

**INSTYTUT INŻYNIERII OCHRONY ŚRODOWISKA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**



Marzena Rachwał

**WPLYW PYŁOWYCH IMISJI PRZEMYSŁOWYCH NA KSZTAŁTOWANIE
ANOMALII MAGNETYCZNYCH I GEOCHEMICZNYCH GLEB
LEŚNYCH W TRANSEKCIE JAWORZNO – BUKOWNO – OLKUSZ**

Rozprawa doktorska wykonana w Instytucie Podstaw Inżynierii
Środowiska Polskiej Akademii Nauk w Zabrze

Promotor

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Strzyszczyński

WROCŁAW 2006

Składam serdeczne podziękowania: mojemu promotorowi prof. dr hab. inż. Zygmuntovi Strzyszczowi za opiekę i wszechstronną pomoc podczas realizacji niniejszej pracy, za cenne wskazówki oraz dyskusje merytoryczne nad podjętym tematem, dr Grzegorzowi Kuszy za owocne dyskusje oraz mobilizację, a także pani Teresie Pawlik, mgr Barbarze Janus oraz dr Marcinowi Pietrzykowskiemu. Jestem wdzięczna również mojej Rodzinie za wsparcie, mobilizację i cierpliwość.

SPIS TREŚCI

SPIS TABEL	4
SPIS RYSUNKÓW	5
1. WPROWADZENIE	6
2. PRZEGLĄD LITERATURY	11
2.1. PODSTAWY MAGNETYZMU ŚRODOWISKA.....	11
2.2. PRZEGLĄD BADAŃ NAD PODATNOŚCIĄ MAGNETYCZNĄ PYŁÓW PRZEMYSŁOWYCH I GLEB.	18
2.3. PROCES POWSTAWANIA PODATNOŚCI MAGNETYCZNEJ GLEBY I ROLA ROŚLINNOŚCI W TYM PROCESIE	24
3. CEL I ZAKRES PRACY	31
4. CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ.....	32
4.1. POŁOŻENIE GEOGRAFICZNO-ADMINISTRACYJNE ORAZ CHARAKTERYSTYKA FIZJOGRAFICZNA	32
4.2. BUDOWA GEOLOGICZNA I HYDROLOGICZNA.....	34
4.3. GLEBY	37
4.4. KLIMAT	39
4.5. ŹRÓDŁA ZANIECZYSZCZEŃ PYŁOWYCH I ICH ODDZIAŁYWANIE NA ŚRODOWISKO PRZYRODNICZE W REJONIE BADAŃ.....	41
5. METODYKA BADAŃ.....	46
5.1. BADANIA TERENOWE.....	46
5.2. BADANIA LABORATORYJNE	48
5.3. STATYSTYCZNE OPRACOWANIE WYNIKÓW	51
6. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE	52
6.1. BADANIA TERENOWE.....	52
6.2. BADANIA LABORATORYJNE	56
6.2.1. Pomiary magnetyczne	56
6.2.2. Zawartości metali ciężkich	62
6.2.3. Powierzchnia specjalna z podwójnym profilem.....	67
6.2.4. Kształtowanie podatności magnetycznej i zawartości metali ciężkich w glebach leśnych badanego obszaru w aspekcie historycznym.....	69
7. OCENA ZAGROŻENIA GLEB LEŚNYCH TRANSEKTU JAWORZNO – BUKOWNO – OLKUSZ PRZEZ PYŁOWE IMISJE PRZEMYSŁOWE.....	72
8. WNIOSKI.....	77
9. SPIS LITERATURY	79
ZAŁĄCZNIKI	89

SPIS TABEL

Tabela 1. Wielkość emisji wybranych zanieczyszczeń powietrza z głównych gałęzi przemysłu (GUS 1974, 1983, 1987, 1991, 1994, 1999, 2004).	7
Tabela 2. Zakresy buforowe gleb i ich charakterystyka (Ulrich i in. 1979, Puchalski, Prusinkiewicz 1990).	8
Tabela 3. Specyficzna podatność magnetyczna różnych substancji (Thompson i Oldfield 1986).	15
Tabela 4. Wartości temperatury Curie (°C) dla minerałów posiadających pozostałość magnetyczną (Thompson i Oldfield 1986).	17
Tabela 5. Podatność magnetyczna pyłów przemysłowych i popiołów lotnych (Strzyszc 1993).	19
Tabela 6. Zawartości metali ciężkich w opadzie pyłu na otwartej przestrzeni oraz pod okapem w drzewostanie bukowym i świerkowym (Ulrich i in. 1979).	30
Tabela 7. Zawartości żelaza, manganu i glinu w roztworach z lizymetrów na różnych głębokościach gleby pod drzewostanem bukowym i świerkowym oraz w opadzie pyłu na otwartej przestrzeni (Ulrich i in. 1979).	30
Tabela 8. Skład granulometryczny (w %) próbek gruntu ze spągu wyrobiska Kopalni Pisaku KPP Rail „Szczakowa” (Pietrzykowski 2004).	38
Tabela 9. Skład mineralny prób utworów pobranych ze spągu wyrobiska Kopalni Piasku PCC Rail „Szczakowa” (frakcja $\phi < 0,05$ mm) (Pietrzykowski 2004).	38
Tabela 10. Średnioroczne wartości opadu pyłu, ołowiu, cynku, żelaza i kadmu w latach 1976–2004 w rejonie transektu Jaworzno – Bukowno – Olkusz.	42
Tabela 11. Szacunkowy rozkład procentowy średnic cząsteczek w pyłach opadowych z miejscowości najbliższych obiektowi badań (Jabłońska 2003).	45
Tabela 12. Współczynniki korelacji liniowej (r Pearson’a) i nieparametrycznej (R Spearman’a) między maksymalnymi wartościami podatności magnetycznej a wiekiem powierzchni oraz poziomem genetycznym gleby.	57
Tabela 13. Wyniki pomiarów objętościowej podatności magnetycznej mierzonej w polach o niskiej (κ_{LF}) i wysokiej częstotliwości (κ_{HF}), masowej podatności magnetycznej (χ) oraz współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}) w poziomie organicznym gleb badanego transektu.	59
Tabela 14. Wyniki pomiarów objętościowej podatności magnetycznej mierzonej w polach o niskiej (κ_{LF}) i wysokiej częstotliwości (κ_{HF}), masowej podatności magnetycznej (χ) oraz współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}) w poziomach próchnicznych, organiczno-mineralnych oraz organiczno-eluwialnych badanych gleb.	60
Tabela 15. Wyniki pomiarów izotermicznej pozostałości magnetycznej gleby z powierzchni 49S (80-100 letnia sosna zwyczajna).	61
Tabela 16. Zawartości metali ciężkich w próbkach piasku (skały macierzystej) z powierzchni porównawczych.	63
Tabela 17. Zawartości Zn, Pb i Cd w poziomach genetycznych gleb w zależności od wieku powierzchni.	71

SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Schemat uporządkowania momentów magnetycznych w substancji: a) ferromagnetycznej, b) ferrimagnetycznej, c) antyferromagnetycznej i d) antyferrimagnetycznej (Lowrie 1997).....	12
Rysunek 2. Trójkąt FeO-Fe ₂ O ₃ -TiO ₂ i różne szeregi tlenków magnetycznych żelaza i tytanu (Thomson i Oldfield 1986).....	14
Rysunek 3. Schemat obiegu cząstek magnetycznych w przyrodzie (Thompson i Oldfield 1986).....	25
Rysunek 4. Tworzenie i przekształcenia tlenków i wodorotlenków żelaza (Schwertmann i Cornell 2000).....	26
Rysunek 5. Rozkład wiatrów dla Dąbrowy Górniczej, lata 1994–2003, porównanie różnych okresów w roku (na podstawie danych IMGW Katowice, 2004).	40
Rysunek 6. Średnioroczne wartości opadu pyłu, żelaza, manganu, cynku ołowiu i kadmu w latach 1983-2003 dla Jaworzna (źródło: dane WSSE Katowice, 1976-2005).	43
Rysunek 7. Rentgenogram próbki popiołu lotnego Elektrowni „Jaworzno III” (Magiera 2004).	45
Rysunek 8. Zależności maksymalnych wartości podatności magnetycznej (κ) pomierzonych w rdzeniach glebowych od poziomu genetycznego gleby, w którym maksimum występuje.	57
Rysunek 9. Zestawienie wyników specyficznej podatności magnetycznej (χ) z wartościami współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}) dla poszczególnych poziomów genetycznych gleb.....	58
Rysunek 10. Zawartości metali ciężkich w poziomach genetycznych gleb powierzchni uszeregowanych wzdłuż transektu od zachodu na wschód na tle zawartości metali w opadającym pyłe 1985 i 1998 roku (na podstawie danych WSSE Katowice).	65
Rysunek 11. Poziomy genetyczne wyróżnione w podwójnym profilu.	67
Rysunek 12. Uśredniona objętościowa podatność magnetyczna zmierzona w terenie dla poszczególnych poziomów genetycznych gleby w zależności od wieku powierzchni....	71
Rysunek 13. Rozkład przestrzenny podatności magnetycznej na badanym obszarze.	75

1. WPROWADZENIE

Środowisko przyrodnicze podlega stałym zmianom i przekształceniom, a ich przyczyną są zarówno czynniki naturalne, jak i antropogeniczne. Oceniając wpływ na środowisko czynników antropogenicznych, w pierwszym rzędzie należy wziąć pod uwagę emisje (czyli wprowadzenie do powietrza atmosferycznego określonych składników) szkodliwych gazów i pyłów, które oddziałują na wszystkie elementy środowiska – gleby, wody, rośliny i istoty żywe (głównie ludzi). W ostatnich dziesięcioleciach skala niektórych procesów przemysłowych była i jest często nadal wielka, a ich skutki są odczuwalne nie tylko w pobliżu, ale także w regionach bardzo odległych od źródeł emisji. Rejonami o najwyższym stopniu zagrożenia emisjami przemysłowymi (rozumianymi jako wielkość stężeń zanieczyszczenia powietrza w określonym miejscu i określonym czasie wyrażona w jednostkach wagowych na jednostkę objętości powietrza lub jako opad zanieczyszczeń na określoną powierzchnię) są Górnośląski Okręg Przemysłowy (GOP) związany z kopalnictwem węgla kamiennego oraz eksploatacją i przeróbką rud żelaza, cynku i ołowiu, Legnicko-Głogowski Okręg Przemysłowy (LGOP), gdzie wydobywa się rudy miedzi, czy też rejonny związane z przemysłem cementowo-wapienniczym na Opolszczyźnie i Kielecczyźnie. Zanieczyszczenia przemysłowe napływające z wymienionych terenów wywierają także negatywny wpływ na tereny z nim sąsiadujące. Szczególnie zagrożone są gleby leśne tych terenów, bowiem opadające pyły zawierają związki działające toksycznie zarówno na gleby leśne, jak i na same drzewostany, które zależnie od rodzaju i ilości zanieczyszczeń ulegają wielopostaciowym uszkodzeniom (od zaniku chlorofilu i żółknięcia liści po zmniejszenie przyrostu drzew i ich zamieranie).

Bezpośrednie zagrożenie stanowią gazy (SO_2 , NO_x , CO), pyły (w tym pył zawieszony PM 10 i respirabilny PM 2,5), metale ciężkie oraz substancje organiczne, przede wszystkim związki o długim okresie trwałości, trudno ulegające biodegradacji, do których należą wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA, m.in. benzo(a)piren, antracen, fenantren, piren, chryzen). Do najbardziej emisjogennych źródeł zaliczane jest spalanie paliw stałych (głównie w elektrowniach i elektrociepłowniach), ale spory udział w emisji zanieczyszczeń mają także cementownie, huty żelaza i metali nieżelaznych oraz koksownie (Tab. 1).

W okresie powojennym wraz z intensywną odbudową kraju i rozwojem przemysłu nastąpił gwałtowny i niekontrolowany wzrost gazowych i pyłowych emisji przemysłowych. Z biegiem lat, wraz z zastosowaniem coraz skuteczniejszych urządzeń redukujących emisje

szkodliwych substancji, wielkość emisji przemysłowych w Polsce malała, a w ostatnich latach odnotowuje się wartości wielokrotnie niższe od tych z lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku. Podobna tendencja spadkowa utrzymuje się również w rejonach Górnego Śląska, ale ilości emitowanych zanieczyszczeń są nadal duże i często przekraczają dopuszczalne normy (Jabłońska 2003). Pomimo aktualnego zmniejszenia wielkości emisji, potężna dawka zanieczyszczeń, która dostała się do środowiska naturalnego w latach ubiegłych nie jest dla niego obojętna, biorąc pod uwagę wysoką zdolność kumulacji metali ciężkich w glebach, roślinach i tkankach organizmów żywych.

Tabela 1. Wielkość emisji wybranych zanieczyszczeń powietrza z głównych gałęzi przemysłu (GUS 1974, 1983, 1987, 1991, 1994, 1999, 2004).

Rodzaj działalności rok	Pył	SO ₂	CO
	tys. ton·rok ⁻¹		
Produkcja energii			
1973	797,8	1052,6	b.d.
1982	889,3	1668,2	66,5
1986	862,6	1963,4	33,9
1990	574,7	1557,0	27,2
1993	304,1	1317,2	35,8
1998	136,1	1116,8	82,9
2003	79,0	757,7	61,8
Metalurgia			
1973	300,1	168,8	303,7
1982	202,1	197,4	1121,0
1986	241,6	210,7	981,3
1990	118,3	116,3	731,8
1993	39,2	76,3	311,5
1998	16,6	28,5	152,8
2003	10,3	14,1	158,6
Produkcja cementu, wapna oraz gipsu			
1973	528,5	47,0	67,1
1982	268,6	44,9	112,7
1986	176,4	34,8	140,6
1990	64,9	16,3	49,1
1993	22,7	9,4	19,2
1998	13,3	5,9	16,0
2003	3,4	4,1	25,2
Wytwarzanie i przetwarzanie produktów koksowania węgla			
1973	25,8	28,7	3,2
1982	22,4	17,8	13,7
1986	15,7	18,9	11,3
1990	13,9	19,2	9,6
1993	5,0	11,5	6,8
1998	1,6	4,8	6,2
2003	1,2	3,1	8,1

Losy zanieczyszczeń w glebie zależą od ich granulacji, składu mineralnego i chemicznego oraz od właściwości gleby. Najczęściej reagują one z abiotycznymi i biotycznymi składnikami gleby. Stały ich dopływ może prowadzić do niekorzystnych zmian warunków glebowych, a w konsekwencji do zakłócenia funkcjonowania całych ekosystemów.

Emisje gazowe, a konkretnie ditlenek siarki i tlenki azotu (których rezultatem są tzw. „kwaśne deszcze”) mają zakwaszający wpływ na gleby, powodując łańcuch następujących reakcji:

- przyspieszone przełamywanie kolejnych barier buforowych i szybkie obniżanie się wartości pH najpierw w powierzchniowej warstwie gleby, a następnie w coraz głębszych poziomach, przy czym najbardziej dramatyczny może być spadek pH do poziomu, w którym buforowanie odbywa się kosztem uwalniania do roztworu jonów glinu Al^{3+} i żelaza Fe^{3+} (Tab. 2);
- energiczne wietrzenie podatnych na rozkład minerałów glebowych i wypłukiwanie rozpuszczalnych produktów rozkładu;
- szybkie wypieranie z glebowego kompleksu sorpcyjnego kationów zasadowych i wypłukiwanie ich poza profil glebowy;
- niekorzystne zmiany biologicznej aktywności gleby (mikroflory i fauny) prowadzące do znacznego spowolnienia procesów humifikacji i mineralizacji substancji organicznej;
- zaburzenia w pobieraniu wody i mineralnym odżywianiu roślin (Prusinkiewicz, Pokojka 1989).

Tabela 2. Zakresy buforowe gleb i ich charakterystyka (Ulrich i in. 1979, Puchalski, Prusinkiewicz 1990).

Bufor	Zakres buforowania pH	Pojemność buforowa 10-cm warstwy gleby o gęstości objętościowej $1,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ i powierzchni 1 ha	Ograniczenie wzrostu
węglanowy	6,2-8,6	150-300 kmol H^+ na 1% $CaCO_3$	małe przez duży stosunek Ca^{2+}/K^+ i przewagę anionów
krzemianowy	5,0-6,2	przeciętnie 25 kmol H^+ na 1% krzemianów	nie ma ograniczeń spowodowanych czynnikami glebowymi
wymiany jonowej	4,2-5,0	zależy od pojemności wymiennej kationowej gleby i stopnia wysycenia kompleksu sorpcyjnego zasadami, ale przeciętnie 7 kmol H^+ na 1% ładu	ograniczenie dla gatunków nietolerancyjnych na Al; wykluczenie gatunków wapnolubnych
glinowy	3,0-4,2	przeciętnie 100-150 kmol H^+ na 1% frakcji ilastej	toksyczny wpływ Al^{3+} na wszystkie rośliny; ograniczenie wzrostu gatunków niewapnolubnych, w tym buka, świerka, sosny
żelazowy	$\leq 3,0$	270 kmol H^+ na 1% Fe (ulegającego ekstrakcji w roztworze podsiarczynu sodu)	toksyczny wpływ Al-Fe na wszystkie rośliny; przeżywają tylko rośliny ukorzeniające się w ściółce

W niektórych silnie uprzemysłowionych rejonach Polski, mimo wysokiego poziomu emisji substancji zakwaszających, „kwaśne deszcze” nie występują. Wynika to z obecności substancji alkalicznych w pyłach emitowanych głównie przez cementownie, zakłady wapiennicze i magnezytowe, a także w mniejszym stopniu przez zakłady azotowe (mocznik),

przemysł energetyczny (popioły po spaleniu węgla) oraz hutnictwo (tlenki metali). Oddziaływanie emisji pyłów alkalicznych na zakwaszone gleby przypomina zabieg wapnowania, bowiem pyły alkaliczne, neutralizując kwasowość zwiększają biologiczną aktywność gleb, przyspieszają rozkład glebowej materii organicznej, a także uwalniają z niej substancje odżywcze, które stają się łatwiej przyswajalne dla roślin. Jednak długotrwałe oddziaływanie pyłów alkalicznych, podobnie jak tych zawierających substancje zakwaszające, jest negatywne i w konsekwencji może prowadzić do niekorzystnych zmian ilościowych i jakościowych związków próchnicznych oraz zmian składu frakcyjnego próchnicy, pogorszenia fizykochemicznych i biologicznych właściwości gleby, ogólnego upośledzenia funkcjonowania środowiska glebowego oraz przekształceń w strukturze ilościowej i jakościowej zbiorowisk leśnych (Drozd i Kowaliński 1977, Puchalski i Prusinkiewicz 1990, Świercz 1999).

Emitowane pyły przemysłowe poza substancjami alkalicznymi zawierają również metale ciężkie (Cd, Pb, Zn, As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, V) oraz mutagenne i genotoksyczne WWA. Najbardziej zasobne w metale ciężkie są najdrobniejsze frakcje pyłów, łatwo przemieszczane na dalekie odległości od źródeł emisji. Technogeniczne metale ciężkie zdeponowane na powierzchni gleby reagują z jej mineralnymi i organicznymi składnikami oraz podlegają bioakumulacji, wywołując w komórkach roślinnych zakłócenia procesów metabolicznych (Kabata-Pendias 1986). Metale ciężkie pochodzące z emisji przemysłowych, w zależności od właściwości gleby, występują w formie jonowej (będąc łatwo dostępnymi dla roślin) lub ulegają unieruchamianiu w glebie w procesach adsorpcji, w reakcjach kompleksowania z próchnicą lub wytrącania w postaci związków trudno rozpuszczalnych. Im gleba jest bogatsza w koloidy mineralne i organiczne, tym skuteczniej wiąże substancje toksyczne. Jednak zdolność gleby do zatrzymywania i unieszkodliwiania wielu substancji toksycznych jest często wyolbrzymiana. Na glebę patrzy się czasem wyłącznie jako na skuteczną warstwę ochronną dla warstw głębszych, w szczególności dla wód podziemnych. Doceniając jej rolę, należy brać pod uwagę fakt, iż zatrzymywane, głównie w poziomie organicznym i próchniczno-mineralnym gleb, substancje w jakiś sposób zatrzymują ją samą, a zmiana warunków fizykochemicznych (np. zakwaszenie gleby) może doprowadzić do ponownego uruchomienia substancji toksycznych (Bednarek i in. 2004).

Żelazo, będące składnikiem większości pyłów, występuje w postaci minerałów ferrimagnetycznych (magnetyt, maghemit), o których obecności świadczy podwyższona wartość podatności magnetycznej różnego rodzaju pyłów (Strzyszczyk i Magiera 2000). Emisje pyłowe zawierające cząstki magnetyczne powodują wzrost podatności magnetycznej górnej

warstwy gleby i dlatego podatność magnetyczna stała się w ostatnich latach parametrem umożliwiającym detekcję zanieczyszczeń pyłowych (zawierających technogeniczne metale ciężkie) w glebach (Strzyszc 1993). Oczywiście, źródłem metali ciężkich występujących w glebach są nie tylko imisje przemysłowe, ale także procesy geo- i pedogeniczne. Dlatego istotne jest rozróżnienie między udziałem jednych i drugich.

Na podstawie wartości podatności magnetycznej można określić stopień zagrożenia gleb przez imisje ferrimagnetyków oraz stwierdzić istnienie i rozmiar anomalii magnetycznych, których wyznacznikiem są podwyższone wartości podatności magnetycznej, z reguły przekraczające wartość 30×10^{-5} jednostek SI lub $50 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$. Badania wykazały, że anomaliiom magnetycznym prawie zawsze towarzyszą anomalie geochemiczne, o których świadczą wysokie zawartości metali ciężkich (przekraczające wartości charakterystyczne dla tła geochemicznego danego obszaru – w przypadku anomalii o charakterze naturalnym lub wartości graniczne – w przypadku anomalii pochodzenia technogenicznego), zwłaszcza ołowiu, składnika o wyraźnie technogenicznym pochodzeniu (Strzyszc i Magiera 2003, Strzyszc 2004).

Metoda magnetometrii terenowej oparta na pomiarach podatności magnetycznej górnej warstwy gleb *in situ*, ze względu na prostotę, dokładność i szybkość pomiarów, zasługuje na szerokie zastosowanie w określaniu miejsc potencjalnych zagrożeń gleb przez zanieczyszczenie metalami ciężkimi, a także w monitoringu gleb. Odpowiednia interpretacja rozkładu wartości podatności magnetycznej górnej warstwy gleby umożliwia szacunkowe określenie wielkości i zasięgu przestrzennego depozycji zanieczyszczeń pyłowych oraz występujących w nich cząstek magnetycznych i związanych z nimi metali ciężkich. Metoda ta zastosowana w monitoringu gleb pozwoli na zmniejszenie jego kosztów poprzez ograniczenie liczby kosztownych analiz zawartości metali ciężkich w glebie tylko do miejsc stwierdzonych anomalii magnetycznych.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Podstawy magnetyzmu środowiska

Magnetyzm środowiska obejmuje zjawiska i procesy, których przedmiotem są cząsteczki magnetyczne, czyli wszystkie procesy, podczas których cząstki te powstają, są transportowane, osadzane, czy też przekształcane (Thompson i Oldfield 1986). Magnetyzm środowiska jako nauka bada właściwości magnetyczne różnych materiałów, substancji występujących w przyrodzie, m.in. skał, gleb, osadów i pyłów, wykorzystując parametry pierwotnie stosowane w geofizyce. Zastosowanie metod geofizycznych pomaga śledzić naturalne procesy zachodzące w przyrodzie, jak wietrzenie i erozja gleb, czy sedymentacja jeziorna oraz morska, a także określić pochodzenie cząstek magnetycznych (naturalne lub antropogeniczne) w glebach, osadach i pyłach.

Wszystkie substancje w różnym stopniu reagują na pole magnetyczne i w zależności od wielkości namagnesowania po usunięciu przyłożonego pola magnetycznego dzielimy je na diamagnetyki, paramagnetyki i ferromagnetyki (ferromagnetyki *sensu stricte*, ferrimagnetyki, antyferromagnetyki i antyferrimagnetyki).

Diamagnetyzm jest podstawową właściwością magnetyczną ciał i wiąże się z budową atomu. Momenty magnetyczne elektronów, krążących wokół jądra oraz ich momenty własne składają się na wypadkowy moment magnetyczny atomu. Atomy, bądź cząsteczki ciał diamagnetycznych mają wypadkowy moment magnetyczny równy zeru, a ich podatność magnetyczna κ jest niska (10^{-6}) i ujemna. Do najpowszechniejszych diamagnetyków należy woda, kwarc, halit, skalenie, kalcyt oraz minerały nie zawierające w swoim składzie żelaza (Thompson i Oldfield 1986). Namagnesowanie substancji diamagnetycznej jest proporcjonalne do natężenia pola magnetycznego, w którym się ona znajduje, nie zależy od temperatury i jest zawsze bardzo słabe (Westphal 1993).

