto średnią całkowitą zawartość pierwiastków w skale macierzystej badanych gleb. Wyniki badań poddano analizie statystycznej (analiza wariancji test Post-hoc Tukeya, analiza skupień oraz korelacji prostoliniowej) za pomocą programu Statistica 13,0 firmy StatSoft.

Skład granulometryczny w poziomie próchnicznym gleb sadów obu regionów nie wykazywał istotnego zróżnicowania, a gleba należała do kategorii agronomicznej gleb średnich. Wartość gęstości objętościowej gleby w poziomie próchnicznym wzrosła z 1,52 do 1,6  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  w trakcie sadowniczego użytkowania. W poziomach podpowierzchniowych wartość gęstości objętościowej wynosiła od 1,75 do 1,77  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  oraz od 1,80  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  do 1,89  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  w skale macierzystej bez względu na okres sadowniczego użytkowania. Odzwierciedleniem nadmiernego zagęszczenia w poziomach podpowierzchniowych były bardzo wysokie wartości wskaźnika upakowania oraz bardzo niskie wartości porowatości ogólnej. Czynnikiem wpływającym na zagęszczenie gleby były relatywnie niska zawartość Corg oraz iluwalne nagromadzeniem frakcji iłowej w poziomie Bt. Średnia zawartość Corg uległa zmniejszeniu w trakcie sadowniczego użytkowania zarówno w poziomie próchnicznym, jak poziomach podpowierzchniowych i skale macierzystej. Wieloletnie sadownicze użytkowanie spowodowało obniżenie wartości pH w glebie poziomu próchnicznego oraz istotne w glebie poziomów podpowierzchniowych. Kwaśny odczyn ograniczał dostępność fosforu w glebie. Poważnym utrudnieniem w przypadku replantacji sadu użytkowanego 30 lat w regionie A jest niska i bardzo niska zawartość przyswajalnych dla roślin form fosforu i potasu w miąższości całego profilu glebowego. Gleba poziomu próchnicznego czterech z dziewięciu badanych profili gleb wykazywała bardzo wysoką i wysoką zawartość potasu przyswajalnego dla roślin. Nawożenie doglebowe potasem w tych sadach powinno zostać ograniczone. Relatywnie wysokie wysycenie kompleksu sorpcyjnego kationami potasu wskazuje, że w glebie sadów regionu B może dojść do zakłócenia równowagi w dostępności magnezu i wapnia dla roślin. Okres sadowniczego użytkowania nie wpłynął na wzrost całkowitej metali oraz ich dostępnych dla roślin.

W ocenie zagrożenia funkcji produkcyjnej gleb w badanych sadach w trakcie wieloletniego użytkowania należy zwrócić uwagę przede wszystkim na nadmierne zagęszczenie, niskie wartości porowatości, zmniejszenie zawartości Corg, silne zakwaszenie w obrębie solum gleby oraz niedobór niektórych składników w całym profilu glebowym.

## ***STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM***

### **PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS IN APPLE ORCHARDS IN RELATION TO THE PERIOD OF USE**

**Keywords:** apple orchards, orchard use, soil properties, macro- and microelements

Soils constitute an integral part of natural resources; thus, their rational use is a key element of sustainable development. To achieve this, it is necessary to systematically monitor the properties of intensively cultivated soils, including those used for orcharding. The primary objective of this study was to determine the impact of long-term apple tree cultivation practices on soil properties. The research was conducted on luvisols formed from till deposits of the Baltic glaciation. Soil samples were collected within herbicide strips at mid-distance between the tree row line and the edge of the grass strip from 5 profiles located near Lisewo Kościelne – region A, and 4 soil profiles near Wtelno – region B, Koronowo municipality, Kuyavian-Pomeranian Voivodeship. Soil samples were taken according to established procedures and, after transportation to the Soil Science and Biochemistry Laboratory at the Bydgoszcz University of Technology, were subjected to preliminary preparation. Throughout the years of orchard use, similar agrotechnical practices were performed, including comparable fertilization and protection against diseases and pests. The protection of trees against diseases and pests was carried out according to recommendations for commercial apple orchards.

The assessment of soil properties was conducted by comparing the results of soil samples from profiles located in orchards used for 2-3 years with those used for three different time periods, i.e., 9-12 years, 19 years, and 27-30 years. The evaluation of soil quality was based on field results and laboratory analyses. The selection of soil quality indicators primarily assessed their productive function. To determine soil quality, parameters considering their physical properties (soil color, grain size variation in the profile and its morphology, particle size distribution, bulk and particle density), physicochemical properties (pH, cation exchange capacity along with hydrolytic acidity), and chemical properties (organic carbon content, total macro- and micronutrient content, and the content of plant-available forms) were used. Based on the research results, cation exchange capacity was calculated by summing the concentration of  $H^+$  (hydrolytic acidity) and the sum of basic exchangeable cations ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ); porosity was calculated based on bulk and particle density values; carbon stock in  $kg \cdot m^{-2}$  was calculated based on carbon content, bulk density, horizon thickness, and percentage of fraction  $\phi > 2.0$  mm; packing density was calculated based on bulk density and the percentage of clay fraction (%). To enhance the interpretative possibilities of the results, the distribution values of elements (DI) in the soil profile and enrichment factor (EF) values were calculated. The

geochemical background content was assumed to be the average total content of elements in the parent material of the studied soils. The research results were subjected to statistical analysis (analysis of variance, Tukey's post-hoc test, cluster analysis, and simple linear correlation) using Statistica 13.0 software by StatSoft.

The particle size distribution in the humus horizon of soils in both regions' orchards did not show significant variation, and the soil was classified as medium agricultural soil. The bulk density of the soil in the humus horizon increased from 1.52 to 1.6  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  during orchard use. In the sub-surface horizons, the bulk density ranged from 1.75 to 1.77  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  and from 1.80  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  to 1.89  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  in the parent material, regardless of the orchard use duration. Excessive compaction in the sub-surface horizons was reflected by very high packing density values and very low total porosity values. Factors influencing soil compaction included relatively low Corg content and illuvial accumulation of the clay fraction in the Bt horizon. The average Corg content decreased during orchard use in both the humus horizon and the sub-surface horizons, as well as in the parent material. Long-term orchard use led to a decrease in pH in the humus horizon and significantly in the sub-surface horizons. Acidic pH limited the availability of phosphorus in the soil. A serious challenge in replanting a 30-year-old orchard in region A is the low and very low content of plant-available forms of phosphorus and potassium throughout the soil profile. The humus horizon soil of four out of nine studied soil profiles showed very high and high plant-available potassium content. Soil potassium fertilization in these orchards should be reduced. The relatively high saturation of the sorption complex with potassium cations indicates that in the soils of orchards in region B, the balance of magnesium and calcium availability to plants may be disrupted. The period of orchard use did not affect the increase in total metal content or their availability to plants. In evaluating the risk to the productive function of soils in the studied orchards during long-term use, particular attention should be paid to excessive compaction, low porosity values, reduction in Corg content, strong acidification within the solum, and the deficiency of certain nutrients throughout the soil profile.