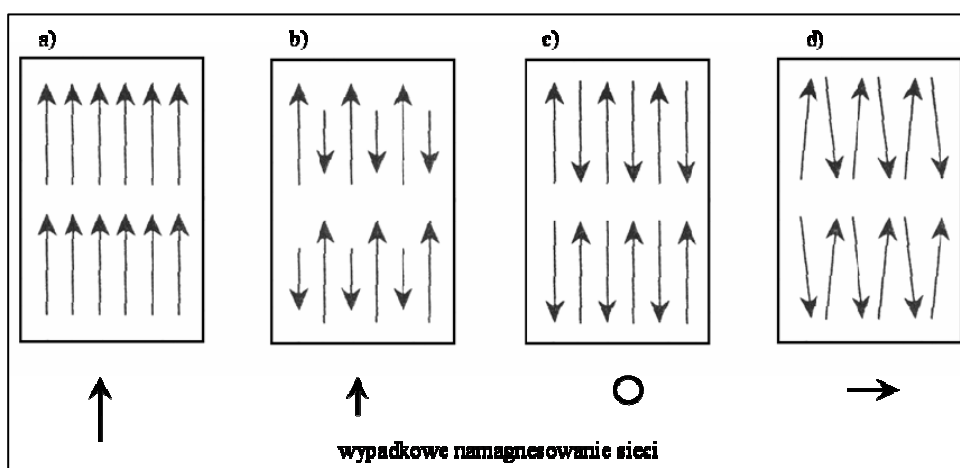
Paramagnetyzm związany jest z kolei z momentem magnetycznym cząsteczek. Przy braku pola magnetycznego wypadkowy moment magnetyczny ciała jest równy zeru. Jednak w obecności pola magnetycznego momenty magnetyczne cząsteczek ustawiają się w kierunku pola. Wskutek tego powstaje wypadkowy moment zgodny z kierunkiem przyłożonego pola oraz słabe dodatnie namagnesowanie, które maleje ze wzrostem temperatury. Paramagnetykami są minerały ilaste, biotyty, oliwiny oraz większość minerałów zawierających żelazo (Westphal 1993, Dunlop i Özdemir 1997).

W przypadku diamagnetyków i paramagnetyków namagnesowanie zanika po usunięciu pola. Natomiast ferromagnetyki posiadają silne namagnesowanie szczątkowe

pozostające po wyłączeniu przyłożonego pola magnetycznego. U ferromagnetyków obserwuje się ponadto zjawisko pozostałości magnetycznej (Thompson i Oldfield 1986).

Ferromagnetyzm jest spowodowany sprzężeniem między jonami, którego rezultatem jest równoległe uporządkowanie spinów, wystarczające do przewyższenia ruchów termicznych. W miarę wzrostu temperatury drgania cieplne są coraz większe, aż w pewnej temperaturze ich wpływ zaczyna przewyższać siły porządkujące związane ze sprzężeniem magnetycznym. Uporządkowanie magnetyczne znika i substancja staje się paramagnetykiem. Temperatura, w której znika uporządkowanie ferromagnetyczne nazywa się punktem Curie lub temperaturą Curie. Podczas chłodzenia substancji w zewnętrznym polu magnetycznym uzyskuje ona ponownie uporządkowanie magnetyczne w tej samej temperaturze i staje się ferromagnetykiem (Westphal 1993).

Rozróżniamy cztery podstawowe typy uporządkowania momentów magnetycznych, określane wspólną nazwą ferromagnetyzmu: ferro-, ferri-, antyferro- i antyferrimagnetyczne (Rys. 1).



Rysunek 1. Schemat uporządkowania momentów magnetycznych w substancji: a) ferromagnetycznej, b) ferrimagnetycznej, c) antyferromagnetycznej i d) antyferrimagnetycznej (Lowrie 1997).

Uporządkowanie ferromagnetyczne (Rys. 1a) charakteryzuje się tym, że wszystkie jony magnetyczne są identyczne i istnieje między nimi sprzężenie dodatnie; wszystkie momenty magnetyczne są równoległe i mają ten sam zwrot. Przykładem substancji ferromagnetycznej jest żelazo metaliczne oraz substancje zawierające kobalt, nikiel, platynę lub pierwiastki ziem rzadkich (Westphal 1993).

W przypadku ferrimagnetyków jony magnetyczne nie są identyczne i zajmują różne położenia w sieci krystalograficznej, tworząc dwie podsieci. Wewnątrz każdej podsieci panuje sprzężenie dodatnie, a pomiędzy podsieciami – ujemne. Momenty magnetyczne jonów

w obu podsieciach mają te same kierunki i przeciwne zwroty (Rys. 1b). Do naturalnych ferrimagnetyków zalicza się magnetyt Fe_3O_4 i maghemit $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$.

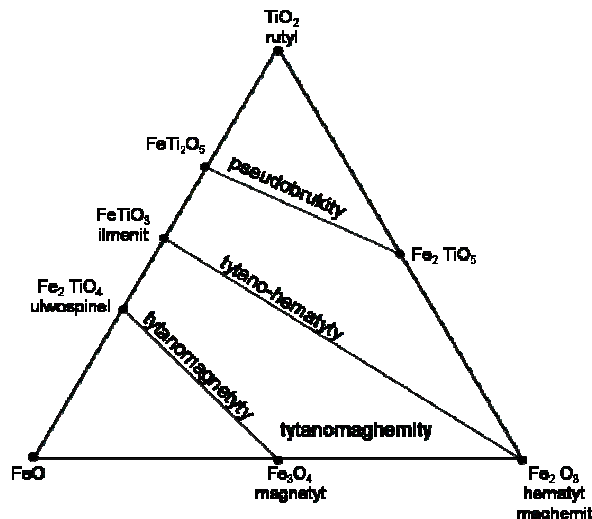
Antyferromagnetyki mają identyczne jony magnetyczne, ale zwroty momentów magnetycznych kolejnych jonów są przeciwne (Rys. 1c). Makroskopowo momenty magnetyczne są skompensowane i substancja o takim uporządkowaniu nie ma pozostałości magnetycznej.

Antyferrimagnetyki (zwane też niedoskonałymi antyferromagnetykami), do których zalicza się hematyt $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, są modyfikacją antyferromagnetyków spowodowaną odchyleniem spinów względem siebie (Cornell i Schwertmann 1996). Zaburzenia sieci krystalicznej substancji antyferrimagnetycznej powodują powstanie spontanicznego namagnesowania sieci krystalicznej (Rys. 1d).

Każda skała stanowi zespół minerałów dia-, para- i ferromagnetycznych wykształconych w formie mniejszych lub większych ziaren. Znaczenie składników dia- i paramagnetycznych jest przeważnie zanedbywane, gdyż nie wnoszą one żadnego wkładu do pozostałości magnetycznej. Istotne ze względu na własności magnetyczne są minerały ferromagnetyczne. Należą do nich między innymi: żelazo, tlenki żelaza (magnetyt, ilmenit, tytanomagnetyty, ulwospinel, maghemit), getyt oraz pirotyn.

Metaliczne żelazo występuje tylko w meteorytach i niektórych skałach księżycowych. Tlenki żelaza to najliczniejsze minerały magnetyczne, które można przedstawić za pomocą kombinacji trzech związków FeO , Fe_2O_3 i TiO_2 w formie ich trójkątnego diagramu (Rys. 2). Każdy punkt wewnątrz diagramu jest zdefiniowany przez skład molowy elementów tworzących daną ich kombinację. Wyróżnia się trzy główne rodziny minerałów:

- tytanomagnetyty (stechiometryczne) o strukturze ferrimagnetycznej, leżące wzdłuż linii magnetyt-ulwospinel, czyli $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{TiO}_4$, są podstawowymi minerałami magnetycznymi bazaltów;
- tytano-hematyty, in. tytano-ilmenity lub hemo-ilmenity (stechiometryczne) o własnościach antyferromagnetycznych, leżące wzdłuż linii hematyt-ilmenit, czyli $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeTiO}_3$, występują w riolitach i ignimbrytach, a także w niektórych skałach osadowych (piaskowce, czerwone iły);
- niestechiometryczne tytanomagnetyty, zwane też tytanomaghemitami, usytuowane pomiędzy w/w dwoma liniami, są niestabilne i pod wpływem temperatury łatwo zmienia się ich uporządkowanie magnetyczne z ferrimagnetycznego na antyferromagnetyczne; występują czasem w bazaltach, zwłaszcza oceanicznych (Westphal 1993).



Rysunek 2. Trójkąt FeO-Fe₂O₃-TiO₂ i różne szeregi tlenków magnetycznych żelaza i tytanu (Thomson i Oldfield 1986).

Innymi minerałami magnetycznymi są wodorotlenki żelaza, np. powszechnie spotykany w osadach i pewnych produktach wietrzenia antyferromagnetyczny getyt (αFeOOH), który wskutek dehydratacji ulega przemianom w hematyt. Lepidokrokit (γFeOOH) jest mniej powszechny niż getyt i po ogrzaniu przekształca się w maghemit.

Kolejną grupę stanowią siarczki żelaza, spośród których najpopularniejszy piryt (FeS_2) jest paramagnetykiem w temperaturze pokojowej, a pirotyn (Fe_7S_8) jest ferrimagnetykiem spotykanym często w pewnych osadach, szczególnie w marglach oraz szarych i zielonych wapieniach. Greigit (Fe_3S_4) ma strukturę pośrednią między pirytem a pirotynem. Dell (1972), Snowball i Thompson (1988) oraz Hallam i Maher (1994) zidentyfikowali go w osadach słodkowodnych, a Fassbinder i Stanjek (1994) w glebie.

Obecne w skale, czy glebie minerały magnetyczne występują w formie ziaren różnej wielkości rozproszonych w para- lub diamagnetycznej matrycy. Wielkość ziarna determinuje jego właściwości magnetyczne. Bardzo małe ziarna minerałów ferromagnetycznych, określane mianem ziaren jednodomenowych (SD), składają się tylko z jednej domeny (małego obszaru spontanicznego jednorodnego namagnesowania) i ulegają spontanicznemu namagnesowaniu w jednym uprzywilejowanym kierunku, w którym procesy namagnesowania przebiegają łatwiej niż w innych. Natomiast w ziarnach większych (od kilkudziesięciu μm do kilku mm) następuje podział na domeny, zwane domenami Weissa i są one ziarnami wielodomenowymi (MD). Pozostałość magnetyczna ziarna jednodomenowego jest o wiele wyższa niż wielodomenowego (Thompson i Oldfield 1986). Różnią się również przebiegi zależności namagnesowania ziarna jedno- i wielodomenowego od natężenia pola

magnetycznego, czyli tzw. pętle histerezy (symetryczne krzywe, z których przebiegu można odczytać wartości parametrów histerezy charakteryzujące ziarna magnetyczne: namagnesowanie nasycenia, namagnesowanie resztkowe, koercja, koercja pozostałości).

W przypadku ferro- lub ferrimagnetycznych ziaren o niezwykle małej średnicy (ok. 0,001-0,01 μm), na skutek ich ruchów termicznych pozostałość magnetyczna jest nietrwała i jej zwrot ulega ciągłym zmianom. W obecności zewnętrznego pola magnetycznego uzyskują one tzw. pozorne namagnesowanie. Takie ultra drobne ziarna określane są superparamagnetykami (SP), ponieważ ich zachowanie w polu magnetycznym przypomina paramagnetyki (Néel 1955, Vlasov i in. 1967).

W geofizyce własności cząstek magnetycznych charakteryzowane są przez szereg parametrów, ale w przypadku mineralogicznych badań magnetycznych środowiska najbardziej przydatnym parametrem jest podatność magnetyczna. Wartość podatności odzwierciedla zawartość ferro- i ferrimagnetyków w badanej substancji. Gdy jest wysoka wskazuje na obecność magnetytu i maghemitu (Cornell i Schwertmann 1996, Maher 1998, Peters i Thompson 1998), których podatność magnetyczna jest nawet 1000 razy większa od podatności innych tlenków żelaza (Tab. 3).

Tabela 3. Specyficzna podatność magnetyczna różnych substancji (Thompson i Oldfield 1986).

Ferromagnetyki		Paramagnetyki		Diamagnetyki	
$(10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1})$					
żelazo metaliczne	20 000 000	oliwiny	1→130	woda	- 0,9
magnetyt	50 000	amfibole	16→100	halit	- 0,9
maghemit	40 000	syderyt	~100	kwarc	- 0,6
pirotyn	~5 000	pirokseny	5→100	kalcyt	- 0,5
ilmenit	~200	biotyty	5→ 95	skaleń	- 0,5
lepidokrokity	70	nontronit (utleniony)		kaolinit	-2
getyt	70	chloryt)	~90	montmorylonit	~ 5
hematyt	60	epidot	~90	illit	~ 1,5
		piryt	~30	plastiki	~- 0,5
		chalkopiryt	~ 3		

Podatność magnetyczna jest wielkością fizyczną określającą łatwość, z jaką dana substancja ulega namagnesowaniu pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego.

Objętościowa (in. początkowa) podatność magnetyczna (κ) definiowana jest jako stosunek objętościowego namagnesowania M indukowanego w materiale przez pole magnetyczne o natężeniu H : $\kappa = M/H$ [$\text{Am}^{-1}/\text{Am}^{-1}$], przy czym κ w układzie SI jest wielkością bezwymiarową. W przypadku pomiarów laboratoryjnych, alternatywnie operuje się specyficzną podatnością magnetyczną (χ), która określana jest jako stosunek objętościowej podatności magnetycznej κ i gęstości właściwej substancji ρ i wyrażana jest w $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$.

W niskich polach podatność magnetyczna nie zależy od natężenia przyłożonego pola magnetycznego, dlatego jest przeważnie mierzona w polach znacznie poniżej 1 mT (tesla – jednostka indukcji magnetycznej). Podatność magnetyczna w niskich polach zmienia się w zależności od częstotliwości pola magnetycznego. Bhattachal i Stacey (1969) stwierdzili, że podatność magnetyczna wielodomowych ziaren magnetytu tylko nieznacznie maleje ze wzrostem częstotliwości. Inaczej jest w przypadku ultra drobnych ziaren superparamagnetyków (SP – o ϕ ok. 0,001 - 0,01 μm), które na wzrost częstotliwości reagują spadkiem podatności. Wystarczy pomiar podatności magnetycznej w dwóch częstotliwościach (np. 0,465 i 4,65 kHz), by wykryć obecność superparamagnetyków, tworzących się głównie w procesach pedogenicznych jako produkt metabolizmu bakterii magnetostatycznych (Lovely i in. 1987). Współczynnik zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}) określany jest jako zmiana podatności magnetycznej przy dziesięciokrotnym wzroście częstotliwości pola magnetycznego, podzielona przez podatność magnetyczną zmierzoną przy niskiej częstotliwości pola. χ_{FD} wyraża się w %, a jego wartość wynosi zaledwie kilka % dla cząstek magnetycznych pochodzenia antropogenicznego, zawartych w pyłach przemysłowych i popiołach lotnych deponowanych na powierzchni gleby, natomiast dla ziaren pochodzenia naturalnego (superparamagnetyków) osiąga wartości powyżej 5% (Dearing i in. 1996).

Podatność magnetyczna minerałów magnetycznych zmienia się również wraz z temperaturą. Pomiar zależności podatności lub namagnesowania od temperatury pozwala wykryć zmiany mineralogiczne spowodowane procesem rozmagnesowania termicznego oraz określić punkt krytyczny, zwany temperaturą Curie, powyżej którego ferromagnetyk gwałtownie traci swoje właściwości magnetyczne i staje się paramagnetykiem. W temperaturze niższej od temperatury Curie dipole magnetyczne atomów lub cząsteczek ustawione są w jednym kierunku tworząc domeny ferromagnetyczne. W temperaturze powyżej temperatury Curie drgania cieplne sieci krystalicznej niszczą ustawienia dipoli magnetycznych. Punkt (temperatura) Curie jest charakterystyczny dla poszczególnych minerałów magnetycznych. W tabeli 4 podano wartości punktu Curie dla niektórych minerałów.

Tabela 4. Wartości temperatury Curie (°C) dla minerałów posiadających pozostałość magnetyczną (Thompson i Oldfield 1986).

Minerał	Wzór chemiczny	Temperatura Curie (°C)
magnetyt	Fe_3O_4	585
ulwospinel	Fe_2TiO_4	-153
hematyt	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	675
ilmenit	FeTiO_3	-218
maghemit	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	~740
pirotyn	$\sim\text{Fe}_7\text{S}_8$	~300
żelazo metaliczne	αFe	780
getyt	$\alpha\text{FeO.OH}$	120
lepidokrokit	$\gamma\text{FeO.OH}$	-196

2.2. Przegląd badań nad podatnością magnetyczną pyłów przemysłowych i gleb

Badania podatności magnetycznej gleb zostały zapoczątkowane w latach 50-tych XX wieku przez Le Borgne'a (1955), który jako pierwszy zaobserwował wzrost podatności („wzmocnienie”) w powierzchniowych poziomach gleb w stosunku do poziomów niżej leżących, przypisując go powstawaniu wtórnych tlenków ferrimagnetycznych we frakcjach ilastych gleby. Pięć lat później zauważył on podobne „wzmocnienie magnetyczne” na powierzchni gleb po pożarach lasów (Le Borgne 1960). Inni badacze (Mullins 1974, Mullins i Tite 1973) wykorzystali magnetyczne właściwości gleb do badań archeologicznych. W byłym Związku Radzieckim badania podatności magnetycznej gleb prowadzono już w 1968 roku, a ich celem było wyjaśnienie różnic w jej wielkości w zależności od typu gleby i strefy klimatycznej, w której one występują (Łukszin i in. 1968, Vadyunina i Babanin 1972, Babanin 1973, Vodyanickiy 1981). Główną rolę w kształtowaniu podatności magnetycznej gleb przypisywano procesom glebotwórczym, a sferycznym cząstkom – pochodzenie biologiczne (Glebowa 1984). Badania gleb, a także emisji Obwodu Jarosławskiego pozwoliły na stwierdzenie, że znaczna część tych cząstek pochodzi z atmosfery oraz „że antropogeniczny wnos substancji w powierzchniowe warstwy ziemi już w najbliższym czasie będzie w sposób istotny zmieniać te procesy, które w nich przebiegają. Zachodzi konieczność ich uwzględnienia we współczesnych badaniach gleb” (Babanin i in. 1995, Strzyszczyński i in. 2005).

W 1977 roku Mullins określił cztery sposoby formowania w glebie maghemitu, minerału odpowiedzialnego za „wzmocnienie magnetyczne”. Stwierdził, że nie wiadomo, który z mechanizmów (utlenianie magnetytu, pożary, dehydratacja lepidokrokitu, czy utlenianie–redukcja tlenków żelaza przy udziale mikroorganizmów) i w jakim stopniu wpływa na wzrost podatności magnetycznej gleby. Najczęściej jest on efektem działania kilku z nich jednocześnie. Ponadto, w rejonach przemysłowych ma na nie olbrzymi wpływ opad cząstek magnetycznych z atmosfery, które powstają w procesach spalania paliw kopalnych oraz innych procesach przemysłowych. Thompson i Oldfield (1986) zwrócili uwagę na kulisty kształt cząstek magnetycznych pochodzenia antropogenicznego powodujących silne „wzmocnienie” podatności magnetycznej torfowisk wysokich w rejonach przemysłowych północnej Anglii. Obecność podobnych kulistych cząstek technogenicznego pochodzenia wykazali 10 lat wcześniej Doyle i in. (1976) w osadach dennych Zatoki Meksykańskiej oddalonych o setki kilometrów od potencjalnych źródeł emisji przemysłowych. W Zatoce Elefsis, blisko Aten, w sąsiedztwie hut żelaza i stali badano osady denne do głębokości 1 m.

W górnych poziomach osadów stwierdzono wysokie wartości podatności magnetycznej, które malały wraz z odległością od źródeł zanieczyszczeń (Scoullou i in. 1979). Wzrost zawartości ferromagnetycznych form żelaza w glebach uprawnych w rejonie oddziaływania huty żelaza stwierdził również Strzyszczyk i in. (1988), określając jednocześnie ich zawartość w pyłach hutniczych. Przytoczone wyniki badań wskazywały na istnienie powiązań między wzrostem podatności magnetycznej gleb a emisjami przemysłowymi. Dlatego wielu badaczy (m.in.: Ondov i in. 1979, Hansen i in. 1981, Hullet i in. 1981, Lauf i in. 1982, Strzyszczyk i in. 1988, Strzyszczyk 1993, Strzyszczyk i Magiera 2000) podjęło próby identyfikacji i charakterystyki magnetycznej pyłów przemysłowych z różnych gałęzi przemysłu.

Wśród pyłów przemysłowych pyły metalurgiczne hutnictwa żelaza, metali kolorowych oraz odlewnictwa są najbogatsze w takie ferro-, ferri- lub antyferromagnetyki, jak żelazo metaliczne, magnetyt, maghemit, różne ferryty, a także hematyt i inne związki żelaza (krzemiany, siarczany). Ferromagnetykom z reguły towarzyszą metale ciężkie zawarte w rudach oraz w dodawanych w procesach hutniczych topnikach (np. dolomity bogate w Zn i Pb). Pyły metalurgiczne związane z hutnictwem żelaza, w porównaniu z innymi pyłami przemysłowymi, cechuje najwyższa podatność magnetyczna, osiągająca wartości ponad $13\ 000 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ (Tab. 5). Tak wysoka podatność magnetyczna pyłów metalurgicznych jest wynikiem wysokiej zawartości magnetytu i maghemitu oraz o żelaza metalicznego ($\alpha\text{-Fe}$) (Strzyszczyk i Magiera 1993, 1994, 2000), pochodzących z magnetytowych rud żelaza wykorzystywanych w procesach metalurgicznych, a także innych związków żelaza, które powstają w wysokich temperaturach w czasie procesów produkcyjnych. Z badań Jarzębskiego i Kapały (1976) wynika, że większość ferromagnetyków występuje tu we frakcji 50 - 600 μm , co uniemożliwia transport tych cząstek na duże odległości. Strzyszczyk i in. (1996) analizowali pyły metalurgiczne, wykorzystując takie parametry magnetyczne jak zależność częstotliwościowa podatności magnetycznej, namagnesowanie resztkowe, namagnesowanie nasycenia oraz temperatura Curie. Potwierdzili oni obecność w pyłach metalurgicznych wielodomenowych ziaren magnetytu i maghemitu oraz ziaren magnetycznych, będących mieszaniną tych dwóch minerałów.

Tabela 5. Podatność magnetyczna pyłów przemysłowych i popiołów lotnych (Strzyszczyk 1993).

Rodzaj pyłu	Ilość próbek	Podatność magnetyczna ($\times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)		
		minimalna	maksymalna	średnia
Metalurgiczny	12	21	45816	13776
Cementowy	18	9	1620	363
Popiół lotny po spalaniu węgla kamiennego	35	666	3605	2006
Popiół lotny po spalaniu węgla brunatnego	7	508	1602	1047
Koksowniczy	43	80	1165	368

Oprócz hutnictwa żelaza, źródłem emisji do atmosfery cząstek magnetycznych jest także hutnictwo metali nieżelaznych. Cząstki te powstają w trakcie wysokotemperaturowych procesów hutniczych z paramagnetycznych minerałów żelaza występujących akcesorycznie w surowcach. Pyły emitowane przez hutnictwo metali nieżelaznych cechują jednakże niższe wartości podatności magnetycznej, spowodowane obecnością stosunkowo dużych ziaren, tj. multidomen magnetytowych i hematytowych. Ich źródłem są występujące w rudach siarczki żelaza oraz innych metali (Strzyszc 1993, Magiera 2004).

Najistotniejszym źródłem emisji cząstek magnetycznych jest jednakże spalanie paliw stałych. Obecny w węglu kamiennym piryt framboidalny utlenia się w procesie spalania do ferrimagnetycznych tlenków żelaza (Lauf i in. 1982). Cząstki emitowane przez energetykę charakteryzują się dużym zróżnicowaniem pod względem wielkości i z tego względu dzieli się je na pyły energetyczne (cząstki $> 40 \mu\text{m}$), popioły lotne (cząstki o wymiarach $10\text{-}40 \mu\text{m}$) oraz aerozole (cząstki $< 10 \mu\text{m}$) (Koniecznyński 1982).

Popioły lotne są najlepiej poznanymi źródłami technogenicznych cząstek magnetycznych, wywołujących podatność magnetyczną popiołów o wartości rzędu $2000 - 3000 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ przy spalaniu węgla kamiennego i $1000 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ przy spalaniu węgla brunatnego (Tab. 5), przy czym wartości te mogą być czasem 3–4 krotnie wyższe, w zależności od rodzaju i jakości spalanego węgla oraz od warunków spalania.

Głównymi źródłami ferromagnetyków w popiołach są:

- magnetyt zawarty w węglu, średnio do około 1,5% (Kuhl 1961);
- siarczki żelaza zawarte w węglu, które w procesie spalania ulegają przekształceniom w magnetyczne formy żelaza (Lauf i in. 1982);
- magnetyt wykorzystywany w procesach flotacji węgla oraz przechodzący częściowo do popiołów po spalaniu (Strzyszc i Magiera 2000).

Mineralogia cząstek magnetycznych w popiołach lotnych jest bardzo zróżnicowana. W pyłach GOP dominują krystaliczne (hematyt, magnetyt, wustyt) i amorficzne tlenki żelaza, przyjmujące kształt ostrokrawędzisty w przypadku form krystalicznych i kulisty dla amorficznych, posiadające najczęściej chropowate powierzchnie. Analiza składu fazowego pyłów wykazała również obecność żelaza metalicznego, spineli oraz ilmenitu (Jabłońska 2003). Rozmiary większości cząstek ferrimagnetycznych w popiołach lotnych różnią się w zależności od źródła emisji (jakości spalanego węgla, technologii spalania). Rozmiary cząstek popiołów lotnych z elektrowni angielskich nie przekraczały $20 \mu\text{m}$ (Wedge i in. 1986), z elektrowni czeskich opalanych węglem brunatnym wahały się od 2 do $10 \mu\text{m}$ (Petrovský i Ellwood 1999), a z polskich elektrowni (np. „Jaworzno III” i „Siersza”) mieściły

się w przedziale 2-50 μm (Strzyszczyk i in. 1996), czasem jednak ich średnice miały powyżej 60 μm (Jabłońska 2003). Częstkom magnetycznym popiołów lotnych, zwłaszcza tym najdrobniejszym, często towarzyszą metale ciężkie (Strzyszczyk i in. 1996, Strzyszczyk i Magiera 1996, 1998, Magiera i in. 1998). Hullet i in. (1981) zidentyfikował inny składnik popiołów lotnych: ferryt glinu ($\text{Fe}_{2,3}\text{Al}_{0,7}\text{O}_4$). Obecność ferrytów wapniowych i magnezowych potwierdził również Strzyszczyk i in. (1996) oraz Jabłońska (2003). Okazało się, że w strukturze ferrytu MeFe_2O_3 (Mn, Ni, Co, Zn, Mg, Cd, Cu) – część jonów żelaza może być podstawiana przez inne metale.

Większość cząstek magnetycznych emitowanych na znaczne odległości od źródeł emisji występuje we frakcji aerozolowej. W obrębie frakcji magnetycznej emitowanej przez elektrownię „Jaworzno III” cząstki te stanowią ok. 50% (Koniecznyński 1982, Strzyszczyk i in. 1996). Badania Dedika i in. (1992) wykazały, że 85% żelaza w aerozolach przemysłowych występuje w formie jonowej (Fe^{3+} – 75% i Fe^{2+} – 9%). Jony Fe^{2+} powstają w wyniku redukcji jonów Fe^{3+} w roztworze zawieszonym oraz rozpuszczenia związków Fe^{2+} obecnych w fazie stałej aerozoli. Z form mineralogicznych dominuje magnetyt (7,6%), hematyt (5,5%) i getyt (2,4%).

Emisje pyłów cementowych, podobnie jak metalurgicznych, biorąc pod uwagę ich granulację i wysokość kominów, mają znaczenie lokalne. Cechują je najniższe wartości podatności magnetycznej, wahające się w zakresie $9 - 1600 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ (Tab. 5). Wynika to z obecności magnetytu (0,04 – 0,63%), występującego głównie w fazie krystalicznej pyłów cementowych i różnego rodzaju ferrytów wapniowych (Gołuchowska 1996, Strzyszczyk 1995). Duże rozbieżności wartości podatności magnetycznej spowodowane są różną zawartością magnetytu w surowcach (wapienie, margle i ily), a także w pyłach metalurgicznych stosowanych jako dodatki żelazonośne do mieszanin surowcowych, z których wypalany jest klinkier. Wzrost zawartości żelaza w surowcach, dodatkach i paliwach wprowadzanych do pieców obrotowych oraz tlenku węgla w gazie piecowym sprzyja powstawaniu minerałów o cechach ferrimagnetycznych. Może to prowadzić do zwiększenia podatności magnetycznej i zawartości metali ciężkich w emitowanych pyłach (Gołuchowska i Strzyszczyk 1999).

Przemysł koksochemiczny również należy zaliczyć do ważnych źródeł emisji ferrimagnetyków oraz metali ciężkich. Na podwyższone wartości podatności magnetycznej pyłów koksowniczych wpływa pirotyn, którego podatność magnetyczna ($5000 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ustępuje tylko wartościom podatności magnetycznej magnetytu i maghemitu. Ferrimagnetyczny pirotyn tworzy się w wyniku transformacji paramagnetycznego piryty

w procesie koksowania węgla w warunkach redukcyjnych i przy wysokiej temperaturze (ok. 1000°C) (Flanders 1994).

Pyły emitowane przy produkcji cegły i materiałów ceramicznych również zawierają ferrimagnetyczne tlenki żelaza, powstające w trakcie wypalania ilów ceramicznych, w których składzie obecne są paramagnetyczne minerały żelaza (Strzyszczyński 1999).

Do innych źródeł ferrimagnetyków antropogenicznych zaliczyć należy spalanie odpadów komunalnych, emitujące pyły o pewnej zawartości magnetytu, hematytu, ilmenitu i ulwospinelu (Hundersrügge 1990), a także składowanie odpadów przemysłowych (Jordanova i in. 2006), spalanie węgla w paleniskach domowych (tzw. niska emisja) oraz transport samochodowy, który emituje pyły nie tylko w wyniku spalania paliwa, ale także ze ścierania się opon i okładzin hamulcowych (Knab i in. 2001, Muxworthy i in. 2003, Goddu i in. 2004).

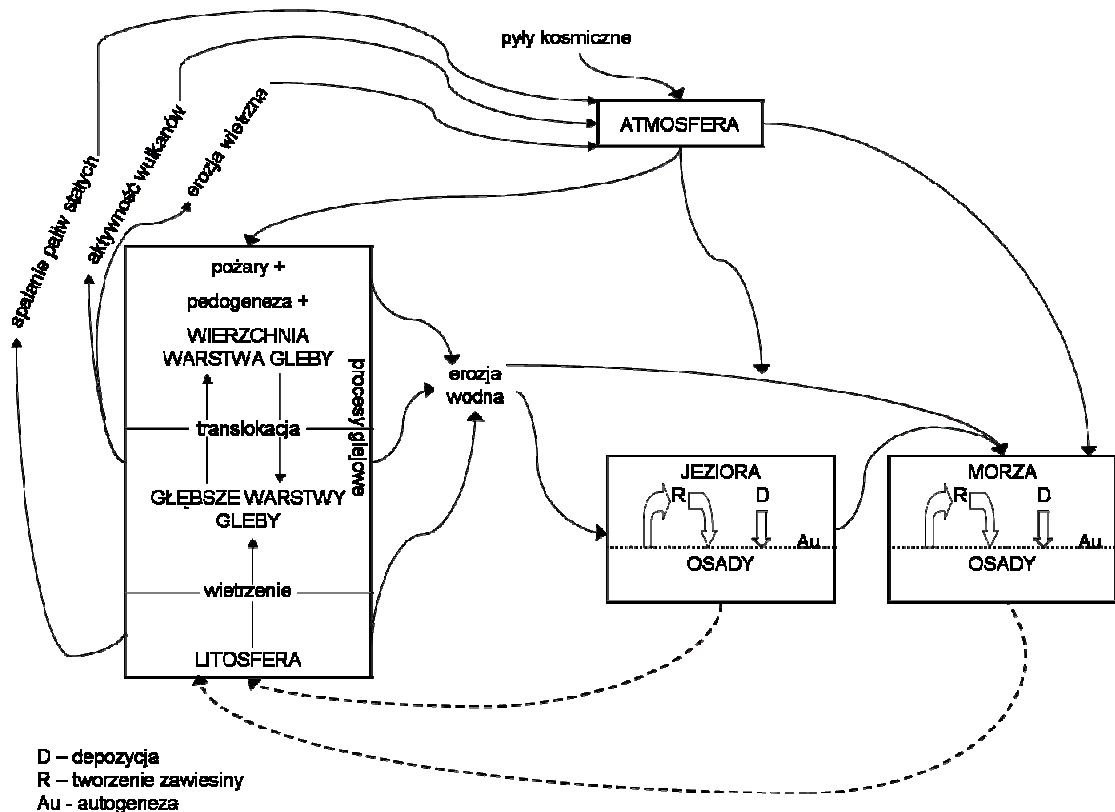
Badaniom pyłów przemysłowych towarzyszyły najczęściej pomiary podatności magnetycznej gleb, będących pod wpływem emisji przemysłowych. Stwierdzona istotna korelacja między opadem pyłów, podatnością magnetyczną i zawartością metali ciężkich dała podstawę do zastosowania pomiarów podatności magnetycznej do monitorowania przestrzennego rozkładu zanieczyszczeń atmosferycznych zdeponowanych na powierzchni ziemi. Prace badawcze prowadziło wielu naukowców, m.in. w Polsce (Heller i in. 1998, Kusza i Strzyszczyński 2005, Magiera 2004, Magiera i Strzyszczyński 2001, Magiera i in. 2003, Strzyszczyński 1989, 1991, 1993, 1995, 1999, Strzyszczyński i Magiera 1993, 2003, 2004, Strzyszczyński i in. 1996, 2005), Anglii (Hay i in. 1997), Czechach (Kapička i in. 1999, 2001, Petrovský i in. 2000), Słowacji (Đurža 1999) oraz Austrii (Scholger 1998, Hanesch, Scholger 2002). Skupiali się oni głównie na mapowaniu magnetycznym w celu wyznaczenia zasięgu emisji przemysłowych i miejsc potencjalnych zagrożeń spowodowanych depozycją pyłów przemysłowych. W Polsce zbadane zostały gleby Górnego Śląska (Heller i in. 1998, Strzyszczyński 1989, Strzyszczyński i Magiera 2000, Magiera i in. 2003) oraz innych regionów charakteryzujących się rozwojem różnych gałęzi przemysłu (m.in. Strzyszczyński 1995, Strzyszczyński i Magiera 2001, Kusza i Strzyszczyński 2005). Bardzo często obiektem pomiarów magnetycznych były gleby leśne, dla których najwyższe wartości podatności magnetycznej stwierdzono w podpoziomach butwinowym (Of) i humifikacyjnym (Oh). W 1994 r. na podstawie 1500 próbek ściółki leśnej powstała pierwsza mapa podatności magnetycznej Polski (Strzyszczyński i in. 1994). Na bazie prób archiwalnych powstała podobna mapa gleb Anglii (Hay i in. 1997), gleb prowincji Styria w Austrii (Scholger 1998) oraz kantonu Ticino w Szwajcarii (Zergeney i in. 1998). W 2002 roku wydano *Atlas Podatności Magnetycznej Gleb Polski* (Magiera i in. 2002), bazujący na próbkach archiwalnych pobieranych przez Państwowy Instytut

Geologiczny w regularnej siatce. W latach 2000-2004 placówki naukowe z Polski (IPIŚ PAN w Zabrze), Czech (Instytut Geofizyki Czeskiej Akademii Nauk), Niemiec (Uniwersytet w Tybindze) i Austrii (Uniwersytet w Leoben) realizowały projekt Unii Europejskiej pt.: *Scrining i monitoring zanieczyszczeń antropogenicznych na obszarze Centralnej Europy przy wykorzystaniu metod magnetycznych*. Jego efektem jest mapa rozkładu podatności magnetycznej obszaru Środkowej Europy wykonana na podstawie pomiarów w regularnej siatce 10×10 km przy użyciu tej samej aparatury i metodyki pomiarowej.

2.3. Proces powstawania podatności magnetycznej gleby i rola roślinności w tym procesie

Związki żelaza są jednymi z najbardziej rozpowszechnionych w przyrodzie, a ich udział w skorupie ziemskiej wynosi ok. 2%. Minerale żelaza krążące w przyrodzie można podzielić na pierwotne i wtórne. Pierwotne występują w skale macierzystej (magmaowej, metamorficznej lub osadowej) i podlegają takim procesom, jak wietrzenie i tworzenie gleby. Natomiast wtórne minerały magnetyczne powstają z „pierwotnego” żelaza na drodze przemian chemicznych lub biogenicznych. Gdy powierzchnia skały macierzystej zostaje wystawiona na działanie czynników środowiskowych, podlega procesom wietrzenia, następnie zasiedlana jest przez organizmy żywe (bakterie, mchy, porosty, rośliny wyższe), w wyniku czego tworzy się gleba. Związki zawarte w skale (głównie tlenki żelaza) ulegają zagęszczaniu, rozcieńczaniu i różnym przekształceniom, przechodząc z paramagnetycznych form żelaza w formy ferri- lub antyferromagnetyczne i odwrotnie. Następuje także ich rozdrobnienie, czego konsekwencją, poza zmianą wielkości ziaren, może być zmiana ich kształtu oraz właściwości magnetycznych. Thompson i Oldfield (1986) przedstawili schematycznie cykl procesów, którym podlegają minerały magnetyczne w środowisku (Rys. 3).

Wartość podatności magnetycznej odzwierciedla ilość cząstek ferrimagnetycznych w badanym materiale i rośnie proporcjonalnie do tej ilości. W przypadku gleb przeważnie, ale nie tylko, minerały ferrimagnetyczne decydują o ich własnościach magnetycznych. Składniki diamagnetyczne gleb (kwarc, ortoklaz, węglan wapnia, materia organiczna, woda) uważane są w większości gleb za ośrodek rozpraszający ferro- i ferrimagnetyki. Jednak w wyjątkowych przypadkach, takich jak niezanieczyszczone piaski kwarcowe, czyste wapienie i torfy wysokie, ilościowo minerały diamagnetyczne mogą być magnetycznie istotne. W przypadku gleb bogatych w żelazo, ale ubogich w ferrimagnetyki, paramagnetyki mają duży udział w wartości podatności magnetycznej. Spośród antyferromagnetyków, minerałami obficie występującymi w glebach dobrze drenowanych są getyt i hematyt dominujący w bardziej suchych i tlenowych warunkach (Oades i Townsend 1963). Lepidokrokit występuje głównie w glebach glejowych. Magnetyt i maghemit, a także tytanomagnetyty i pirotyn są najistotniejsze spośród minerałów ferrimagnetycznych. Magnetyt występuje zarówno jako pierwotny (pochodzący głównie ze skał magmaowych), jak i wtórny minerał, powstający w różnych procesach zachodzących w glebach, natomiast maghemit jest obecny przede wszystkim w warunkach klimatu tropikalnego i subtropikalnego (Schwertmann i Cornell 2000).

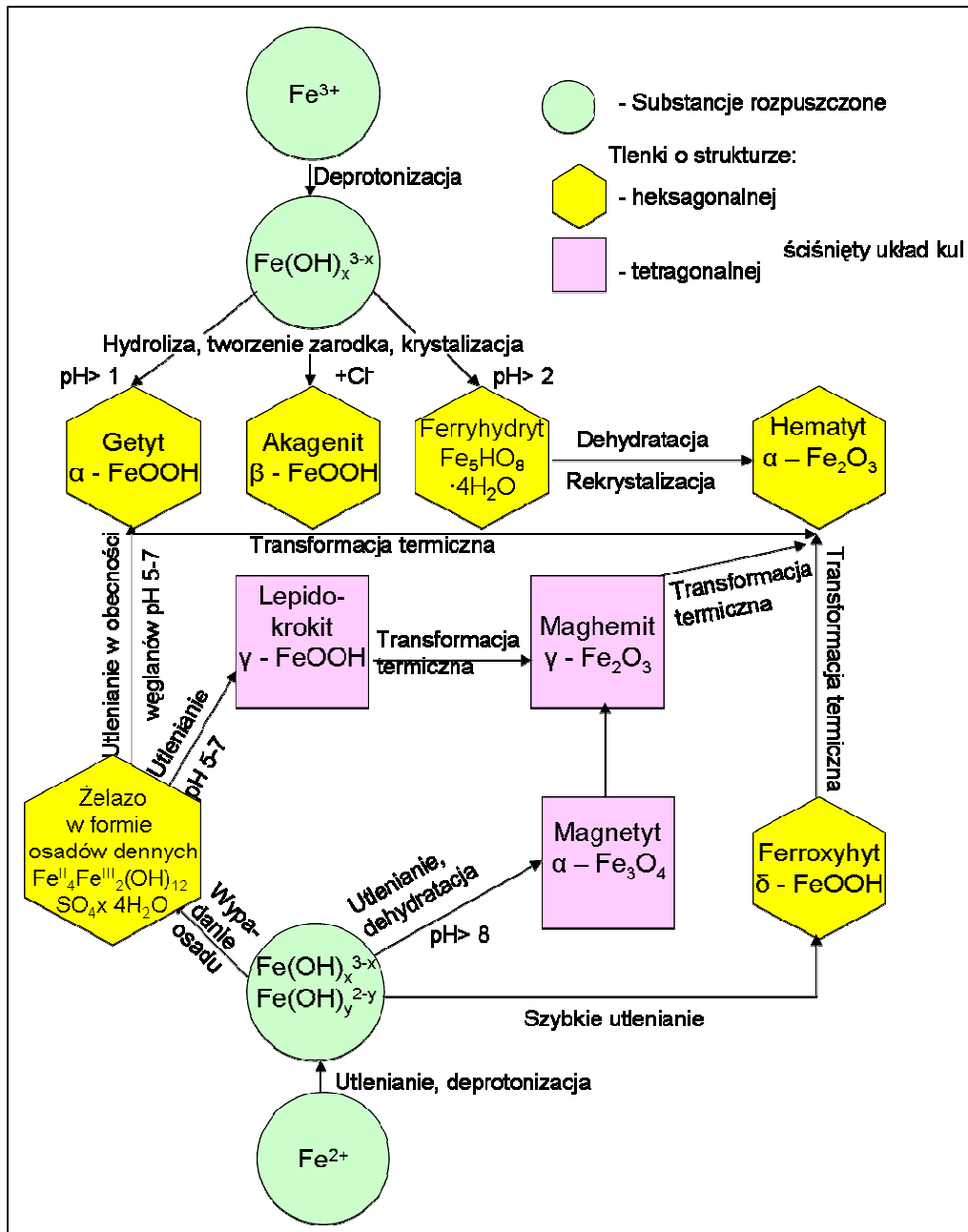


Rysunek 3. Schemat obiegu cząstek magnetycznych w przyrodzie (Thompson i Oldfield 1986).

Żelazo w skałach macierzystych magmowych jest obecne przeważnie w krzemianach, w formie zredukowanej jako Fe^{2+} . W reakcjach wietrzenia tlenowego lub hydrolitycznego jony Fe^{2+} uwalniane są jako jony Fe^{3+} , które ze względu na bardzo niską rozpuszczalność wytrącają się jako tlenki lub wodorotlenki. W warunkach deficytu tlenu może następnie dochodzić do redukcji Fe^{3+} do Fe^{2+} , w wyniku czego tlenki stają się bardziej rozpuszczalne i żelazo może znowu migrować do stref utleniania, gdzie zostaje powtórnie wytrącone jako Fe^{3+} . Tlenki te mogą ulegać powtarzającym się przemianom, trudno zatem jest określić moment kolejnych sekwencji wietrzenia (Thompson i Oldfield 1986).

W przypadku, gdy gleba powstała ze skał magmowych zawierających w przewodzie Fe^{2+} w formie magnetytu lub/i krzemianów, wietrzenie jest zdominowane przez reakcje hydrolityczne i utleniania. Powstające tlenki to głównie hematyt i/lub getyt, przy czym powstawanie hematytu ograniczone jest do gleb formowanych w warunkach wysokiej temperatury, dobrego napowietrzenia, szybkiego rozkładu materii organicznej i często stosunkowo wysokiego odczynu (Schwertmann i Taylor 1977). W glebie wytworzonej na skałach bogatych w hematyt (np. piaskowce triasowe) długi okres pedogenezy w warunkach niskich temperatur i dużej wilgotności prowadzi do formowania getytu lub,

lokalnie, lepidokrokitu. W glebie powstałej na skałach osadowych lub metamorficznych, w których udział hematytu, magnetytu i krzemianów bogatych w pierwotny Fe^{2+} jest niewielki lub żaden, żelazo występuje w wielu różnorodnych formach. Może ono czasami wiązać się z minerałami ilastymi lub być czynnikiem cementującym w większych cząstkach, ale ostatecznie takie formy żelaza rozpadają się, stając się łatwo dostępne i mobilne. Przemiany tlenków i wodorotlenków żelaza schematycznie przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Tworzenie i przekształcenia tlenków i wodorotlenków żelaza (Schwertmann i Cornell 2000).

Wielu badaczy stwierdziło magnetyczne „wzmocnienie” gleb o fitogeniczym i klimatycznym podłożu. Mullins (1977) zidentyfikował przyczynę „wzmocnienia” jako formowanie w glebie maghemitu i określił cztery mechanizmy jego powstawania:

- utlenianie magnetytu do maghemitu w niskich temperaturach (które nie jest jednak przyczyną wzrostu podatności magnetycznej);
- spalanie gleby w temperaturze powyżej 200°C (w czasie pożarów lasów), kiedy to przy udziale materii organicznej następuje przekształcenie nie-ferrimagnetycznych tlenków żelaza w ferrimagnetyczne. Proces ten przebiega w dwóch fazach: w pierwszej, w warunkach redukcyjnych tlenki i wodorotlenki żelaza ulegają podziałom i przekształceniu w magnetyt, który w drugiej fazie, fazie ochładzania, jest utleniany do maghemitu. Proces ten jest bardzo skomplikowany i w jego efekcie, w zależności od lokalnych warunków oraz samego przebiegu spalania, powstają tlenki żelaza o strukturze zbliżonej bądź do magnetytu, bądź do maghemitu. O rodzaju powstałych tlenków świadczy często zróżnicowanie kolorystyczne spalonej powierzchni gleby (od czarnego poprzez odcienie szarości do różowego i pomarańczowego), któremu towarzyszy gradacja w wartościach podatności magnetycznej (Oldfield i in. 1981);
- dehydratacja lepidokrokitu do maghemitu, zachodząca w temp. 275 – 410°C; przy czym w środowisku ma charakter tylko lokalny i występuje w warunkach, gdy gleba glejowa wysycha lub jest poddawana działaniu wysokich temperatur;
- powstawanie mikrokryształicznego maghemitu lub magnetytu ze słabo magnetycznych tlenków i wodorotlenków żelaza podczas cykli utleniania–redukcji, występujących w normalnych procesach glebotwórczych. Mechanizm ten jest skomplikowany i zachodzi przy współdziałaniu heterotroficznych organizmów, które tworząc środowisko redukcyjne umożliwiają przejście żelaza zawartego w niemagnetycznych tlenkach i wodorotlenkach do roztworów glebowych i ich stopniową rekrytalizację do magnetycznych tlenków żelaza. Szczegółowo procesy zachodzące przy współdziałaniu bakterii magnetostatycznych zostały opisane m.in. przez Blakemore’a (1975), Fassbindera i in. (1990), Lovley’a i in. (1987), Maher i Thompsona (1991, 1992). Fischer (1988) oraz Rossellomora i in. (1995) zidentyfikowali ponad 30 gatunków bakterii redukujących żelazo.

W glebach dawniej lub aktualnie uprawianych, a także w glebach będących w zasięgu oddziaływania pożarów, trudno jest określić, czy wzrost podatności magnetycznej jest odzwierciedleniem spalania, czy też procesów glebotwórczych. Znaczenie tych ostatnich może być jednak istotne w przypadku wysokich wartości podatności magnetycznej gleb leśnych (starodrzewia) oraz porównywalnych jej poziomów na rozległych obszarach

o podobnej litologii. Powstawanie podatności magnetycznej zależy bowiem od takich czynników naturalnych, jak podłoże (procesy glebotwórcze), opad z atmosfery i czas (Thompson i Oldfield 1986).

Za główną przyczynę powstawania wzrostu podatności magnetycznej gleb, zwłaszcza w rejonach przemysłowych, uważa się pyłowe imisje przemysłowe. Opadające cząstki magnetyczne, w przeciwieństwie do innych zanieczyszczeń, w niewielkim stopniu podlegają rozpuszczeniu, zmianom diagenetycznym, czy też wzrostowi autogenicznemu. Ich stabilność oraz łatwość stwierdzenia obecności poprzez pomiary magnetyczne predysponuje je do wykorzystania jako wskaźnika w badaniach nie tylko monitoringowych, ale także chronologicznych i paleośrodowiskowych na obszarach podlegających w przeszłości lub obecnie antropopresji (Magiera i Strzyszczyk 1998). Szczególnie dobrym medium do tego rodzaju badań są torfy wysokie ze względu na zawartość w nich diamagnetycznej substancji organicznej oraz położenie powyżej wód gruntowych. Przez cały okres rozwoju torfowiska następuje w nim akumulacja zanieczyszczeń atmosferycznych z opadu suchego i mokrego, w danym okresie i na danym obszarze (Strzyszczyk i Magiera 2001). Pomiary magnetyczne połączone z analizami fizykochemicznymi oraz chronometrycznymi, np. zawartości izotopu węgla ^{14}C pozwalają na dokładne prześledzenie działalności człowieka na danym terenie, od czasów prehistorycznych, poprzez okresy rozwoju przemysłu po czasy współczesne (Strzyszczyk i Chróst 1995). Pomiary zawartości izotopu węgla ^{14}C są podstawą datowania radiowęglowego. Izotop ten powstaje w górnych warstwach atmosfery i reaguje z tlenem, tworząc cząsteczki $^{14}\text{CO}_2$, które z kolei mieszają się z nieaktywnym CO_2 . Izotop ^{14}C jest adsorbowany na powierzchni mórz i oceanów oraz asymilowany z powietrza przez organizmy żywe. W okresie życia organizmu jego zawartość utrzymuje się na stałym poziomie, natomiast po obumarciu następuje powolny spadek liczby atomów ^{14}C ze stałą szybkością, opisywany równaniem zwanym prawem zaniku promieniotwórczego (Pazdur 1982).

Biorąc pod uwagę obszary odkryte i zalesione o tym samym poziomie imisji zanieczyszczeń, podatność magnetyczna tych pierwszych jest 5 – 10 razy mniejsza. Wartość podatności magnetycznej gleb ornych okolic Jaworzna waha się od 47 do 156, nieużytków: 106 – 276, łąk: 101 – 330, a gleb leśnych: $561 - 2158 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$. Podatność magnetyczna gleb leśnych jest najwyższa, dlatego ich zagrożenie przez depozycje metali należy uznać za największe (Strzyszczyk 2004).

W ściółce leśnej (głównie w podpoziomach butwinowym i humifikacyjnym) akumulowane są cząstki ferrimagnetyczne, powodujące wzrost podatności magnetycznej (Strzyszczyk i Magiera 1998). Przyczyną tego są właściwości filtracyjne drzewostanów, które

mają zdolność wychwytywania zanieczyszczeń przez liście i igły oraz zateżnienia roztworów spływających z powierzchni koron oraz pni drzew. Proces ten jest efektem zarówno reakcji jonowymiennych w układzie roślina – woda, jak i splukiwania pyłów, w tym aerozoli osadzonych na powierzchni drzew w wyniku depozycji suchej. Intensywność procesu zateżnienia jest znacznie większa w przypadku drzew iglastych niż liściastych. Wynika to między innymi z różnic w budowie morfologicznej kory i powierzchni koron drzew iglastych i liściastych (Ulrich i in. 1979, Kowalkowski i in. 2002). Miarą tych różnic jest tzw. wskaźnik powierzchni liściowej (LAI – leaf area index) definiowany jako pole powierzchni rzutowej liścia przez jednostkową powierzchnię gruntu, który dla poszczególnych gatunków drzew jest inny i wynosi: dla świerka – 10,5; sosny – 6,73; modrzewia – 4,87; brzozy – 3,45; dębu – 3,29, a ogólnie dla drzew iglastych – 6,12 i liściastych – 3,29 (Teske i Thistle 2004). Ulrich i in. (1979) oraz Heinrichs i Mayer (1977, 1981), badając rozkład opadających zanieczyszczeń w ekosystemach leśnych iglastych z przewagą świerka pospolitego (*Picea abies* Karst.) i liściastych z dominującym bukiem (*Fagus sylvatica* L.), zauważyli wzrost zawartości różnych substancji w opadzie po przejściu przez korony drzew iglastych w porównaniu z liściastymi oraz w stosunku do terenów niezalesionych (Tab. 6, 7). Wyniki obserwacji Janek (2003) na terenie Puszczy Augustowskiej wskazują, że między składem chemicznym opadów na otwartej przestrzeni i pod koronami drzew występują istotne różnice; przy czym są one większe zimą niż latem i równocześnie większe w drzewostanach świerkowych niż sosnowych. W porównaniu z opadami na otwartej przestrzeni oraz z podkoronowymi, opady spływające po pniach drzew charakteryzują się największą kwasowością oraz największym stężeniem składników mineralnych. Występowanie sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) lub świerka pospolitego (*Picea abies* Karst.) ma również znaczący wpływ na wielkość opadu składników mineralnych docierających do gleby wraz z opadami atmosferycznymi. Pod okapem sosen ilość składników mineralnych jest większa o ok. 20%, a pod okapem świerków o ok. 100%, w stosunku do ich ilości na otwartej przestrzeni. Związane jest to z ilością i składem zarówno suchego opadu akumulowanego w koronach, jak też składników wmywanych z igliwia (Janek 2003). Dodatkowo, rosnący dopływ kwaśnych i bardzo kwaśnych roztworów z pni drzew powoduje, że miejsce kationów Ca^{2+} , Mg^{2+} i K^{+} zajmują w coraz większych stężeniach kationy Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} i H^{+} (Tab. 2). Konsekwencją tego są zmiany stosunków Ca+Mg+K:Al w glebie (Sverdrup i Warfvinge 1995). Zjawisko to dotyczy szczególnie najbliższego otoczenia pni drzew, gdzie kształtują się nowe chemiczne warunki środowiska glebowego (Neumeister i in. 1997, Józwiak i Kozłowski 2003).

Tabela 6. Zawartości metali ciężkich w opadzie pyłu na otwartej przestrzeni oraz pod okapem w drzewostanie bukowym i świerkowym (Ulrich i in. 1979).

Rodzaj powierzchni	Ilość wody	Pb	Zn	Cd	Cu	Ni
	dm ³ ·m ⁻²	g·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹				
Otwarta przestrzeń	1060	310	1890	35	350	26
Drzewostan bukowy	873	340	2720	16	150	34
Drzewostan świerkowy	751	540	2700	25	230	40

Tabela 7. Zawartości żelaza, manganu i glinu w roztworach z lizymetrów na różnych głębokościach gleby pod drzewostanem bukowym i świerkowym oraz w opadzie pyłu na otwartej przestrzeni (Ulrich i in. 1979).

Rodzaj powierzchni	Rodzaj analizowanej próbki	Fe	Mn	Al
		mg·dm ⁻³		
Otwarta przestrzeń	opad pyłu	0,092	0,032	0,092
Drzewostan bukowy	roztwór z poziomu humusowego	0,949	0,817	0,930
	roztwór z poziomu mineralnego (50 cm)	0,134	0,924	1,44
	roztwór z poziomu mineralnego (100 cm)	0,107	1,05	2,74
Drzewostan świerkowy	roztwór z poziomu humusowego	1,18	1,92	1,76
	roztwór z poziomu mineralnego (50 cm)	0,07	1,72	7,37
	roztwór z poziomu mineralnego (100 cm)	0,062	2,12	6,91

3. CEL I ZAKRES PRACY

Punktem wyjścia do rozważania wpływu pyłowych imisji przemysłowych na podatność magnetyczną gleb w zależności czasu były długoletnie, trwające już od 1988 roku, badania podatności magnetycznej pyłów przemysłowych i gleb prowadzone w Instytucie Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w Zabrze. Ich wyniki pozwoliły na określenie różnych zależności korelacyjnych między podatnością magnetyczną a innymi parametrami, m.in. opadem pyłu, opadem metali ciężkich oraz zawartością metali ciężkich w glebach. Znacznie później, bo w 2000 roku podjęto tego rodzaju badania także w innych placówkach naukowych (m.in. Instytut Geofizyki Czeskiej Akademii Nauk, Uniwersytet w Tybindze w Niemczech, Uniwersytet w Leoben w Austrii).

Celem badań było określenie wielkości anomalii magnetycznych, w sensie przestrzennym oraz zagrożeń ekologicznych (których wyznacznikiem są podwyższone wartości podatności magnetycznej) i anomalii geochemicznych (których miarą jest zawartość metali ciężkich przekraczająca wartości graniczne) gleb leśnych, ich kształtowanie się na obszarze o silnej antropopresji przemysłowej w zależności od wielkości opadu pyłu i czynnika czasu. Znajomość tych relacji może okazać się bardzo przydatna w interpretacji wyników badań monitoringowych opartych na pomiarach podatności magnetycznej gleb, zwłaszcza gleb leśnych, które, w porównaniu do gleb uprawnych, ze względu na nienaruszony zabiegami agrotechnicznymi profil i brak nawożenia, uważane są za lepsze medium monitoringowe. Prowadzone badania pozwolą również na znalezienie powiązań między wielkością pyłowych imisji przemysłowych a wzrostem podatności magnetycznej gleb leśnych w aspekcie historycznym.

Zakresem badań objęto następujące zagadnienia:

- analizę wielkości opadu pyłu i niektórych metali ciężkich w rejonie badań w latach 1980 – 2004,
- wielkość podatności magnetycznej i zawartości metali ciężkich w glebach,
- wpływ roślinności na wzrost podatności magnetycznej i zawartości metali ciężkich w glebach,
- kształtowanie podatności magnetycznej na badanym obszarze w aspekcie historycznym,
- zagrożenie ekologiczne obszaru badań przez metale ciężkie i wykorzystanie monitoringu magnetycznego gleb do jego oceny.

Z zakresu badań wynika konieczność przeprowadzenia prac kameralnych, terenowych oraz laboratoryjnych.

4. CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

4.1. Położenie geograficzno-administracyjne oraz charakterystyka fizjograficzna

Obiektem prowadzonych badań są powierzchnie leżące na linii transektu Jaworzno – Bukowno – Olkusz, którego długość oszacowano na około 20 km i powierzchnię na około 5000 ha (Załącznik 1). Transekt zlokalizowany jest na pograniczu województwa śląskiego i małopolskiego. Geograficznie transekt położony jest na granicy dwóch makroregionów: Wyżyny Śląskiej oraz Jury Krakowsko-Częstochowskiej, a dokładniej na granicy mezoregionów określanych jako Pagóry Jaworznickie i Wyżyna Olkuska. Obszar badań leży w obrębie Kotliny Przemyskiej obejmującej Kotlinę Dąbrowską i Kotlinę Biskupiego Boru. Kotlina Biskupiego Boru ograniczona jest od północnego wschodu Garbem Ząbkowickim, a od południowego zachodu Niecką Wilkoszyńską (Kondracki 1994). Z punktu widzenia tektoniki jest to obszar Niecki Bytomskiej oraz jej południowego przedłużenia (Gilewska 1972). Według regionalizacji przyrodniczo-leśnej, teren badań znajduje się w krainie VI Małopolskiej, dzielnicy 7 – Wyżyny i Przedgórze Śląskiego, w mezoregionie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (7a). Znajdujące się na terenie mezoregionu Pustynia Błędowska i Pustynia Starczynowska są największymi w Polsce obszarami nagich piasków (Trampler i in. 1990).

Na terenie badań występują złoża węgla kamiennego, rud cynku i ołowiu, wapienia, dolomitów i piasków. Aktualnie eksploatowane są złoża węgla kamiennego, występujące pod całą powierzchnią Jaworzna, złoża rud cynku i ołowiu, obejmujące swym zasięgiem gminę Bolesław oraz tereny Olkusza i Bukowna. Piaski czwartorzędowe stanowiące materiał podsadzkowy dla górnictwa węglowego oraz rud cynku i ołowiu wydobywane są w rejonie Kotliny Biskupiego Boru. Transekt przebiega częściowo na terenie dawniej i aktualnie eksploatowanych wyrobisk Kopalni Piasku PCC Rail „Szczakowa”. Wyrobisko „Szczakowa”, istniejące w ewidencji jako teren zlokalizowany na granicy Jaworzna i Bukowna, stanowi fragment powierzchni użytkowanej przez Kopalnię i wynoszącej około 3200 ha. Część użytkowanego terenu zajmuje infrastruktura, natomiast pozostały teren jest sukcesywnie rekultywowany. Obecnie Kopalnia Piasku posiada ponad 2800 ha zrehabilitowanych i zagospodarowanych wyrobisk, głównie w kierunku leśnym.

Administracyjnie tereny leśne objęte badaniami znajdują się w Nadleśnictwie Chrzanów, głównie w obrębie Szczakowa oraz w Nadleśnictwie Olkusz (leżące na wschód i północ od Podlesia). Większość drzewostanów na terenie objętym badaniami należy do kategorii lasów ochronnych, głównie jako lasy uszkodzone przez przemysł. Lasy w rejonie

Pustyni Starczynowskiej są lasami glebochronnymi, ze szczególnym uwzględnieniem jej zewnętrznej warstwy.

Lokalizacja obszaru badań na terenach eksploatacyjnych węgla, rud cynku i ołowiu oraz piasku wiąże się ze specyficznymi warunkami powierzchniowymi, jakimi są zapadliska, wyrobiska i zwałowiska. Skutkiem eksploatacji, oprócz przekształcenia geomechanicznego (zmiana rzeźby terenu), likwidacji lub degradacji pokrywy glebowej i roślinnej na znacznych obszarach, są przekształcenia hydrogeologiczne (zmiana stosunków wodnych), w tym obniżenie możliwości retencyjnych czwartorzędowych warstw wodonośnych. Odtwarzanie się pokrywy glebowej i kształtowanie naturalnych zbiorowisk roślinnych jest procesem bardzo długotrwałym.

W strukturze siedliskowej dominują bory sosnowe. Są to zespoły boru świeżego i boru mieszanego świeżego, rzadziej zespoły boru suchego. Drzewostany te mają słabo rozwiniętą warstwę podszytu, a w warstwie runa dominują krzewinki z rodziny wrzosowatych, w tym głównie borówka czarna i borówka brusznica oraz wrzos. Lasy łęgowe występują rzadko wąskimi pasami w dolinach cieków. Niekorzystną cechą lasów tego obszaru jest przewaga monokultury sosnowej rosnącej w ubogich siedliskach i terenach odwodnionych. Przeciętny wiek drzewostanów wynosi 54 lata, przeciętna zasobność $151 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, przeciętny przyrost $2,84 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$. Lasy te są przeważnie słabo odporne na niekorzystne czynniki środowiskowe. Natomiast lasy sadzone w wyrobiskach popiaskowych uzyskują często lepsze warunki siedliskowe (nawożone, wyższy poziom wód gruntowych), posiadają też bardziej urozmaicony skład gatunkowy (Pietrzykowski 2004). Lasy badanego obszaru, oprócz podstawowych funkcji przyrodniczych i gospodarczych, jakie pełni każdy las, odgrywają coraz większą rolę w zakresie pełnionych funkcji pozaprodukcyjnych i społecznych.

Długotrwałe (od lat 60-tych) oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza z pobliskich zakładów przemysłowych oraz zachwiane stosunki wodne w podłożu (obniżenie lustra wody i przesuszenie gleb) przyczyniły się do karłowacenia drzewostanów sosnowych, przerzedzenia koron, przedwczesnego zrzucania igieł, przebarwienia aparatu asymilacyjnego oraz do osłabienia biologicznej odporności drzew leśnych. Obecnie większość lasów tego terenu znajduje się w II i III strefie uszkodzeń (Furdyna 1968, 1974, Kaźmierczyk i in. 1997).

4.2. Budowa geologiczna i hydrologiczna

Podłoże skalne w rejonie transektu Jaworzno – Bukowno – Olkusz stanowią utwory karbonu, permu, triasu, trzeciorzędu i czwartorzędu, zdeponowane przed około 80 tys. – 240 mln lat temu.

Starsze ogniwa karbonu to iłowce, mułowce i piaskowce tworzące warstwy malinowickie, na których zalegają mułowce, iłowce, piaskowce i zlepieńce oraz pokłady węgla kamiennego warstw sarnowskich i grodzieckich. Bezpośrednio pod pokrywą czwartorzędową występują piaskowce i zlepieńce, a podrzędnie mułowce z pokładami węgla zaliczane do warstw rudzkich. Na skałach karbonu zalegają niezgodnie osady dolnego permu. Zlepieńce myślachowickie pod osadami czwartorzędu ciągną się łukiem od Sierszy, poprzez rejony Biskupiego Boru, i dalej w kierunku północno - zachodnim, a także w rejonie Pustyni Starczynowskiej. Iłowce i mułowce (gliny sławkowskie) zalegają lokalnie na zlepieńcach myślachowickich. Osady permu i triasu tworzą monoklinę nachyloną pod niewielkim kątem w kierunku północno - wschodnim. Wyższe ogniwa triasu tworzą wapienie i margle warstw gogolińskich, dolomity kruszczośne, dolomity diploporowe, które budują wzgórza w północnej i wschodniej części transektu.

Dolomity diploporowe, szare lub brunatne, kawerniste z licznymi, lecz słabo zachowanymi skamieniałościami stanowią najwyższe ogniwo triasu występujące w rejonie badań. Osiągają miąższość ponad 20 metrów. Warstwy tarnowickie i boruszowickie (dolomity, margle i łupki ilaste) zalegają na terenie Jaworzna Szczakowej, pod pokrywą osadów czwartorzędu. Iłowce, mułowce i wapienie górnego triasu występują na południe od Sierszy oraz w rejonie Bolesławia. Trzeciorząd reprezentują plioceńskie żwiry kwarcowe, odsłonięte na niewielkiej powierzchni w wyrobisku PCC Rail „Szczakowa”, na zachód od Biskupiego Boru (Gilewska 1972).

Ukształtowana do plejstocenu rzeźba terenu sprzyjała intensywnej akumulacji osadów wodnolodowcowych w wyniku działania wód roztopowych lądolodów skandynawskich w okresie zlodowacenia środkowopolskiego i północnopolskiego (Kozioł 1952, Gilewska 1972, Szumny 2001). Jednak największe piętno na reliefie omawianego terenu wywarło zlodowacenie krakowskie, wpływając przede wszystkim na złagodzenie form reliefu oraz spłylenie zapadlisk i dolin rzecznych. Zostały one częściowo zasypane gruzem pochodzącym z intensywnego wietrzenia mrozowego skał w czasie interglacjalów oraz olbrzymimi masami piasków pozostawionych przez topniejący lodowiec. Położenie Pustyni Błędowskiej i Starczynowskiej na przedpolu kuesty jurajskiej Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej

sugeruje, że osady te powstały w wyniku zmywu piasków, żwirów i rumoszu skalnego przez rzeki lodowcowe z wyżyn jurajskich (Szumny 2001).

Rejon transektu leży w obrębie bytomsko - olkuskiego regionu hydrogeologicznego z głównym poziomem użytkowym wód podziemnych szczelinowo - krasowym w wapieniach i dolomitach triasu dolnego i środkowego, zalegającym na głębokości 10 – 100 m. Wyróżnia się dwa piętra wodonośne: osady czwartorzędowe zbudowane głównie ze średnio- i drobnoziarnistych piasków oraz osady triasowe, w których profilu można wyodrębnić dolomity diploporowe i kruszconośne, wapienie warstw olkuskich i gogolińskich oraz dolomity retu (Kuzio i Kuzio, 2002). Występują także słabo rozpoznane paleozoiczne poziomy wodonośne (dewoński, karboński, permski), które z reguły zalegają głęboko i są sporadycznie eksploatowane w strefach wychodni.

W obrębie czwartorzędowego piętra wodonośnego wyróżnia się Główny Zbiornik Wód Podziemnych nr 453 (GZWP) Bór Biskupi, natomiast w obrębie triasowego piętra wodonośnego – GZWP nr 454 Olkusz - Zawiercie. GZWP 453 Bór Biskupi zawiera wody nadające się do celów konsumpcyjnych. Jest całkowicie odkryty hydrologicznie, a jego wrażliwość na zanieczyszczenie potęguje prowadzona nieopodal wielkoobszarowa eksploatacja piasku. GZWP 454 Olkusz - Zawiercie jest drenowany wyrobiskami kopalń rud cynku i ołowiu oraz wykorzystywany do celów zaopatrzenia w wodę. Spowodowało to powstanie rozległego leja depresji zwierciadła wód podziemnych (o powierzchni kilkuset kilometrów kwadratowych) o zasięgu regionalnym, a także do zmiany naturalnego kierunku spływu wód podziemnych. Wskutek działalności górniczej nastąpiło osuszenie rzeki Białej na odcinku około 8,5 km.

Obszar badań znajduje się w dorzeczu Wisły, w zlewni Białej Przemszy, a dokładniej jej dopływów: Białej, Baby, Sztoły (która zasilana jest przede wszystkim wodami dołowymi z kopalń), Koziego Brodu i Żabnika oraz Łuźnika. Kanał Główny o długości 10 km jest sztucznym ciekim powstałym dla odwodnienia wyrobisk Kopalni Piasku PCC Rail „Szczakowa” i odprowadzającym do Białej Przemszy wody I klasy czystości. Przyjmuje wody przez rozbudowaną sieć kanałów pokrywających odkrywki. Obok wód opadowych i podziemnych istotnym źródłem zasilania jest woda infiltrująca z koryta rzeki Sztoły, która jest największą rzeką przepływającą przez obszar badań. Na całej swej długości znajduje się w zasięgu leja depresji wywołanego odwodnieniem PCC Rail „Szczakowa”, a w rezultacie obniżeniem naturalnego zwierciadła wody podziemnej w piętrze czwartorzędowym poniżej poziomu wody w Sztole. Rzeka Sztoła zasilana jest przez rzekę Babę, do której poprzez kanał południowy odprowadzane są wody kopalniane pompowane z szybów olkuskiej kopalni.

Górny odcinek rzeki, do ujścia Baby, niesie bardzo mało wody, okresowo wysycha. Poniżej ujścia Baby zmieniają się całkowicie warunki hydrologiczne Sztoły. Koryto wypełnia się wodą. Ilości przepływającej w nim wody są stosunkowo duże, cechujące się regularnością i małą zależnością od warunków meteorologicznych panujących w obszarze zlewni.

Zalew Sosina to największy antropogeniczny zbiornik (o powierzchni ok. 50 ha) powstały w dawnym wyrobisku popiaskowym, wykorzystywany do celów rekreacyjnych.

W wyniku odwadniania złóż przez kopalnie rud cynku i ołowiu oraz eksploatacji odkrywkowej piasku nastąpiło znaczne obniżenie powierzchni terenu (od 5 do 25 m) oraz naruszenie systemu wód gruntowych. Zachowany został jednak zachodni i północno-zachodni kierunek spływu wód powierzchniowych.

4.3. Gleby

Zróznicowana budowa geologiczna i różnorodność form rzeźby terenu oraz zmienność warunków hydrologicznych znalazły swoje odzwierciedlenie w zróznicowaniu warunków glebowych na badanym obszarze. Na stosunki glebowe badanego obszaru wyraźny wpływ wywarła też wielowiekowa działalność, głównie przemysłowa, prowadząca do przesuszenia terenu oraz zmian składu chemicznego gleb.

Zaznacza się tu wyraźnie podział na gleby leśne, związane w dużej mierze z ubogimi utworami piaszczystymi oraz gleby użytkowane rolniczo, związane z zasobniejszymi utworami wapiennymi oraz bogatszymi piaskami gliniastymi. Rozległe obszary odkrywki PCC Rail „Szczakowa” pokrywają zarówno gleby inicjalne, jak też grunty bezglebowe. Natomiast w dolinach rzek występują gleby mineralno-murszowe (MRm – Terric Histosols, Mollic gleysols, FAO 1988) oraz torfowo-mułowe (MŁt – Fibri-Terric Histosols, FAO 1988) (Pikulski 1989).

Badaniami objęto tylko obszary zalesione, gdzie występują głównie ubogie gleby bielnicowe (B – Podzols, FAO 1988) wytworzone z lekkich utworów piaszczystych. Charakteryzuje je kwaśny odczyn i mała zasobność w składniki pokarmowe oraz duża przepuszczalność. Tworzą one siedliska borów i borów mieszanych. Ponadto, w oparciu o Klasyfikację Gleb Leśnych (2000) część gleb powierzchni tworzących transekt zaliczono do podtypu gleb industrioziemnych i urbanoziemnych o niewykształconym profilu (AU_i – Urbic Anthrosols, FAO 1988) oraz do arenosoli inicjalnych (AR_i – Haplic Arenosols, FAO 1988).

Uziarnienie większości gleb rejonu transektu tworzą cząstki mineralne powstałe z rozkruszenia i zwiętrzenia skały macierzystej, stąd o żyzności decyduje również wiek i sposób powstania utworu macierzystego gleb. Skałę macierzystą powierzchni tworzących transekt stanowią czwartorzędowe piaski fluwioglacjalne oraz utwory gliniaste i pylaste występujące w postaci wkładek na spagu wyrobiska. Siedliska borów (najliczniej występujące na badanym terenie) tworzą z reguły piaski luźne. Piaski o większej domieszce frakcji ilastych lub pyłowych mogą tworzyć siedliska średnio żyzne, najczęściej bory mieszane, które wykształcają się również na piaskach głęboko podścielonych gliną. Analiza składu granulometrycznego tworzących się w takich warunkach gleb wykazała występowanie w całym przekroju piasków luźnych średnioziarnistych z nieznaczną tylko zawartością części ilastych (Pikulski 1989). Podobnie próbki gruntu ze spagu wyrobiska Kopalni Piasku KPP Rail „Szczakowa” charakteryzowały się składem granulometrycznym piasków średnioziarnistych, z udziałem frakcji ilastych ($\varphi < 0,002$ mm) poniżej 2%. Natomiast utwory

cięższe, składowane w pryzmach charakteryzowały się składem granulometrycznym gliny lekkiej i gliny, z 10% udziałem frakcji ilastych (Tab. 8).

Tabela 8. Skład granulometryczny (w %) próbek gruntu ze spągu wyrobiska Kopalni Pisaku KPP Rail „Szcakowa” (Pietrzykowski 2004).

Nr lab.	Udział procentowy frakcji i podfrakcji granulometrycznych (mm)							piasek	pył	ił	Grupa granulometryczna*	Podgrupa granulometryczna*
	2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,002	< 0,002					
1	0	11	54	27	3	3	2	95	3	2	piasek	średnioziarnisty
2	0	7	30	11	4	38	10	52	38	10	glina	-
3	1	23	57	15	2	2	0	98	2	0	piasek	średnioziarnisty
4	1	24	60	13	1	1	0	99	1	0	piasek	średnioziarnisty
5	1	6	16	28	7	7	10	58	32	10	glina lekka	-
6	0	7	30	11	4	4	10	52	38	10	glina	-

* wg PN-R-04033 1998r.

Odczyn skały macierzystej był lekko kwaśny, z czasem jednak wzrósł do obojętnego i słabo alkalicznego. Natomiast wierzchnie poziomy organiczne gleb siedlisk leśnych (borowych) cechuje odczyn kwaśny (Pietrzykowski 2004).

Skład mineralny frakcji pylastych i ilastych utworów pobranych ze spągu przedstawia tabela 9. W badanych próbkach występują głównie: kwarc, smektyt, kaolinit, illit, chloryt i plagioklaz; ponadto, w jednej z próbek stwierdzono dolomit, a w innej śladowe ilości hematytu (Pietrzykowski 2004).

Tabela 9. Skład mineralny prób utworów pobranych ze spągu wyrobiska Kopalni Piasku PCC Rail „Szcakowa” (frakcja $\phi < 0,05$ mm) (Pietrzykowski 2004).

Nr lab. próbki	Opis próbki	Identyfikacja minerałów o średnicy $\phi < 0,05$ mm
1	piasek średnioziarnisty, barwa jasnoszara, spąg wyrobiska	kwarc- α , smektyt, kaolinit, plagioklaz, skaleń potasowy, dolomit, chloryt, chloryt/illit
3	piasek średnioziarnisty, barwa żółtobezowa, spąg wyrobiska	kwarc- α , smektyt, kaolinit, plagioklaz, skaleń potasowy, chloryt, hematyt (w śladowych ilościach), chloryt/illit
4	glina lekka z „przerostów” na spągu wyrobiska	kwarc- α , smektyt, kaolinit, plagioklaz, skaleń potasowy, chloryt (w śladowych ilościach), chloryt/illit (w śladowych ilościach)
6	glina z pryzm i odwałów na spągu wyrobiska	kwarc- α , smektyt, kaolinit, plagioklaz, skaleń potasowy, chloryt, chloryt/illit

4.4. Klimat

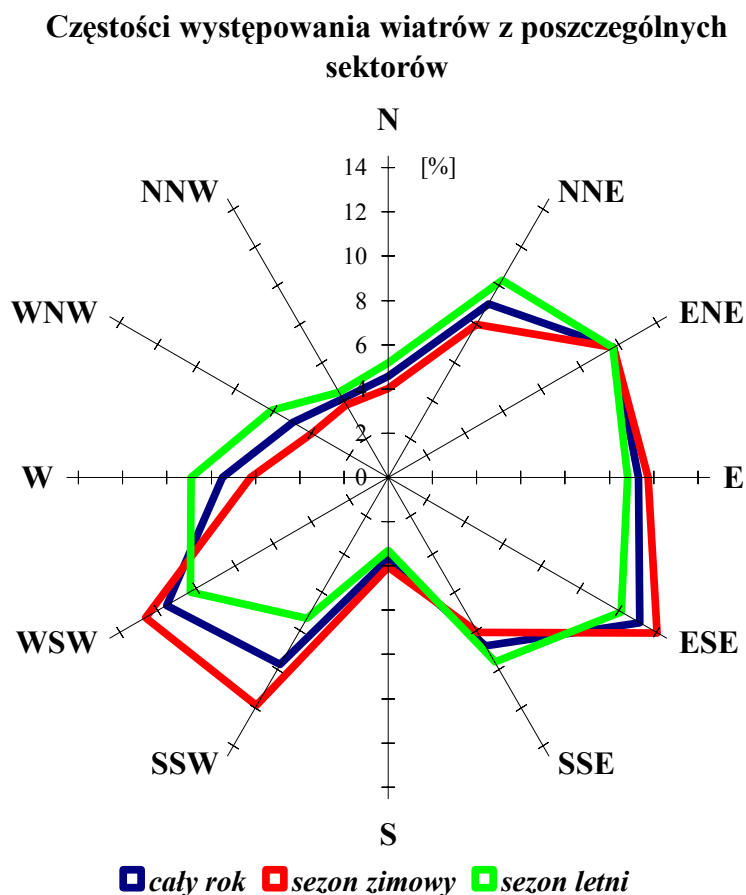
Pod względem klimatu obszar badań zaliczony został do Regionu Śląsko-Krakowskiego, który wyróżnia się stosunkowo dużą liczbą dni z pogodą bardzo ciepłą i opadem deszczu (Woś 1999). Charakterystyka warunków klimatycznych dla transektu Jaworzno – Bukowno – Olkusz została opracowana na podstawie danych meteorologicznych z lat 1975–2002, pochodzących z najbliższego posterunku opadowego katowickiego Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) w Jaworznie - Ciężkowicach (opady atmosferyczne), stacji klimatycznej Katowice (temperatura powietrza) oraz posterunku w Dąbrowie Górniczej (prędkość oraz rozkład częstości występowania wiatru).

Średnia roczna temperatura powietrza odnotowywana na stacji Katowice w latach 1975–2002 wynosiła 8,3°C. Najwyższą średnią roczną temperaturę w okresie 1975–2002 miał rok 2000 (9,8°C), zaś najniższą rok 1980 (6,7°C). Najcieplejszym miesiącem był w tym okresie lipiec ze średnią temperaturą 17,9°C, a najchłodniejszym styczeń ze średnią temperaturą -1,5°C. Średnia temperatura okresu wegetacyjnego wynosiła 12,3°C, a średnia roczna amplituda temperatur powietrza wynosiła 19,4°C. Dni z temperaturą poniżej 0°C w okresie 1975–2002 przypadały w grudniu, styczniu i lutym, a przymrozki występowały w marcu, kwietniu, październiku i listopadzie. Termiczny okres wegetacyjny na tym obszarze trwa średnio 210 dni (Woś 1999). W rejonie badań istnieje podobieństwo w kształtowaniu się temperatur, z tym, że w znacznych zagłębieniach terenu (wyrobiska popiaskowe, doliny niezabudowane) w okresach antycyklonalnych (pogoda bezwietrzna i wyżowa, kiedy to dochodzi do inwersji temperatury) mogą występować w godzinach wieczornych, nocnych i porannych zastoiska chłodnego powietrza o temperaturze niższej od otoczenia, ekstremalnie do około 7°C. W takich warunkach zimą dochodzi do koncentracji zanieczyszczeń, pochodzących w tym przypadku głównie z niskiej emisji.

Roczna suma opadów atmosferycznych w rejonie badań w okresie 1975–2002 wynosiła 735 mm. Najniższa miesięczna suma opadów przypadała w lutym (33 mm), a najwyższa w lipcu (104 mm). Średnie roczne zachmurzenie w oktanach wynosiło 6,5, przy czym najbardziej pochmurnym miesiącem był listopad, a najbardziej pogodnym wrzesień. W ciągu roku występowało 59 dni z mgłą. Maksimum jej występowania przypadało na miesiące jesienno - zimowe. O ile jesienią miały one charakter mgieł radiacyjnych, o tyle zimą często były pochodzenia adwekcyjnego (napływ cieplejszych mas powietrza).

Charakterystyka wiatrów została dokonana podstawie danych IMGW w Katowicach za lata 1994-2003 dla posterunku w Dąbrowie Górniczej (Rys. 5). Z przedstawionej róży

wiatrów wynika, że na badanym obszarze przeważają wiatry z południowego zachodu i ze wschodu (przy największym udziale wiatrów południowo-wschodnich, zwłaszcza w sezonie zimowym). Średnioroczna prędkość wiatru wyniosła $2,32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z punktu widzenia rozprzestrzeniania zanieczyszczeń i samooczyszczania się atmosfery, warunki klimatyczne rejonu badań można uznać za umiarkowanie korzystne, gdyż występują tu duże prędkości wiatru i stosunkowo niewielkie ilości cisz.



Rysunek 5. Rozkład wiatrów dla Dąbrowy Górniczej, lata 1994–2003, porównanie różnych okresów w roku (na podstawie danych IMGW Katowice, 2004).

4.5. Źródła zanieczyszczeń pyłowych i ich oddziaływanie na środowisko przyrodnicze w rejonie badań

Obszar badań leży w strefie oddziaływania emisji przemysłowych, w sąsiedztwie wielkich aglomeracji miejskich i ośrodków przemysłowych. Z tego powodu, niezależnie od kierunku wiatrów, na tereny te stale napływają zanieczyszczenia pyłowe i gazowe. Ich źródła można podzielić na cztery grupy:

- energetyka i przemysł,
- niska emisja,
- emisja niezorganizowana,
- komunikacja i transport.

Wiatry wnoszą zanieczyszczenia z kierunku zachodniego (miasta GOP), północno-zachodniego (głównie Huta „Katowice”), południowo-zachodniego z Jaworzna (Zespół Elektrowni „Jaworzno”), a także z południowego, z Chrzanowa i Trzebini (Elektrownia „Siersza”) oraz południowo-wschodniego, z aglomeracji krakowskiej. Niebagatelny wpływ mają również, leżące w zasięgu badanego transektu Zakłady Górniczo-Hutnicze „Bolesław” w Bukowni. Wymienione zakłady są głównie źródłem emisji pyłu, tlenku węgla, dwutlenku siarki, tlenków azotu, ołowiu, kadmu i cynku. W latach powojennych, wraz z rozwojem przemysłu nastąpił wzrost emisji zanieczyszczeń pyłowych i gazowych w rejonie GOP. Największy wpływ na stan środowiska tego rejonu ma i miał przemysł, zwłaszcza energetyczny miasta Jaworzna. W rejonie Bukowna, gdzie w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych opad cynku, ołowiu i kadmu przekraczał wartości graniczne, zaznaczał się wyraźny wpływ hutnictwa rud metali nieżelaznych. Badania wykazują, iż zanieczyszczenie powietrza tymi metalami uległo zdecydowanej redukcji w stosunku do lat 80-tych, kiedy to notowano w rejonie badań ponad wielokrotne przekroczenia dopuszczalnych wartości ołowiu i kadmu (Tab. 10).

Podstawową część zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego rejonu badań stanowią zanieczyszczenia emitowane podczas spalania paliw dla celów grzewczych i bytowych w gospodarstwach domowych. Największy udział w strukturze zużycia nośników ciepła stanowi węgiel kamienny (78%), często o słabej jakości, który spalany jest w paleniskach domowych charakteryzujących się w większości bardzo małą sprawnością. Równocześnie niewielkie kominy (poniżej 40 metrów), są znacznymi źródłami zanieczyszczenia powietrza, określanego mianem „niskiej emisji”.

Emisja niezorganizowana to emisja zanieczyszczeń do powietrza z obiektów powierzchniowych, czyli np. z hałdy, wysypiska, oczyszczalni ścieków. Można do niej zaliczyć także emisję zanieczyszczeń wprowadzanych do powietrza bez pośrednictwa

Tabela 10. Średnioroczne wartości opadu pyłu, ołowiu, cynku, żelaza i kadmu w latach 1976–2004 w rejonie transektu Jaworzno – Bukowno – Olkusz.

rok	miejsce	opad pyłu	opad żelaza	opad ołowiu	opad cynku	opad kadmu
		(g·m ⁻² rok ⁻¹)		(mg·m ⁻² rok ⁻¹)		
1976	Jaworzno	229,6	-	-	-	-
	Bukowno	139,2	-	-	-	-
	Olkusz	107,3	-	-	-	-
1981	Jaworzno	208,8	10,8	154,6	597,2	3,24
	Bukowno	170,4	9,0	471,8	2113,3	14,47
	Olkusz	151,4	10,2	305,6	1228,4	14,78
1986	Jaworzno	197,2	11,1	95,6		
	Bukowno	128,0	8,9	303,6		
	Olkusz	124,6	8,7	181,0		
1991	Jaworzno	105,7	5,6	61,9	612,6	3,05
	Bukowno	99,8	6,5	153,9	1107,1	8,44
	Olkusz	96,2	11,3	95	498,6	5,03
1998	Jaworzno	30,6	4,1	56,5	359,2	5,03
	Bukowno	70,5	4,2	111,2	872,7	9,16
	Olkusz	78,2	9,9	83	293,8	7,04
2004	Jaworzno	28,5	0,8	15,5	97,7	0,52
	Bukowno	-	-	-	-	-
	Olkusz	-	-	-	-	-
Wartości dopuszczalne		200	-	100	-	10

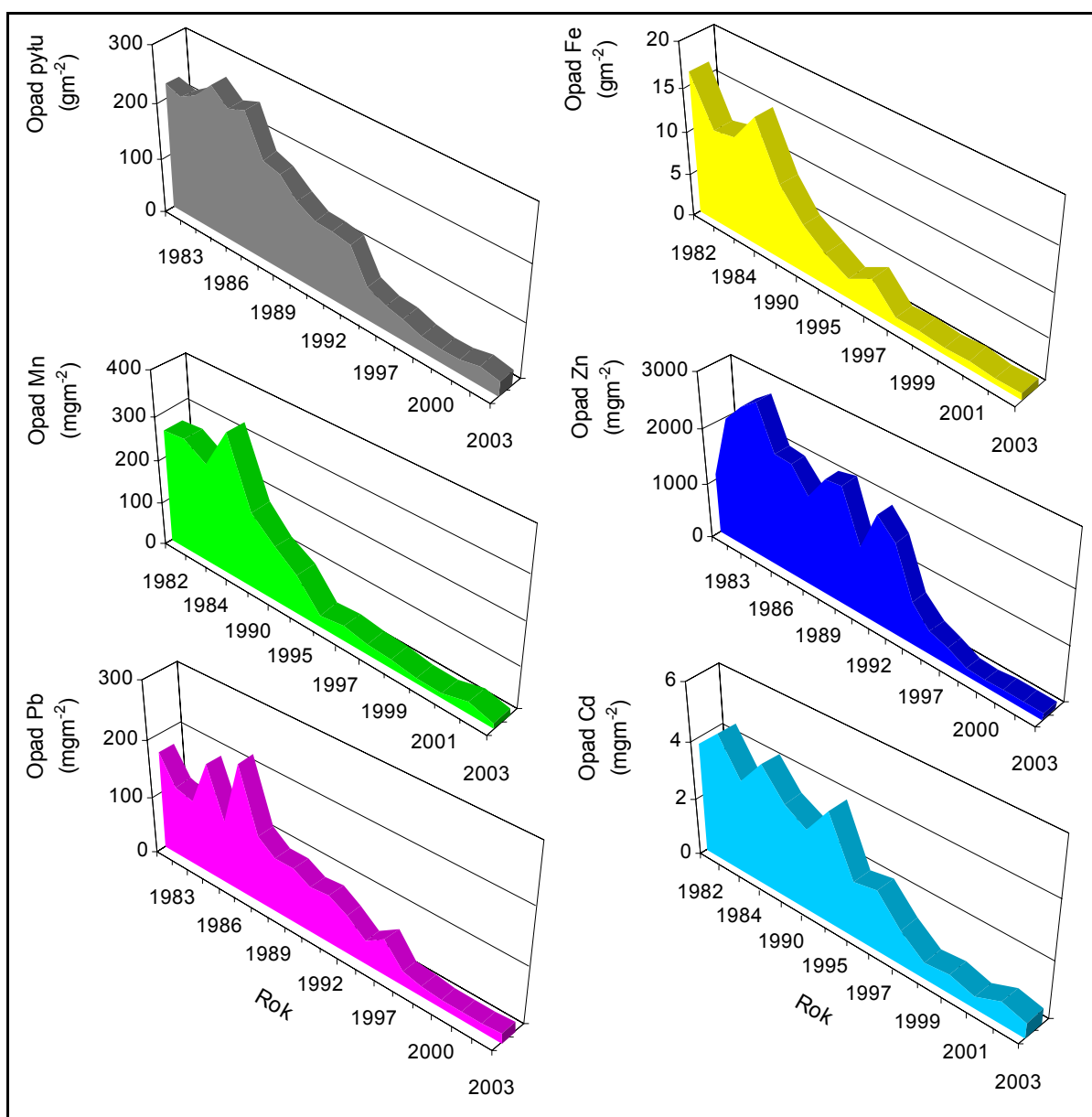
Źródło: dane WSSE Katowice, 1976-2005

przeznaczonych do tego celu środków technicznych, np. w trakcie spawania czy lakierowania wykonywanego poza obrębem warsztatu, czy spalanie na powierzchni ziemi (wypalanie traw). W rejonie miast: Jaworzna, Bukowna i Olkusza znajdują się liczne składowiska odpadów skały płonnej i odpady powęglowe z kopalń i zakładów przerobczych, osady z mechanicznego oczyszczania wód kopalnianych oraz popioły lotne i żużle z elektrowni, a także stawy osadowe – składowiska odpadów poflotacyjnych Zakładów Górniczo – Hutniczych „Bolesław”.

Transport i komunikacja są odpowiedzialne za emisję do atmosfery spalin zawierających m.in. tlenki azotu, tlenek węgla, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. Przez teren badań przebiegają dwutorowe linie kolejowe PKP w kierunku wschodnim do Kielc, a w kierunku zachodnim do Katowic. Po północnej stronie linii PKP przebiega tor szeroki, LHS – Linia Hutniczo - Siarkowa biegnąca od wschodniej granicy Polski do stacji w Sławkowie. Jest ona zbudowana według norm rosyjskich, na trasie tej kursują lokomotywy spalinowe. Dynamiczny rozwój motoryzacji spowodował znaczny

wzrost natężenia ruchu drogowego. Podstawowym systemem transportowym przewozów pasażerskich w rejonie transektu jest komunikacja samochodowa indywidualna oraz układ linii autobusowych. Na północ od transektu przebiega międzynarodowa droga nr 4 (Zgorzelec – Przemyśl), a na południe – autostrada A4 (Katowice – Kraków).

Aktualne dane monitoringowe opadu pyłów i metali ciężkich w rejonie badań wskazują na wyraźny spadek ich wielkości w ostatnich latach (Rys. 6). Jednak, pomimo, iż dane te nie przekraczają wartości dopuszczalnych ich poziom jest wysoki w porównaniu do innych obszarów. Potwierdza to fakt zaliczania od wielu lat obszaru Jaworzna do miast



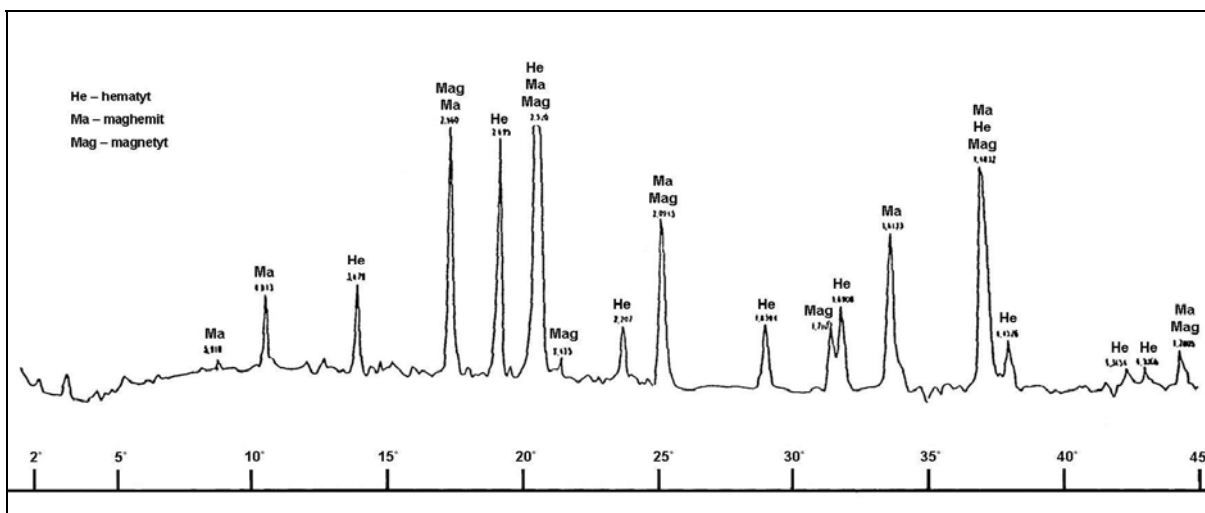
Rysunek 6. Średnioroczne wartości opadu pyłu, żelaza, manganu, cynku ołowiu i kadmu w latach 1983-2003 dla Jaworzna (źródło: dane WSSE Katowice, 1976-2005).

o dużej skali zagrożenia środowiska przez emisje zanieczyszczeń powietrza z zakładów szczególnie uciążliwych. W latach 1998–2003 miasto było na szóstym miejscu w rankingu (za Koninem, Bogatynią, Rybnikiem, Połańcem i Warszawą), a w 1990 na trzecim (za Krakowem i Bogatynią) z roczną emisją pyłu 33,1 tys. ton i SO₂ – 131,9 tys. ton (GUS 1991,1999, 2004).

Pyły atmosferyczne z rejonu transektu Jaworzno – Bukowno – Olkusz charakteryzują się dużym zróżnicowaniem pod względem granulometrycznym, jak i mineralogicznym. W pyłach opadowych z miejscowości najbliższych obiektowi badań przeważają cząsteczki o średnicach poniżej 60 μm, a 42 - 68% objętości zajmują cząstki o średnicach pyłu zawieszonego, czyli poniżej 10 μm (Tab. 11). Jabłońska (2003), badając pyły atmosferyczne z obszaru badań, stwierdziła, że ich głównymi składnikami są krzemionka w postaci kwarcu (SiO₂), którego ilość może dochodzić nawet do 65% obj. opadających pyłów, oraz gips (CaSO₄·2H₂O). Kolejny składnik to glinokrzemiany, które występują w formach kulistych lub ostrokrawędzistych i zawierają do kilku procent wagowych potasu, żelaza (0,87 – 38,5%), wapnia, magnezu i sodu, rzadziej zaś tytanu, cynku, miedzi i baru. Sadza i koksik to amorficzne składniki pyłów powstających w procesach spalania węgla; ich ilość dochodzi odpowiednio do kilkudziesięciu i kilkunastu procent objętościowych. W ilości od kilku do kilkunastu procent objętościowych występuje krystaliczna odmiana węgla, grafit, który ma formę ostrokrawędzistych płytek o gładkich powierzchniach.

Kolejnymi składnikami, licznie (do kilkunastu % obj.) występującymi w pyłach atmosferycznych i mającymi znaczenie ze względu na swe własności magnetyczne, są krystaliczne i amorficzne tlenki żelaza, a głównie hematyt, magnetyt, maghemit oraz wustyt (Rys. 7). Magnetyt i hematyt są surowcami w przemyśle hutniczym, ale mogą także powstawać w procesie spalania węgla na skutek termicznych przeobrażeń substancji mineralnej w węglu. W procesach koksowania węgla, w temperaturze 600°C, hematyt jest redukowany do magnetytu, następnie – w przedziale 600 - 700°C – magnetyt jest redukowany do wustytu. Powyżej 800°C wustyt jest redukowany do żelaza metalicznego (Strugała 1998). Stwierdzono również obecność kalcytu w postaci ostrokrawędzistych ziaren w ilości do kilku procent objętościowych. Natomiast w pyłach z rejonu Bukowna i Olkusza stwierdzono występowanie kalcytu, dolomitu oraz siarczku żelaza i cynku, mających wyraźny związek z budową geologiczną tych okolic i eksploatacją rud cynku (Jabłońska 2003). Wśród akcesorycznych (występujących w ilości do kilku %) składników pyłów wyróżniono m.in. chlorek ołowiu (tworzący się prawdopodobnie w trakcie spalania w silnikach benzynowych paliwa zawierającego alkilowe związki ołowiu), tlenek tytanu, dolomit (budujący skały

węglanowe, których wychodnie występują w rejonie Olkusza) oraz siarczan magnezu (Jabłońska 2003).



Rysunek 7. Rentgenogram próbki popiołu lotnego Elektrowni „Jaworzno III” (Magiera 2004).

Tabela 11. Szacunkowy rozkład procentowy średnic cząstek w pyłach opadowych z miejscowości najbliższych obiektowi badań (Jabłońska 2003).

Miejscowość	Rozkład procentowy średnic cząstek o wymiarach (µm):			
	poniżej 5	od 5 do 10	od 10 do 60	powyżej 60
Błędów	20	22	48	10
Łosień	32	36	21	11
Mysłowice	19	31	34	16
Olkusz	43	18	29	10
Bukowno	30	32	25	13
Olkusz Pomorzany	30	22	38	10
Sosnowiec Kazimierz	22	24	39	15

5. METODYKA BADAŃ

5.1. Badania terenowe

Pomiary terenowe wraz z poborem próbek glebowych prowadzono w kilku etapach: jesienią 2002, 2004 i 2005 roku.

W ramach prac terenowych wybrano w nieregularnej siatce (założenie regularnej siatki uniemożliwiały wyrobiska piaskowe KPP Rail „Szczakowa”) 61 powierzchni badawczych, zlokalizowanych między Jaworzmem a Olkuszem, tworzących transekt o długości ok. 20 km i powierzchni 5000 ha. Dziesięć powierzchni zostało usytuowanych w rejonie nie pokrytym roślinnością drzewiastą (powierzchnie porównawcze, najczęściej zbudowane z piasków tworzących spąg wyrobiska Kopalni Piasku KPP Rail „Szczakowa”), czterdzieści jeden – w drzewostanach iglastych, dziewięć – w liściastych, a jedną powierzchnię stanowi „podwójny profil” z glebą kopalną (Zał. 2).

Powierzchnie badawcze zlokalizowano na częściach wyrobiska objętych rekultywacją (symbol „R”), jak i pozostawionych sukcesji naturalnej (symbol „S”). W terenie sporządzono charakterystykę powierzchni z roślinnością drzewiastą, określając rodzaj i wiek występującej roślinności drzewiastej oraz miąższość poszczególnych poziomów i podpoziomów genetycznych gleb. Wiek rekultywowanych powierzchni badawczych ustalano na podstawie dokumentacji projektowej, tj. od daty zakończenia eksploatacji w poszczególnych częściach wyrobiska oraz daty rozpoczęcia rekultywacji biologicznej (na podstawie danych z Działu Miernictwa i Geologii KP „Szczakowa” S.A., ALP Nadleśnictwa Chrzanów: *Dokumentacja geologiczna złoża...* 1980, *Mapy Przeglądowe KP „Szczakowa” S.A.* 2000, *Operat Urzędniowy...* 1999, Projekt techniczny: *Rekultywacja wyrobiska...* 1988, Projekt wykonawczy: *Rekultywacja leśna...* 1999). Natomiast wiek nierekultywowanych powierzchni badawczych określono jako czas od pozostawienia obszaru po eksploatacji, wtedy bowiem rozpoczyna się sukcesja.

W terenie zmierzono objętościową (in. początkową) podatność magnetyczną (κ) przy użyciu sondy terenowej *Bartington MS2D*, zintegrowanej z systemem GPS *Pathfinder* firmy *Trimble*. Pomiary prowadzono zgodnie z procedurą podaną przez Schibler i in. (2002). Każdy pomiar składał się z 10-20 pojedynczych odczytów wartości κ w kole o średnicy 2 m, przy zachowaniu co najmniej 1 m dystansu od pnia drzewa, aby uniknąć efektu spowodowanego gromadzeniem się zanieczyszczeń spływających bezpośrednio po pniu wraz z wodami opadowymi. Pomiarów dokonano na powierzchni oraz w występujących poziomach

genetycznych profili glebowych, natomiast w przypadku poziomu organicznego w istniejących podpoziomach.

W celu określenia pionowego rozkładu wartości κ , z większości powierzchni badawczych, na których występowały drzewostany, pobrano, za pomocą sondy glebowej Humax, rdzenie glebowe długości 30 cm i średnicy 3,5 cm (po 2 rdzenie z powierzchni), z zachowaniem naturalnego układu profilu glebowego. Rdzenie pobierano bezpośrednio do plastikowych tub o wymiarach kompatybilnych z wymiarami sondy glebowej. W sumie pobrano 52 rdzenie glebowe. Z powierzchni porównawczych, czyli nie porośniętych roślinnością, próbki glebowe pobrano do szczelnie zamykanych plastikowych pojemników.

W rejonie Bukowna odkryty został profil gleby kopalnej – „podwójny profil glebowy”, z którego również pobrano próbki wykorzystane nie tylko do pomiarów magnetycznych i analiz na zawartość metali ciężkich, ale również do określenia wieku poszczególnych poziomów genetycznych tego profilu.

5.2. Badania laboratoryjne

W laboratorium dokonano pomiarów rozkładu podatności magnetycznej κ w rdzeniach, pozwalających śledzić głębokość występowania technogenicznych cząstek magnetycznych, których obecność często jest również odzwierciedleniem występowania metali ciężkich, przeważnie w zawartościach przekraczających wartości graniczne. Pomiary wykonywano z rozdzielczością 1 cm miernikiem podatności magnetycznej MS2C *Bartington*, przystosowanym do pomiarów rdzeni o średnicach do 4 cm.

W przypadku, gdy wartości κ były podwyższone (powyżej 20×10^{-5}), dokonano cięcia rdzeni, a próbki pobrane z odpowiednich poziomów i podpoziomów genetycznych tych rdzeni (umieszczone w standardowych pojemniczkach plastikowych o pojemności 1 cm^3 oraz zważone na wadze laboratoryjnej) poddano pomiarom podatności magnetycznej κ w dwóch częstotliwościach (0,465 kHz i 4,65 kHz), używając miernika MS2B *Bartington*. Na podstawie tych pomiarów obliczono wartości specyficznej podatności magnetycznej (χ) z następującej zależności:

$$\chi = \kappa / \rho \text{ [1/kgm}^3\text{]},$$

gdzie κ jest objętościową podatnością magnetyczną mierzoną w polu magnetycznym o niskim natężeniu ($\sim 1 \text{ mT}$), a ρ – gęstością właściwą badanej próbki. Uzyskane wartości umożliwiają porównanie wartości podatności magnetycznej próbek glebowych z różnych punktów pomiarowych i z różnych poziomów genetycznych oraz o różnych gęstościach.

W celu określenia pochodzenia cząstek magnetycznych (technogeniczne, geo-, czy pedogeniczne), powodujących wzrost wartości podatności magnetycznej, obliczono również wartości współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}) próbek o podwyższonych wartościach κ ($> 20 \times 10^{-5}$), zgodnie z zależnością:

$$\chi_{\text{FD}} = [(\kappa_{\text{LF}} - \kappa_{\text{HF}}) / \kappa_{\text{LF}}] \times 100\%,$$

gdzie κ_{LF} to objętościowa podatność magnetyczna mierzona w polu magnetycznym o niskiej częstotliwości (LF – low frequency: 0,465 kHz), a κ_{HF} to objętościowa podatność magnetyczna mierzona w polu magnetycznym o wysokiej częstotliwości (HF – high frequency: 4,65 kHz)

Analizy chemiczne na zawartość metali ciężkich wykonano metodą atomowej spektroskopii absorpcyjnej (spektrometr Perkin Elmer 1100B), a ekstrakcji pierwiastków dokonywano, zgodnie z metodyką Szwajcarskiej Agencji Środowiska, Lasów i Krajobrazu, po uprzednim wysuszeniu i rozdrobnieniu próbki, roztworem 2 M HNO_3 (Desaules i in. 2001). Oznaczono zawartości takich metali, jak: żelazo, mangan, cynk, ołów, kadm i miedź. Dla każdego oznaczonego pierwiastka obliczono współczynniki wzbogacenia poszczególnych

poziomów genetycznych gleb w stosunku do skały macierzystej (powierzchni porównawczych).

Określenia wieku próbek gleby kopalnej tzw. podwójnego profilu dokonano w Zakładzie Zastosowań Radioizotopów Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej, badając zawartość izotopu węgla ^{14}C techniką ciekłoscyntylacyjnej spektrometrii promieniowania beta (spektrometr promieniowania beta typu Quantulus 1220 firmy Perkin Elmer) po uprzednim oczyszczeniu próbek z zanieczyszczeń oraz przekształceniu węgla w nich zawartego na benzen. Do benzenu dodawano roztwór butylu PBD (2-(4-bifenylyl)-5-(4-tert-butylfenyl)-1,3,4-oxadiazole), który pod wpływem energii cząstek beta, powstających w wyniku rozpadu jądra ^{14}C , świeci. Wiek (koncentrację izotopu ^{14}C) określono poprzez analizę widma promieniowania dla badanych próbek, tła oraz wzorców i wyrażono liczbą lat jako wiek bezwzględny w latach BP (before present).

W ramach projektu MAGPROX, w Instytucie Geofizyki Uniwersytetu w Tybindze dla wybranych próbek zostały dodatkowo oznaczone parametry magnetyczne, umożliwiające identyfikację minerałów magnetycznych: zależność podatności magnetycznej od temperatury, namagnesowanie reszkowe, oraz wykonane badania mikroskopem skaningowym połączone z analizami rentgenowskimi.

Krzywe termomagnetyczne, umożliwiające identyfikację faz magnetycznych w badanej próbce, uzyskano, mierząc zmiany podatności magnetycznej w niskich (od -200°C do temperatury pokojowej) i wysokich temperaturach (od temperatury pokojowej do 700°C), stosując mostek podatnościowy KLY-3 (AGICO Inc. - Advanced Geoscience Instruments Company, Brno) wyposażony w piec CS-3. Oprogramowanie SUSTEL posłużyło do kontroli całego procesu pomiarowego, natomiast program CUREVAL – do obróbki surowych danych pomiarowych.

Krzywe izotermicznego namagnesowania reszkowego (IRM) i odmagnesowania uzyskano, stosując magnetyzer pulsacyjny z wirowym magnetometrem (JR-5 firmy Magnetic Measurements Company, UK) oraz magnetometr (Molspin Ltd., UK), stopniowo poddając próbki działaniu coraz silniejszego pola magnetycznego (o znanej wartości), powodującego zmiany właściwości magnetycznych pewnych minerałów, bez zmiany ich składu chemicznego i mineralnego. Najniższa wartość przyłożonego pola wynosiła 10 mT (tesla), a maksymalna – 2,5 T. Po odstawieniu pola magnetycznego mierzono namagnesowanie próbki. Pomiar umożliwia identyfikację minerałów, które mają zdolność utrzymania namagnesowania po wyłączeniu przyłożonego pola, zwane pozostałością magnetyczną.

Kolejnym etapem były badania morfologiczne tzw. ekstraktów magnetycznych, wyseparowanych z próbek glebowych za pomocą magnesu ręcznego i pokrytych w próżni cienką powłoką węgla, aby odprowadzić ciepło i ładunek elektryczny gromadzące się w materiale podczas obserwacji mikroskopowych (SEM – scanning electron microscopy) oraz analiz składu chemicznego (EDX – energy dispersive X-ray spectrometry), czyli podczas naświetlania materiału wiązką elektronów o wysokiej energii. Badania wykonano przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM/EDX - JEOL JCXA 733), współpracującego ze spektrometrem promieniowania rentgenowskiego z dyspersją energii, zaopatrzonego w detektory: Oxford Link Pentafet oraz Si(Li) detektor. Do analiz jakościowych ekstraktów magnetycznych wykorzystano metodę dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego przy użyciu dyfraktometru Philips PW1050/25, a do identyfikacji faz na dyfraktogramach zastosowano oprogramowanie ADM firmy Wassermann X-ray Analytics. Badania wykonano na Uniwersytecie w Monachium.

5.3. Statystyczne opracowanie wyników

Uzyskane wyniki pomiarów zostały poddane analizie statystycznej za pomocą programów Excel oraz Statistica. W ramach statystycznej charakterystyki otrzymanych wyników obliczono dla poszczególnych cech podstawowe parametry statystyczne, jak średnia arytmetyczna, mediana i odchylenie standardowe od wartości średniej. Zależności między poszczególnymi cechami określono za pomocą analizy korelacji z zastosowaniem współczynników korelacji liniowej r Pearsona i współczynników korelacji porządku rang R Spearman'a. W celu ustalenia zależności między podatnością magnetyczną a wiekiem powierzchni wyznaczono prostą regresji. Dla weryfikacji istotności różnic między wynikami badań oraz istotności współczynników korelacji pomiędzy parametrami przyjęto 95% granice ufności ($p=0,05$).

W celu ułatwienia interpretacji wyników, związki między badanymi parametrami zmieniającymi się wzdłuż transektu Jaworzno – Bukowno – Olkusz oraz w głąb profili glebowych przedstawiono graficznie, wykorzystując programy informatyczne Excel, Corel Draw i Surfer.

6. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

6.1. Badania terenowe

Powierzchnie badawcze porośnięte roślinnością drzewiastą, ze względu na wiek drzewostanu, uszeregowano w chronosekwencje. Chronosekwencje glebowe to zestawy kilku gleb, ukształtowanych na niewielkiej przestrzeni z podobnej skały macierzystej oraz w analogicznych warunkach rzeźby terenu i stosunków wodnych, różniące się jednak chwilą zapoczątkowania i/lub zakończenia procesu glebotwórczego (wiekiem), a zatem stopniem rozwoju (Bednarek i in. 2004):

- powierzchnie z drzewostanem w wieku do 10 lat,
- powierzchnie z drzewostanem w wieku 11 – 20 lat,
- powierzchnie z drzewostanem w wieku 21 – 40 lat,
- powierzchnie z drzewostanem w wieku 41 – 60 lat,
- powierzchnie z drzewostanem w wieku 61 – 75 lat,
- powierzchnie z drzewostanem w wieku 76 – 130 lat.

W poszczególnych chronosekwencjach dokonano podziału ze względu na występujące gatunki drzew (iglaste i liściaste) oraz na istniejące zagospodarowanie (powierzchnie rekultywowane i objęte sukcesją naturalną). Najstarsza powierzchnia z drzewostanem iglastym ma 130 lat (51S), a z liściastym – 60 lat (60S). Powierzchni rekultywowanych jest 22, a nierekultywowanych 28 (Załącz. 3).

Większość powierzchni badawczych z roślinnością została zlokalizowana w drzewostanach sosnowych, z sosną zwyczajną (*Pinus sylvestris* L.) jako gatunkiem dominującym i głównym lasotwórczym na badanym obszarze (zajmuje ponad 70% badanej powierzchni leśnej). Drugim, pod względem udziału gatunkiem jest brzoza brodawkowata *Betula pendula* Roth., zajmująca 20% powierzchni. Cztery powierzchnie badawcze zlokalizowano na siedliskach, w których licznie występowały inne gatunki drzew: modrzew europejski *Larix decidua* L. (19R), sosna czarna *Pinus nigra* Arn. (37S), dąb czerwony *Quercus rubra* L. (53R) oraz olsza szara *Alnus incana* Moench. (56R).

Powierzchnie badawcze były zróżnicowane nie tylko pod względem wieku i rodzaju drzewostanu, ale także pod względem zwarcia drzewostanu i typu gleby. Na niektórych powierzchniach stwierdzono zwarcie pełne (korony drzew stykały się brzegami lub częściowo zachodziły na siebie), na większości – zwarcie umiarkowane (między koronami drzew występowały wąskie, wolne przestrzenie), na kilku – przerywane (między koronami drzew

występowały przerwy, w których łatwo mogłyby zmieścić się pojedyncze drzewa), a tylko na pięciu najmłodszych powierzchniach – zwarcie luźne (przerwy między koronami były znacznie większe, a drzewa utraciły już wzajemny wpływ na siebie) (Szymański 2000).

Powierzchnie porównawcze zbudowane są z piasków budujących spąg wyrobiska, charakteryzujących się zróżnicowaną granulacją oraz barwą, od białej poprzez odcienie żółci do szarej.

W oparciu o Klasyfikację Gleb Leśnych Polski (2000), gleby na 25 powierzchniach, głównie rekultywowanych, zaliczono do podtypu gleb industrio- i urbanoziemnych o niewykształconym profilu (AU_i – Urbic Anthrosols, FAO 1988). Na fragmentach wyrobiska pozostawionych sukcesji wyróżniono dodatkowo arenosole inicjalne (AR_i – Haplic Arenosols, FAO 1988) – powierzchnie 18S, 30S, 31S oraz arenosole bielcowane (AR_b – Alblic Arenosols, FAO 1988) – powierzchnia 32S. Natomiast na powierzchniach z drzewostanem ponad 50 letnim stwierdzono występowanie gleb bielcowych właściwych (Bw – Haplic Podzols, FAO 1988), wytworzonych z piasków luźnych i słabo gliniastych (powierzchnie 40-49S, 51S), a na powierzchniach 37S, 39S, 50S oraz 58-60S - arenosoli właściwych (AR_w – Haplic Arenosols, FAO 1988).

Objętościowa podatność magnetyczna (κ) zmierzona w terenie była bardzo zróżnicowana i jej wartości na powierzchni ziemi kształtowały się od 0 w próbkach piasku z powierzchni porównawczych (skała macierzysta C budująca spąg wyrobiska) do $130,5 \times 10^{-5}$. Zgodnie z danymi literaturowymi (m.in. Strzyszc 1993, 2004, Strzyszc i in. 2005, 2006) wartości objętościowej podatności magnetycznej powyżej 30×10^{-5} świadczą o możliwości występowania anomalii magnetycznej, której może towarzyszyć anomalia geochemiczna przejawiająca się przekroczeniem zawartości dopuszczalnej w glebie, przynajmniej jednego z metali ciężkich. Prawie 40% powierzchni badawczych charakteryzuje się podwyższonymi wartościami κ (powyżej 30×10^{-5}), w tym połowa to wartości powyżej 50×10^{-5} , a na 8 powierzchniach wartość κ jest wyższa niż 100×10^{-5} , co może oznaczać wysoki stopień zagrożenia ekologicznego gleb tego rejonu. Podobne wyniki uzyskano, mierząc podatność magnetyczną gleb leśnych Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Katowicach, gdzie, ze względu na wieloletnie oddziaływanie emisji przemysłowych, na 80% obszaru występuje wysoki stopień zagrożenia (Strzyszc i in. 2006).

W głębszych poziomach genetycznych gleb podatność magnetyczna κ rosła, osiągając wartość ekstremalną 955×10^{-5} w podpoziomie butwinowym (Oh) na powierzchni 43S (leżącej praktycznie w granicach miasta Jaworzno), a następnie malała do wartości $0,4 \times 10^{-5}$

w skale macierzystej powierzchni zadrzewionych (C, Can). W kilku przypadkach wartości κ przekroczyły 300×10^{-5} , głównie w podpoziomach organicznych oraz w poziomie próchnicznym. Gleba na powierzchniach 39S, 43S, 44S, 46S, 47S charakteryzuje się bardzo wysokimi wartościami κ we wszystkich poziomach genetycznych gleby, przekraczającymi 200×10^{-5} (Tab. 12). Powierzchnie 39S i 47S zlokalizowane są na zachód od Olkusza, w niewielkiej odległości od miasta, ich wysoka podatność może być spowodowana opadem pyłów miejskich oraz pochodzących z palenisk domowych. Na gleby powierzchni 39S mogą mieć ponadto wpływ imisje przemysłowe z Zakładów Górniczo-Hutniczych „Bolesław” S.A., z Kopalni „Olkusz Pomorzany” oraz komunikacyjne z międzynarodowej drogi nr 4 (Zgorzelec – Przemyśl), a także wtórne pylenie z pobliskich osadników odpadów poflotacyjnych. Powierzchnie 43S i 44S leżą w rejonie Jaworzna, 43S – praktycznie w obrębie miasta, więc największy wpływ na tak wysokie wartości podatności magnetycznej gleb mają imisje przemysłowo - miejskie, pochodzące głównie z Zespołu Elektrowni „Jaworzno”, jaworznickich kopalń, a także Zakładów Chemicznych „Organika-Azot” S.A.

Kształtowanie się anomalii magnetycznej na powierzchniach tworzących transekt Jaworzno – Bukowno – Olkusz przedstawiono schematycznie w załączniku 4. Powierzchnie badawcze oraz stanowiska pomiarowe systemu badań sanitarnych atmosfery Wojewódzkiej Stacji Sanitarno-Epidemiologicznej w Katowicach (WSSE), zostały uszeregowane według wzrastającej długości geograficznej na osi odciętych. Na osiach rzędnych zaznaczone są wartości objętościowej podatności magnetycznej zmierzonej w terenie na powierzchni ziemi oraz wartości opadu pyłu w roku 1985, w którym opad był najwyższy i w roku 1998, kiedy poziom imisji po gwałtownym spadku od początku lat osiemdziesiątych, osiągnął poziom kilkakrotnie niższy w stosunku do lat 1985–87. Jednocześnie rok 1998 to ostatni rok, kiedy monitoring powietrza WSSE obejmował rejon badań.

Przebieg wykresu wskazuje na istnienie dwóch obszarów anomalii magnetycznych: na zachodzie (w rejonie Jaworzna) i na wschodzie transektu (w rejonie Olkusza), gdzie na wszystkich powierzchniach badawczych wartości κ wahają się od 30 do prawie 130×10^{-5} . Dodatkowo występuje kilka punktowych anomalii związanych z oddziaływaniem lokalnych źródeł zanieczyszczeń. Wartości podatności magnetycznej odpowiadają wielkościom opadu pyłu przedstawionym na wykresach, co świadczy o wpływie pyłowych imisji przemysłowych na kształtowanie tych anomalii.

Środkowa część transektu charakteryzuje się podatnością magnetyczną nie przekraczającą 30×10^{-5} , świadczącą o małym zagrożeniu ekologicznym gleby na linii Szczakowa – Ciężkowice – Bukowno. Jednak w przypadku tej części obszaru badań

niewielkie wartości κ mogą być spowodowane nie tyle brakiem źródeł emisji pyłów zawierających cząstki magnetyczne, ale specyfiką powierzchni badawczych. Występują tu bowiem powierzchnie porównawcze i najmłodsze powierzchnie z roślinnością, w których profilu glebowym poziom organiczny, pełniący rolę matrycy dla opadających cząstek magnetycznych i metali ciężkich, nie wykształcił się jeszcze lub charakteryzuje się małą miąższością.

6.2. Badania laboratoryjne

6.2.1. Pomiary magnetyczne

Układ podatności magnetycznej w zależności od głębokości został określony przez jej pomiar w 52 rdzeniach glebowych przy użyciu miernika MS2C *Bartington*, z rozdzielczością 1 cm. Objętościowa podatność magnetyczna (κ) na przedstawionych wykresach jest średnią wartością obliczoną z wyników pomiarów κ w dwóch rdzeniach. W celu ułatwienia interpretacji wyników występujące poziomy genetyczne gleb zostały przedstawione w różnych kolorach (Zał. 5).

Wartości objętościowej podatności magnetycznej, podobnie jak w pomiarach terenowych, wahały się od 0 w skale macierzystej do ponad 200×10^{-5} w poziomie organicznym (Of/Oh, Oh) powierzchni (28R, 35R, 49S) zlokalizowanych w zachodniej części transektu, czyli w rejonie występowania anomalii magnetycznej. Wartości bardzo wysokie (powyżej 100×10^{-5}) zmierzono w poziomie organicznym w rdzeniach z anomalnej, pod względem podatności magnetycznej powierzchni rejonu Olkusza (38R, 41S, 50S). W pozostałych rdzeniach wartości maksymalne κ nie przekraczały wartości 100×10^{-5} .

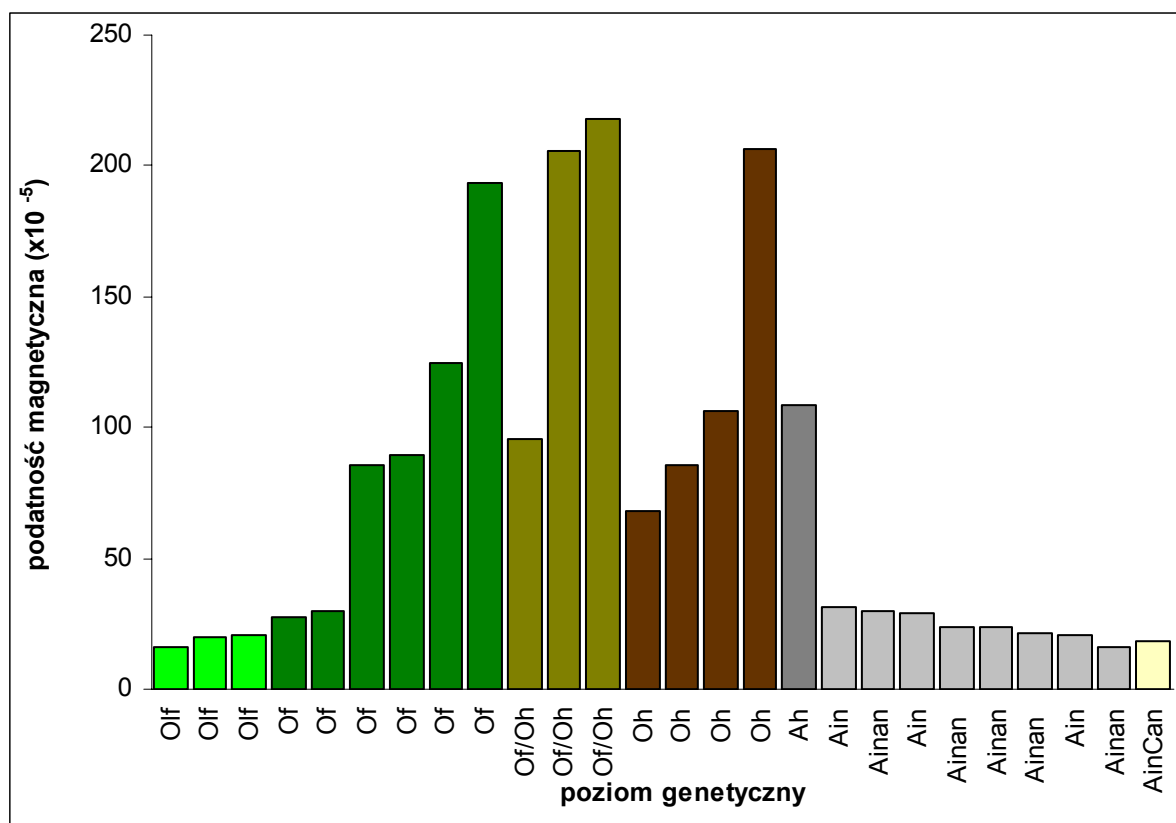
Układ podatności magnetycznej we wszystkich rdzeniach jest podobny: κ początkowo rośnie, na głębokości 2-5 cm osiąga wartość maksymalną i następnie spada do bardzo niskich wartości, porównywalnych z wartościami zmierzonymi na powierzchniach porównawczych, charakterystycznymi dla skały macierzystej. Taki przebieg podatności świadczy o jej antropogenicznym charakterze, a wzrost wartości κ w górnej części profilu wynika z nagromadzenia cząstek magnetycznych pochodzących z depozycji pyłów przemysłowych na powierzchni gleby. W glebach obszarów o minimalnym wpływie czynników technogenicznych (opad pyłów o różnej granulacji i pochodzeniu) największe nagromadzenie związków żelaza następuje w poziomie iluwialnym (B) (Strzyszczyński i Magiera 1993).

Zależność podatności magnetycznej (jej maksymalnej wartości zmierzonej w rdzeniu) od wieku powierzchni jest istotna ($p < 0,05$), a jej wartość określają współczynniki korelacji liniowej r Pearson'a: 0,49 i R Spearman'a: 0,67 (Tab. 12).

Brak jest zależności między maksimum podatności a poziomem genetycznym gleby, na którym to maksimum występuje, ale wartości najwyższe obserwuje się podpoziomach organicznych gleby (Of, Of/Oh, Oh) (Rys. 8, Tab. 12), co jest potwierdzeniem wyników uzyskanych przez innych autorów (m.in. Vodyanickiy i in. 1983, Strzyszczyński 1989, 1993, 1996).

Rozpatrując maksymalne wartości κ zmierzone w rdzeniach na obszarach rekultywowanych i nierekultywowanych, różnice między tymi powierzchniami są nieznaczne:

- średnia κ_{\max} dla powierzchni rekultywowanych: $72,6 \times 10^{-5}$,
- średnia κ_{\max} dla powierzchni nierekultywowanych: $74,7 \times 10^{-5}$.



Rysunek 8. Zależności maksymalnych wartości podatności magnetycznej (κ) pomierzonych w rdzeniach glebowych od poziomu genetycznego gleby, w którym maksimum występuje.

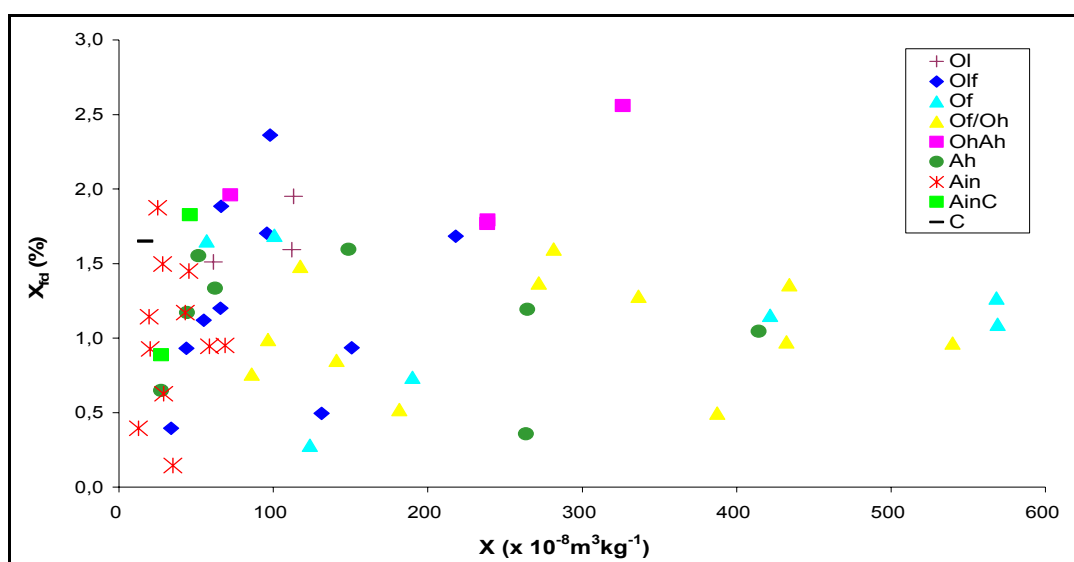
Tabela 12. Współczynniki korelacji liniowej (r Pearson'a) i nieparametrycznej (R Spearman'a) między maksymalnymi wartościami podatności magnetycznej a wiekiem powierzchni oraz poziomem genetycznym gleby.

	r Pearson'a	p	R Spearman'a	p
$\kappa_{\max}/\text{wiek}$	0,49	0,01	0,67	0,001
$\kappa_{\max}/\text{poziom}$	-0,3	0,13	-0,13	0,52

Pomiary specyficznej (χ) podatności magnetycznej oraz współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}) zostały wykonane dla 58 próbek glebowych wyciętych z rdzeni glebowych z poziomów o najwyższych wartościach κ pomierzonych sondą MS2C. Wyniki pomiarów podatności χ są bardzo zróżnicowane i mieszczą się w przedziale od 12,7 do $569 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, przy czym wartości powyżej $100 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ stwierdzono w prawie 50% badanych próbek (Tab. 13–14). Tak wysoka

podatność magnetyczna świadczy o dużej ilości minerałów magnetycznych w badanym materiale. Wyniki obliczeń współczynnika χ_{FD} wskazują na technogeniczne pochodzenie tych minerałów. Na rysunku 9 zestawiono wartości podatności χ próbek z różnych poziomów genetycznych badanych gleb z wartościami współczynnika χ_{FD} , które nie przekraczają 2,5%, a w większości przypadków są niższe od 2%. Oznacza to, że w badanych próbkach występują ziarna magnetyczne jedno- i wielodomenowe (SD/MD o ϕ - kilka μm do kilku mm), których źródłem są najczęściej procesy przemysłowe, brak jest natomiast drobnych ziaren superparamagnetyków (SP) pochodzenia pedogenicznego. Hay i in. (1997), badając 1176 próbek gleb Anglii, określił dwa kryteria identyfikujące gleby zawierające znaczne nagromadzenie cząstek powstających w procesach przemysłowych: wysokie wartości podatności magnetycznej ($> 37 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) i równocześnie niskie wartości współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej ($< 3\%$). Ponad 70% próbek glebowych z badanego transektu spełnia obydwie kryteria, dlatego można uznać, że zawierają one znaczne ilości cząstek technogenicznego pochodzenia.

W celu określenia faz mineralogicznych próbek z różnych poziomów genetycznych gleb, zbadano przebieg zmian podatności magnetycznej w zależności od temperatury (w zakresie wysokich temperatur: od 20 do 700°C). Pomiar tej zależności pozwala wykryć zmiany mineralogiczne spowodowane procesem rozmagnesowania termicznego oraz określić punkt Curie charakterystyczny dla poszczególnych minerałów magnetycznych.



Rysunek 9. Zestawienie wyników specyficznej podatności magnetycznej (χ) z wartościami współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}) dla poszczególnych poziomów genetycznych gleb.

Tabela 13. Wyniki pomiarów objętościowej podatności magnetycznej mierzonej w polach o niskiej (κ_{LF}) i wysokiej częstotliwości (κ_{HF}), masowej podatności magnetycznej (χ) oraz współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}) w poziomie organicznym gleb badanego transektu.

1	2	3	4	5	6
Nr powierzchni	Poziom genetyczny	κ_{LF}	κ_{HF}	χ	χ_{FD}
		$(\times 10^{-5})$		$(\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$	(%)
22r	Of/Oh	57,63	57,33	181,43	0,52
28r	Of/Oh	49,28	48,45	218,00	1,68
28r	Oh	138,27	136,50	336,49	1,28
35r	Of	31,25	31,02	190,10	0,74
35r	Of/Oh	178,57	176,83	432,30	0,97
49s	Of/Oh	93,51	92,58	96,57	0,99
55r	Olf	15,67	15,30	97,92	2,36
26r	Of	35,28	34,95	150,86	0,94
56r	Of	51,42	51,03	85,96	0,76
25r	Olf	35,63	35,53	123,74	0,28
27r	Ol	13,33	13,07	113,16	1,95
27r	Of	23,00	22,62	56,87	1,65
29s	Olf	29,45	29,12	54,98	1,12
31s	Olf	7,58	7,55	33,76	0,40
30s	Olf	18,58	18,23	66,23	1,88
24s	Olf	9,27	9,13	61,13	1,51
20s	Olf	9,67	9,58	43,67	0,93
18s	Olf	8,33	8,23	65,73	1,20
17r	Olf	16,43	16,15	95,88	1,70
40s	Of	206,37	203,57	434,00	1,36
51s	Of/Oh	154,67	153,90	387,42	0,50
51s	Oh/Ah	179,88	176,70	238,49	1,77
21r	Olf	24,25	24,13	131,23	0,49
54r	Olf	26,62	26,17	100,57	1,69
50s	Of	260,83	257,52	568,29	1,27
33s	Of	156,55	154,05	281,52	1,60
41s	Of/Oh1	132,86	131,73	140,98	0,85
41s	Of/Oh2	261,64	258,06	271,83	1,37
32s	Of	194,85	192,72	568,95	1,09
32s	Oh	38,78	38,02	72,18	1,96
36r	Of	77,22	76,33	421,70	1,15
36r	Of/Oh	167,62	166,00	539,76	0,97
36r	Oh/Ah	127,28	125,00	238,80	1,79
38r	Ol	21,97	21,62	111,88	1,59
38r	Of	43,87	43,22	117,45	1,48
38r	Of/Oh	195,68	190,67	326,33	2,56

Tabela 14. Wyniki pomiarów objętościowej podatności magnetycznej mierzonej w polach o niskiej (κ_{LF}) i wysokiej częstotliwości (κ_{HF}), masowej podatności magnetycznej (χ) oraz współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}) w poziomach próchnicznych, organiczno-mineralnych oraz organiczno-eluwialnych badanych gleb.

Nr powierzchni	Poziom genetyczny	κ_{LF}	κ_{HF}	χ	χ_{FD}
		$(\times 10^{-5})$		$(\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$	(%)
22r	Ain	153,62	151,17	148,59	1,59
28r	Ah	230,42	227,67	264,58	1,19
35r	Ah	267,80	265,00	414,26	1,05
49s	Ah	41,57	41,08	44,06	1,17
55r	Ainan	24,68	24,52	27,46	0,65
26r	Ainan	28,40	28,13	68,61	0,95
25r	Ainan	33,42	32,92	28,21	1,50
29s	Ainan	23,95	23,80	29,02	0,63
31s	Ain	15,18	15,12	12,59	0,40
30s	Ain	24,75	24,53	27,44	0,89
24s	Ain/Can	15,15	14,90	16,9	1,65
20s	Ainan	20,10	19,87	19,55	1,14
18s	Ain	61,40	60,82	58,63	0,94
17r	Ainan	25,60	25,12	25,16	1,88
40s	Ah	61,47	60,65	62,21	1,33
51s	Ah	55,43	54,57	51,55	1,55
21r	Ainan	13,82	13,80	35	0,14
54r	Ainan	41,82	41,33	43,03	1,17
50s	Ah	25,87	25,63	20,2	0,93
33s	Ain/Can	58,60	57,75	45,28	1,45
36r	Ah	44,90	44,08	46,06	1,83

Krzywe termomagnetyczne próbek zarówno z poziomu organicznego, próchnicznego oraz skały macierzystej powierzchni 57R, na której stwierdzono występowanie najwyższej anomalii magnetycznej, przedstawiono na załączniku 6 (z lewej strony krzywe niskotemperaturowe, a z prawej strony – krzywe wysokotemperaturowe). Krzywe termomagnetyczne dla niskich temperatur pozwalają na identyfikację magnetytu, o którego obecności świadczy punkt przegięcia krzywej, zwany przemianą Vervey’a przy temperaturze ok. -150°C . W próbkach badanych poziomów genetycznych gleby występuje magnetyt. Potwierdziły to krzywe podatności w wysokich temperaturach, charakteryzujące się punktem przegięcia (temperaturą Curie) przy temperaturze $580\text{--}600^{\circ}\text{C}$. Odwracalność krzywych grzania i chłodzenia świadczy o obecności magnetytu jako jedynego minerału ferrimagnetycznego, jednak w przypadku omawianych wyników, krzywe te nie są odwracalne (Załącznik 6), tzn., że w próbkach występują w małych ilościach jeszcze inne minerały

magnetyczne (Özdemir i in. 1993). Wzrost podatności w skale macierzystej przy temperaturze ok. 420°C może być spowodowany obecnością niewielkiej ilości pirytu, który uległ przekształceniu w magnetyt (Goddu i in. 2004).

Wyniki pomiarów izotermicznego namagnesowania resztkowego nasycenia (SIRM) próbek gleby z powierzchni z 80-100 letnią sosną zwyczajną (49S), przeanalizowane przy pomocy programu Kruiver IRM-CLG (2001) wykazały obecność dwóch głównych faz magnetycznych, między którymi proporcje zmieniają się w zależności od poziomu genetycznego gleby. Zawartość pierwszego składnika o niskiej wartości koercji pozostałości magnetycznej (41,7 – 46,8 mT), najprawdopodobniej magnetytu (Kruiver i in. 2001) wynosi 96% w wierzchniej warstwie gleby i maleje z głębokością do wartości 89% w poziomie iluwialnym. Zawartość drugiego składnika o wyższej koercji wzrasta wraz z głębokością (Tab. 15). Obecność składnika o cechach magnetytu w wierzchnim poziomie gleby świadczy o jego technogenicznym pochodzeniu. Magnetyt powstaje bowiem m. in. w wysokotemperaturowych procesach spalania węgla i obecny jest w popiołach lotnych i pyłach energetycznych.

Tabela 15. Wyniki pomiarów izotermicznej pozostałości magnetycznej gleby z powierzchni 49S (80-100 letnia sosna zwyczajna).

Poziom genetyczny	Składnik	Zawartość (%)	SIRM (Am^{-1})	$\log B_{1/2}$ (mT)	$B_{1/2}$ (mT)	DP-parametr dyspersji
Of1	1	96,3	5270	1,65	44,7	0,35
	2	3,7	200	3,10	1300	0,40
Of2	1	92,8	19300	1,67	46,8	0,33
	2	7,2	1500	3,20	1600	0,30
Oh/Ah	1	91,9	19300	1,67	46,8	0,34
	2	8,1	1700	3,40	2500	0,30
Ah/E	1	91,4	635	1,65	44,7	0,37
	2	8,6	60	3,00	1000	0,36
Bh	1	89,2	370	1,62	41,7	0,34
	2	10,8	45	3,00	1000	0,30

6.2.2. Zawartości metali ciężkich

Zależności pomiędzy podatnością magnetyczną a zawartością metali ciężkich potwierdziły istnienie istotnych związków korelacyjnych między podatnością magnetyczną a zawartością większości metali ciężkich (Strzyszc 1993, Vodyanickiy i Dobrovolsky 1998, Kapička i in. 1999, Maier i Scholger 2004, Matysek i in. 2004, Zawadzki i in. 2004, Kusza i Strzyszc 2005, Spiteri i in. 2005).

Specyfika rejonu badań (wpływ opadu pyłów metalurgicznych, energetycznych oraz ich mieszanin o różnym stosunku ilościowym) spowodowała, że określono zawartość metali ciężkich w glebach, zarówno na obszarach leśnych, jak i na powierzchniach porównawczych. Dla określenia wpływu czynnika czasu na wzrost podatności magnetycznej i zawartości metali ciężkich w glebach określono ich ilość w profilu gleby kopalnej, na którą wpływ technogenicznych metali szacowany jest na około 120 – 2000 lat.

Zawartości metali ciężkich w próbkach z powierzchni porównawczych wahają się w bardzo szerokich zakresach, wartości maksymalne są wielokrotnie wyższe od minimalnych: 20-krotnie w przypadku manganu i 50-krotnie w przypadku żelaza. Najwyższe wartości stwierdzono w próbkach białego piasku z domieszką żwiru, czyli w próbkach charakteryzujących się również wyższymi wartościami podatności magnetycznej (powierzchnie 7–10). Dlatego do dalszych rozważań oraz do obliczenia współczynników wzbogacenia jako wartości porównawcze „zerowe” postanowiono przyjąć uśrednione wartości zawartości metali ciężkich dla próbek 1–6, które są zbliżone do wartości mediany wyznaczonej dla wszystkich 10 próbek (Tab. 16). Przyjęto więc następujące zawartości metali dla tła geochemicznego, odpowiadające zawartościom oznaczanych metali w skale macierzystej badanego obszaru: żelazo – $526,5 \text{ mgkg}^{-1}$, mangan – $4,95 \text{ mgkg}^{-1}$, cynk – $4,95 \text{ mgkg}^{-1}$, ołów – $2,3 \text{ mgkg}^{-1}$, kadm – $0,02 \text{ mgkg}^{-1}$ i miedź – $0,65 \text{ mgkg}^{-1}$.

Powierzchnie badawcze porośnięte drzewostanami charakteryzuje duże zróżnicowanie zawartości metali ciężkich, zarówno przestrzenne, jak i w głąb profili glebowych. Zawartości wszystkich badanych pierwiastków, z wyjątkiem miedzi (której zawartość tylko w jednym przypadku przekroczyła wartość graniczną 40 mgkg^{-1}), są bardzo wysokie i przekraczają wartości graniczne (Desaules i in. 2001), zwłaszcza w poziomie organicznym gleby.

Zawartość żelaza (Fe) kształtuje się na podobnym poziomie w całym transekcje, przekraczając często wartości charakterystyczne dla lekkich gleb piaszczystych: 0,32–1,07, średnio 0,57% (Kabata-Pendias i Pendias 1993). Wysoka, często najwyższa w całym profilu glebowym, jest zawartość żelaza w skale macierzystej na powierzchniach centralnej części

Tabela 16. Zawartości metali ciężkich w próbkach piasku (skały macierzystej) z powierzchni porównawczych.

Nr powierzchni porównawczej	K	Fe	Mn	Zn	Cd	Pb	Cu
	($\times 10^{-5}$)	mgkg ⁻¹					
1, 2	0,4	480	4,4	2,8	< 0,02	1,2	1,0
3	5,1	310	3,4	7,6	0,02	3,8	0,4
4	0,2	236	3,2	5,6	< 0,02	1,8	0,4
5, 6	0,5	1080	8,8	3,8	< 0,02	2,4	0,8
średnia 1-6	1,53	526,5	4,95	4,95	0,02	2,3	0,65
7	4,8	9570	65,4	26,8	0,06	7,4	4,0
8	5,3	11600	54,8	25,6	$\leq 0,02$	11,4	2,4
9	6,5	578	22,6	4,4	0,02	2,4	0,6
10	5,0	546	21,8	5,6	0,04	1,6	0,6
średnia	3,46	3050,00	23,05	10,28	0,02	4,00	1,28
mediana	4,89	562,00	15,30	5,60	0,01	2,40	0,70
odch. stand.	2,63	4688,98	24,30	9,94	0,02	3,58	1,28

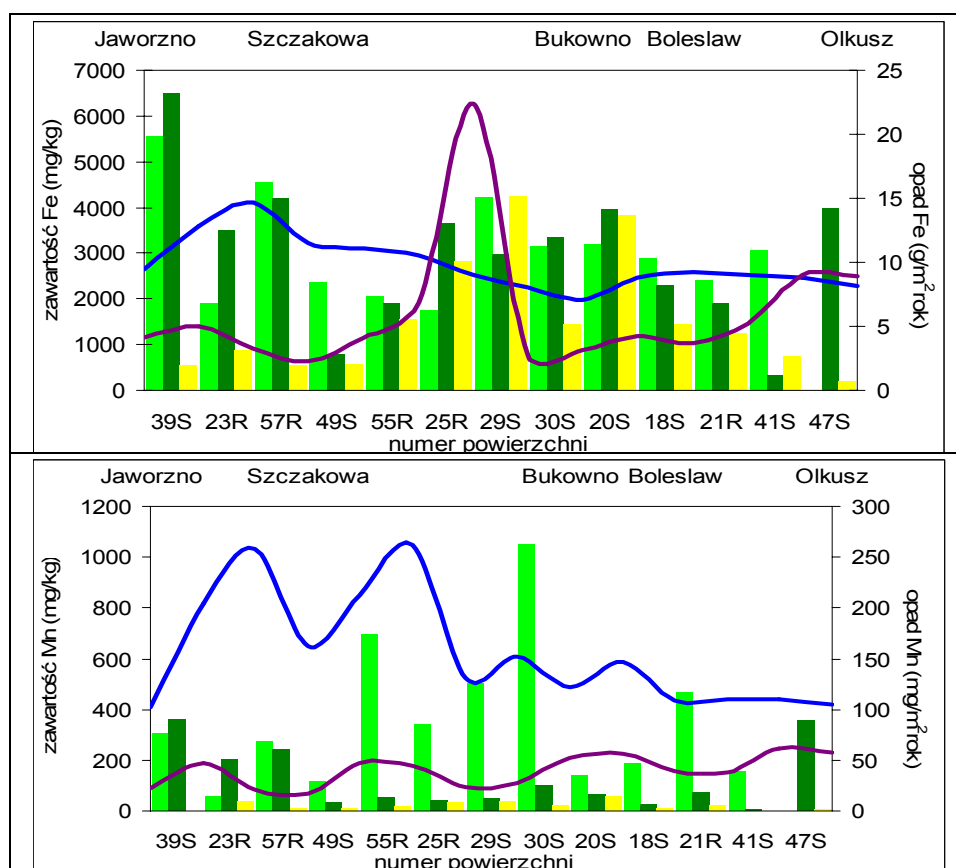
transektu (maksymalna wartość to 8460 mgkg⁻¹ na powierzchni 29S). Jest to obszar o najniższych wartościach podatności magnetycznej, dlatego można by przypuszczać, że na zawartość żelaza mają wpływ tlenki i siarczki tego metalu zawarte w wychodniach rud cynkowo-ołowiowych (Cabała 1996). Jednak przebieg krzywej opadu żelaza na rys. 10 (zwłaszcza w roku 1998) wskazuje imisję pyłową jako możliwe źródło tak wysokich zawartości żelaza w tym rejonie. Z drugiej strony, biorąc pod uwagę fakt, że skałą macierzystą badanego obszaru są piaski, zawierające 0,43–0,537% hematytu (Strzyszczyński 1967), jego obecnością można wyjaśnić wzrastające ilości żelaza w głąb profilu glebowego. Żelazo w glebach występuje w różnych formach, często w postaci antyferromagnetycznego hematytu, którego podatność magnetyczna, w porównaniu z magnetytem i maghemitem jest niska (Tab. 3). W metodyce Szwajcarskiej Agencji Środowiska, Lasów i Krajobrazu (Desaules i in. 2001) dla żelaza oraz manganu nie ma określonych wartości granicznych.

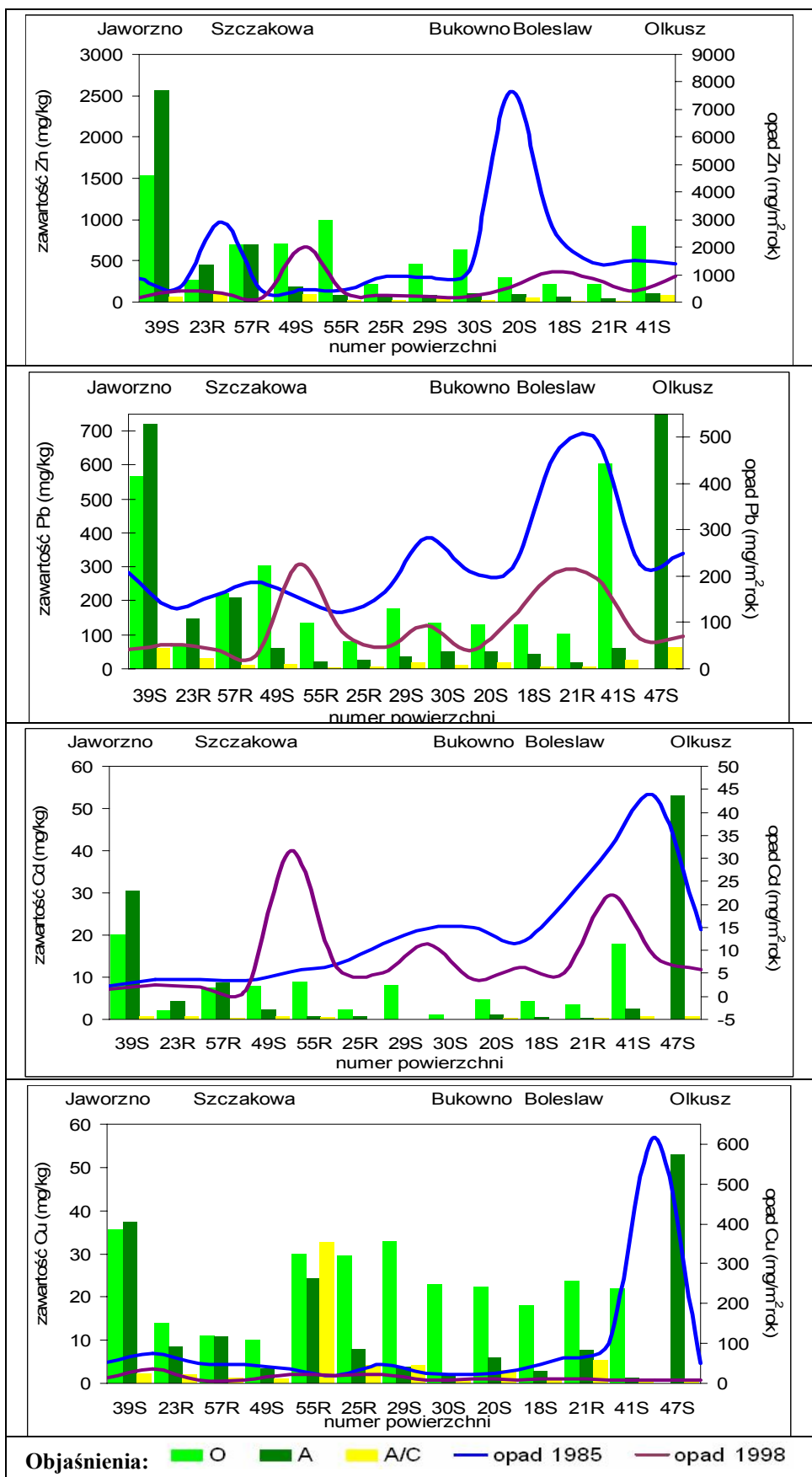
Zawartość manganu na badanym obszarze nie przekracza wartości 1300 mgkg⁻¹, więc mieści się w przedziale uważanym za jego naturalną zawartość w glebach Polski (Kabata-Pendias i Pendias 1993). Wyższe jego zawartości obserwuje się w podpoziomiu surowinowym i w centralnej części rejonu badań (Rys. 10, Zał. 7).

Zawartości pozostałych metali ciężkich, czyli ołowiu, kadmu i cynku znacznie przekraczają wartości graniczne, zwłaszcza w poziomie organicznym gleby. Przebieg ich zawartości w transekcji wygląda podobnie jak przebieg wartości podatności magnetycznej, tzn., że najwyższe zawartości tych metali występują na zachodnim i wschodnim krańcu transektu, w rejonie Jaworzna i Olkusza, a część centralna transektu charakteryzuje się niższymi, ale powyżej wartości granicznych zawartościami Pb, Zn i Cd. Oznacza to istnienie

anomalii geochemicznych, towarzyszących anomaliiom magnetycznym na obszarze badań. Krzywe opadu poszczególnych metali nie odzwierciedlają ich zawartości w glebie, co można wytłumaczyć różnorodnymi przemianami, jakim podlegają metale w glebach (m.in. wymywanie do wód gruntowych, pobieranie przez rośliny), a przede wszystkim występowaniem na badanym obszarze pokładów rud cynku i ołowiu oraz dolomitów kruszczośnych. Największe wzbogacenie w te pierwiastki śladowe nastąpiło w organicznych podpoziomach gleb (Olf, Of/Oh, Oh/Ah), przy czym dla kadmu odnotowano współczynniki wzbogacenia o wartościach przekraczających 1000 (powierzchnie 39S i 41S). Ponadto stwierdzono istotne (poziom ufności $p < 0,05$) współczynniki korelacji liniowej pomiędzy podatnością magnetyczną i zawartością żelaza (0,54), cynku (0,52), ołowiu (0,52) oraz kadmu (0,62). Nieco wyższe (z wyjątkiem żelaza) były współczynniki korelacji nieparametrycznej Spearman'a (Zał. 7).

Obserwowane wysokie wartości podatności magnetycznej gleb oraz przekraczające liczby graniczne zawartości metali ciężkich w badanych próbkach kwalifikują rejon badań jako obszar o dużym zagrożeniu ekologicznym spowodowanym antropopresją przemysłową.



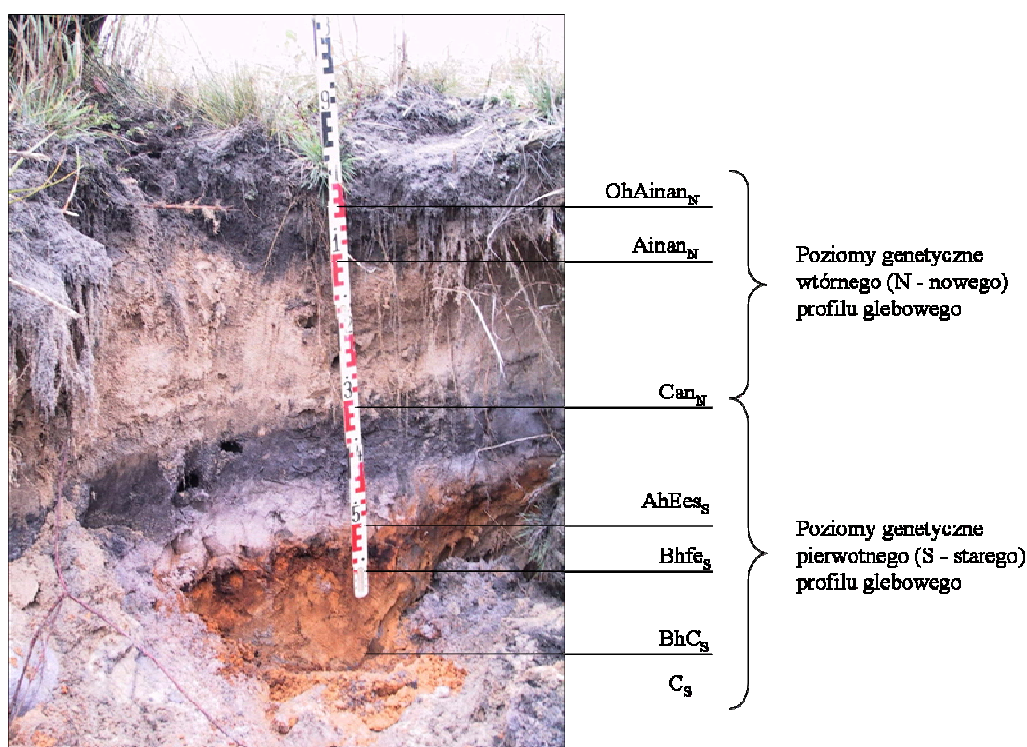


Rysunek 10. Zawartości metali ciężkich w poziomach genetycznych gleb powierzchni uszeregowanych wzdłuż transektu od zachodu na wschód na tle zawartości metali w opadającym pylu 1985 i 1998 roku (na podstawie danych WSSE Katowice).

Obserwacje mikroskopowe połączone z wynikami spektroskopii rentgenowskiej (SEM/EDX) pozwoliły na określenie morfologii cząstek magnetycznych oraz ich składu ilościowego. Zdjęcia przedstawione w załącznikach 8–13 uwidaczniają bardzo duże zróżnicowanie rozmiarów, kształtów oraz morfologii wyseparowanych z gleby cząstek magnetycznych. Zawierają one w swoim składzie kwarc, glinokrzemiany, węglany, tlenki żelaza i manganu, a także pewne ilości cynku, tytanu, ołowiu i innych metali ciężkich. Ich powierzchnie zmieniają się od gładkich poprzez chropowate, do postrzępionych i bardzo nieregularnych. Większość cząstek ma cechy charakterystyczne dla pyłów i aerozoli pochodzenia technogenicznego badanych przez innych autorów (Zwoździak i in. 1987, Jabłońska 2003, Koniecznyński i in. 2005).

6.2.3. Powierzchnia specjalna z podwójnym profilem

Powierzchnia specjalna to powierzchnia z glebą kopalną o profilu, który ukształtowany został w przeszłości w środowisku glebotwórczym różnym od dzisiejszego, a następnie przykryty młodszymi osadami, o pochodzeniu antropogenicznym. Górną część profilu określono jako wtórną lub nową, natomiast dolną – jako pierwotną lub starą. Z tego względu, że przyczyną powstania górnego wtórnego profilu glebowego była działalność antropogeniczna, a poziom próchniczny jest słabo wykształcony zaliczono powierzchnię do gleb industrio- i urbanoziemnych o niewykształconym profilu (AUi – Urbic Anthrosols, FAO 1988). W dolnej części profilu naturalna gleba bielnicowa właściwa (Bw – Haplic Podzols, FAO 1988) jest dobrze zachowana (Rys. 11).



Rysunek 11. Poziomy genetyczne wyróżnione w podwójnym profilu.

Gleby kopalne odgrywają szczególnie dużą rolę w rekonstrukcji dawnego środowiska, a także jego ewolucji w czasie (Bednarek i in. 2004). Ze względu na zróżnicowanie wiekowe, próbki z tej odkrywki wykorzystano do prześledzenia zmian podatności magnetycznej oraz zawartości metali ciężkich w profilu glebowym w zależności od czasu. W tym celu w terenie zmierzono wartości objętościowej podatności magnetycznej próbek z wyróżnionych poziomów genetycznych, a w laboratorium – wartości specyficznej podatności magnetycznej (χ), współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}); przy czym

ze względu na niskie wartości podatności współczynnik χ_{FD} obliczono tylko dla jednej próbki. Określono również zawartość żelaza oraz metali ciężkich (Mn, Zn, Pb, Cd, Ni, Cu), a także wiek gleby pierwotnej i nowej.

Wartości podatności magnetycznej, zarówno objętościowej, jak i specyficznej były wysokie tylko w wierzchniej warstwie gleby, w poziomie OhAinan i wynosiły odpowiednio: 176×10^{-5} (pomiar terenowy), 121×10^{-5} (pomiar laboratoryjny) i $94 \times 10^{-8} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. We wszystkich głębszych poziomach genetycznych gleby wartości podatności magnetycznej były bardzo niskie, porównywalne z wartościami charakterystycznymi dla skały macierzystej.

Współczynnik zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej obliczony dla poziomu OhAinan o najwyższych wartościach podatności wyniósł 0,99%. Świadczy to o obecności dużych ziaren magnetycznych technogenicznego pochodzenia. Stwierdzono natomiast zróżnicowanie zawartości metali ciężkich, których nagromadzenie jest najwyższe również w wierzchnim poziomie profilu, malejąc gwałtownie z głębokością. Jednak w poziomie iluwialnym obserwuje się wzrost zawartości żelaza do wartości maksymalnej dla całego profilu: $2600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Jest to zrozumiałe, ponieważ w tym poziomie, w rezultacie procesu glebotwórczego, gromadzą się związki żelaza wymyte z poziomów wyżej leżących. Zawartości cynku i niklu również wzrosły w tym poziomie, ale w dużo mniejszym stopniu. W poziomie próchniczno–eluwialnym nastąpiło podwyższenie zawartości ołowiu do $64,6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Załącz. 14, 15), spowodowane prawdopodobnie jego występowaniem w podłożu geologicznym, które w rejonie Bukowna stanowią trzeciorzędowe utwory rudonośne. Ołów jest składnikiem galeny i cerusytu, zawierających odpowiednio: około 10% i 3% ołowiu (Cabała 2001).

Pomimo ekstremalnych zawartości niektórych metali ciężkich, dla wszystkich, z wyjątkiem żelaza uzyskano istotne wysokie współczynniki korelacji między podatnością magnetyczną a metalami ciężkimi, co wskazuje na ich technogeniczne pochodzenie (Załącz. 15).

Wyniki datowania radiowęglowego potwierdziły występowanie dwóch profili: pierwotnego, którego wiek oszacowano na $2080 \pm 140 \text{ BP}$ oraz wtórnego, którego wiek dla próbki z poziomu Ainan wyznaczono na $120 \pm 95 \text{ BP}$. Wartości podatności magnetycznej oraz zawartości metali ciężkich, zwłaszcza Pb, Zn, Cd w próbkach nowego profilu związane są z depozycją pyłów w okresie intensywnego uprzemysłowienia w XX wieku. Badania chemiczne oraz datowanie torfów na Hali Izerskiej również wykazały najintensywniejsze nagromadzenie Pb i Cd w ostatnim stuleciu, natomiast zawartość cynku wzrastała już od ok. 1000 roku, co można wiązać z okresami produkcji brązu oraz pozyskiwania srebra z rud cynkowo–ołowiowych (Strzyszczyński i Chróst 1995).

6.2.4. Kształtowanie podatności magnetycznej i zawartości metali ciężkich w glebach leśnych badanego obszaru w aspekcie historycznym

Jednym z celów prowadzonych badań było określenie wpływu czynnika czasu na kształtowanie się podatności magnetycznej gleb oraz zawartości w nich metali ciężkich. Obszar badań, ze względu na kilkudziesięcioletnią etapową eksploatację piasków podsadzkowych, jest zróżnicowany pod względem wieku powierzchni. Powierzchnie, na których zakończono eksploatację były zrekultywowane, głównie w kierunku leśnym

Czas nie jest czynnikiem glebotwórczym w ścisłym tego słowa znaczeniu, oznacza raczej trwanie procesu powstawania i rozwoju gleby (Dobrzański i Zawadzki, 1995). Współdecyduje on o morfologii oraz innych właściwościach gleb zarówno współczesnych, jak i kopalnych (Bednarek i in. 2004). Im dłuższy jest okres, w ciągu którego wytwarzała się dana gleba, tym silniej mogły oddziaływać czynniki glebotwórcze.

Na terenach pogórnicych kolejne stadia rozwoju gleb zależą w głównej mierze od uziarnienia, składu mineralnego skały macierzystej i oddziaływania wprowadzonej roślinności (Skawina 1958). Na terenie objętym badaniami, gdzie skała macierzysta jest uboga w składniki mineralne, udział roślinności w formowaniu gleb ma podstawowe znaczenie, zwłaszcza, że ilość i jakość docierającego na powierzchnię ziemi opadu organicznego, a w dalszej kolejności rozwój poziomów próchnicznych zależy od składu gatunkowego drzewostanów (Katzur i Haubold–Rosar 1996).

W rejonach o silnej antropopresji wraz z opadem organicznym opadają zanieczyszczenia przemysłowe, w tym pyły zawierające ferrimagnetyczne minerały żelaza. Właśnie opad pyłów i opad organiczny to główne czynniki stymulujące powstawanie podatności magnetycznej na badanym obszarze. Fakt, że piaski były eksploatowane etapowo, a obszary po ich eksploatacji sukcesywnie zajmowane przez roślinność (w wyniku rekultywacji bądź sukcesji), możliwe było chronologiczne wydzielenie powierzchni badawczych. Wyniki badań odzwierciedlają pewne chronologiczne zależności.

Biorąc pod uwagę uśrednione wartości κ , począwszy od powierzchni porównawczych (4×10^{-5}), obserwuje się jej wzrost wraz z wiekiem powierzchni do wartości 79×10^{-5} na powierzchniach 50–60 letnich z drzewostanem liściastym i wartości 107×10^{-5} - z drzewostanem sosnowym w tym samym wieku. W starszych drzewostanach iglastych następuje spadek κ do wartości 62×10^{-5} (Zał. 3). Jednak na powierzchni gleby kopalnej, której wiek określono na 120 (± 95) lat wartość κ wyniosła 176×10^{-5} . Podobne tendencje obserwuje się dla poszczególnych poziomów genetycznych gleb. Podatność κ osiąga maksimum w poziomie organicznym i próchnicznym (Of/Oh, Oh, Oh/Ah, Ain, Ah) na

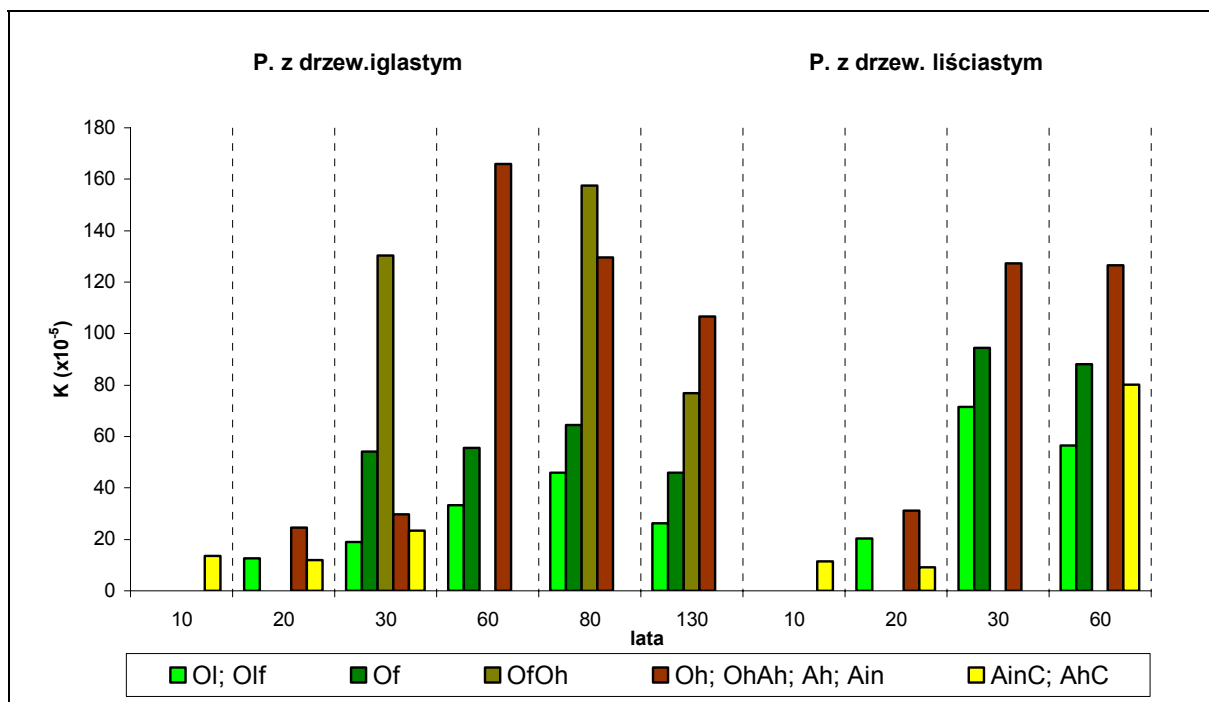
powierzchniach 50–60 letnich z drzewostanem iglastym, a minimum w skale macierzystej pod drzewostanem (Rys. 12).

Wartości objętościowej podatności magnetycznej zmierzonej w laboratorium, podobnie jak w pomiarach terenowych, wahały się od 0 w skale macierzystej do ponad 200×10^{-5} w poziomie organicznym (Of/Oh) 80–100 letniego boru sosnowego (49S). Wartości bardzo wysokie (powyżej 100×10^{-5}) zmierzono w rdzeniach z powierzchni 70 letniej (41S) również w poziomie organicznym oraz 95–100 letniej (50S) w podpoziomie butwinowym.

Analizując wartości masowej podatności magnetycznej (uśrednione dla poszczególnych podpoziomów genetycznych gleby i grup wiekowych), obserwuje się wyraźny wzrost wartości χ (nawet o 200%) wraz z wiekiem powierzchni zarówno w poziomie organicznym (od 89,17, dla powierzchni 10 letnich do $247,55 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, dla powierzchni najstarszych), jak i w poziomach próchnicznych (od 34,8, dla powierzchni najmłodszych do $111,37 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, dla powierzchni 100–130 letnich), przy czym jej wartości są 2–3 krotnie wyższe w poziomie organicznym.

Zawartości metali ciężkich wzrastają również wraz z wiekiem powierzchni w poziomach organicznych i próchnicznych. Jednak w glebie kopalnej są mniejsze niż na powierzchniach z 60-100 letnimi drzewostanami (Tab. 17). Wzrost podatności magnetycznej oraz zawartości metali ciężkich z wiekiem powierzchni spowodowany jest głównie imisjami przemysłowymi. Zanieczyszczenia zawarte w depozycie, a zwłaszcza metale ciężkie, kumulują się w poziomie organicznym gleb, który pełni rolę filtra dla zanieczyszczeń atmosferycznych (Greszta 1983). Przyczyną spadku podatności magnetycznej w glebach najstarszych drzewostanów może być radykalne zmniejszenie opadu pyłu po roku 1990, bardziej luźne zwarcie drzewostanów w wieku powyżej 80 lat, z czym związana jest mniejsza intercepcja zanieczyszczeń przez korony drzew. Różnice w układzie i gęstości poszczególnych podpoziomów genetycznych gleb, zwłaszcza Of i Oh pod drzewostanami iglastymi i liściastymi nie są bez znaczenia.

Wpływ imisji przemysłowych na kształtowanie podatności magnetycznej potwierdziły wyniki badań gleby kopalnej, której wierzchnie poziomy (najmłodsze) charakteryzowały się wysokimi wartościami podatności magnetycznej oraz największym nagromadzeniem metali ciężkich w stosunku do poziomów starszych (ponad 2000 lat). Wartości podatności magnetycznej oraz zawartości Pb, Zn, Cd w próbkach nowego profilu (ok. 120 letniego) gleby kopalnej najprawdopodobniej związane są z depozycją pyłów w okresie intensywnego uprzemysłowienia w XX wieku.



Rysunek 12. Usredniona objętościowa podatność magnetyczna zmierzona w terenie dla poszczególnych poziomów genetycznych gleby w zależności od wieku powierzchni.

Tabela 17. Zawartości Zn, Pb i Cd w poziomach genetycznych gleb w zależności od wieku powierzchni.

Poziom genetyczny	Zn	Pb	Cd
	mg·kg ⁻¹		
Powierzchnie < 20 lat			
Olf	397,6	115,2	4,74
Ain	150,6	56,3	1,32
AinC	40,6	13,4	0,44
Powierzchnie 21 – 30 lat			
Olf	481,5	146,1	4,71
Ain	221,4	75,6	2,71
AinC	32,3	12,1	0,3
Powierzchnie 60 – 80 lat			
Ol/Of	859,5	335	10,18
Oh/Ah	740,4	223,8	11,16
Ah/Ees	45,5	23,3	0,56
Powierzchnie 81 – 100 lat			
Ol/Of	1918	756,2	21,84
Oh/Ah	1388,1	447,3	15,72
Ah/Ees	116,9	36,9	0,71
Gleba kopalna 120 (±95) lat			
OhAinan	546,0	194,0	6,42
Ainan	19,2	8,8	0,16
Gleba kopalna 2080 (±140) lat			
AhEes	2,2	64,6	< 0,02
Bhfe	13,2	8,4	≤ 0,02

7. OCENA ZAGROŻENIA GLEB LEŚNYCH TRANSEKTU JAWORZNO – BUKOWNO – OLKUSZ PRZEZ PYŁOWE IMISJE PRZEMYSŁOWE

Obszar transektu Jaworzno – Bukowno – Olkusz, w dużej mierze zalesiony, ze względu na swoje położenie, jest pod ciągłym wpływem pyłowych imisji przemysłowych z miast województwa śląskiego i małopolskiego, a także z licznych lokalnych źródeł emisji, z których najbardziej istotnymi są Zakłady Górniczo–Hutnicze „Bolesław” oraz Zespół Elektrowni „Jaworzno”. Ocenę zagrożenia gleb należy więc rozpatrywać poprzez analizę opadu pyłu oraz metali ciężkich w tym rejonie w okresie powojennym, a konkretnie od czasu, gdy dokonywano systematycznych pomiarów stanu atmosfery. Jak wynika z tabeli 10, pomiary opadu pyłu były dokonywane od 1976 roku. Wtedy już wartość graniczna opadu pyłu ($200 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$) była przekroczona w rejonie Jaworzna, a w Bukownie i Olkuszu osiągała wartości rzędu $100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$. Pięć lat później oprócz opadu pyłu mierzono również opad metali ciężkich, w tym żelaza, cynku, ołowiu i kadmu. W 1981 roku opad Pb był wyższy od wartości dopuszczalnych ($100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$) na całym obszarze badań, i to 3 - 5 krotnie. Również w latach następnych do 1998 roku miały miejsce przekroczenia wartości granicznych tego składnika w rejonie Bukowna. Zawartość Cd w opadających pyłach w rejonie Bukowna i Olkusza była do 1986 nawet 5 krotnie wyższa od wartości granicznych ($10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$). W latach następnych opad kadmu ulegał zmniejszeniu, jednak w Bukownie był bliski wartości granicznej (Tab. 10). Dla opadu Fe i Zn brakuje wartości granicznych. Mają one jednak znaczenie przy ocenie zawartości tych składników w glebach w rejonie badań. Jak wynika z danych tabeli 17, w rejonie badań w poziomie organicznym gleb leśnych (podpoziom Ol, Of, Oh) w zależności od czasu oddziaływania zanieczyszczeń stwierdzono wzrastające z wiekiem powierzchni zawartości metali ciężkich.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że czynnik czasu i wielkość opadu metali mają decydujący wpływ na zawartość metali ciężkich w glebach. Porównanie danych dotyczących metali ciężkich w górnych poziomach gleb na badanym obszarze z zawartością tych metali w górnym poziomie gleby kopalnej wskazuje, że nagromadzenie metali ciężkich miało miejsce w ostatnich 100–150 latach (Zał. 15).

Zagrożenie gleb można oceniać poprzez zawartość metali ciężkich w porównaniu z liczbami granicznymi, a skalę tego zagrożenia poprzez wyliczanie współczynnika wzbogacenia. Jak wynika z danych w załączniku 7, zawartość cynku w glebach rejonu badań wahała się od wartości nieznacznie przekraczających normę ($200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) do nawet 30 krotnie od niej wyższych. Podobny trend obserwuje się w przypadku zawartości ołowiu i kadmu.

Na skutek oddziaływania emitowanych pyłów, bogatych w metale ciężkie, nastąpiło ich wzbogacenie w poziomie organicznym gleb w przypadku cynku od ok. 50 do przeszło 1000 krotne, w porównaniu ze skałą macierzystą gleb. Podobne kumulacje zanotowano dla ołowiu i kadmu (Zał. 7).

Z ekologicznego punktu widzenia istotne jest zarówno rozmieszczenie metali ciężkich w samym profilu glebowym, jak też formy ich występowania. Z danych tabeli 17 wynika, że metale ciężkie gromadzą się głównie w poziomie organicznym (O) oraz próchnicznym (Ah). W niżej leżących poziomach ich ilość z reguły spada. Podobny rozkład zawartości metali ciężkich, a zwłaszcza ołowiu w profilu gleb brunatnych kwaśnych w Sudetach stwierdził Kabała i in. (1998). Biorąc pod uwagę, że w wyżej wymienionych poziomach przebiegają procesy życiowe bytujących tam roślin, zwierząt oraz mikroorganizmów, można stwierdzić, że metale ciężkie mają zasadniczy wpływ na przemiany i procesy w samych glebach oraz w układzie gleba-roślina-zwierzę (człowiek). Jeśli chodzi o formy występowania emitowanych metali ciężkich, to zasadniczą rolę odgrywają związki danego metalu emitowane przez źródła przemysłowe. Z danych literaturowych wynika, że w przypadku ołowiu emitowanego przez przemysł hutniczy i odlewniczy (żelazo, metale nieżelazne) spalanie węgla kamiennego i brunatnego, cementownie i koksownie, składnik ten może występować w postaci: ołów metaliczny Pb, galenit PbS, massikotit PbO, anglezyt PbSO₄, kotunnit PbCl₂, mendipit Pb₃Cl₂O₂, kumengit Pb₄Cu₄Cl₈(OH)₈•H₂O, dundazyt Pb₂Al₄(CO₃)₄•(OH)₈•3H₂O, baumhauerit Pb₃As₄S₉, sartorit PbAs₂S₄, kozalit Pb₂Bi₂S₅, penfieldit Pb₂(OH)Cl₃, fosfat ołowiu Pb₃(PO₄)₂, trójtlenek ołowiu Pb₂O₃ (Forster, Lott 1979, Riedel, Radczewski 1979, Voland, Götze 1988). Z przedstawionych danych wynika, że technogeniczne formy ołowiu wykazują znaczną różnorodność oraz powiązania z innymi metalami, jak też różną rozpuszczalność.

W procesach geochemicznych oraz w warunkach glebowych rozpuszczalne formy ołowiu szybko przechodzą w nierozpuszczalne związki siarczkowe, a także są silnie sorbowane przez fosforany, wodorotlenki Fe, Mn i Al oraz minerały ilaste i substancję organiczną. Dodatkowo Pb podlega akumulacji w mezo- i mikroorganizmach glebowych, dochodząc niekiedy do 40% s.m. biomasy (Gadd 1991). Ołów może podlegać w specyficznych warunkach metylacji zarówno chemicznej, jak i biologicznej i w formie związków alkilowych jest bardziej ruchliwy (Röderer 1984).

W glebach Pb jest na ogół mało ruchliwy, a jego stężenie w roztworze glebowym waha się w granicach od 0,1 do 10 µgdm⁻³. Rzadko występuje w postaci kationu Pb²⁺, tworzy

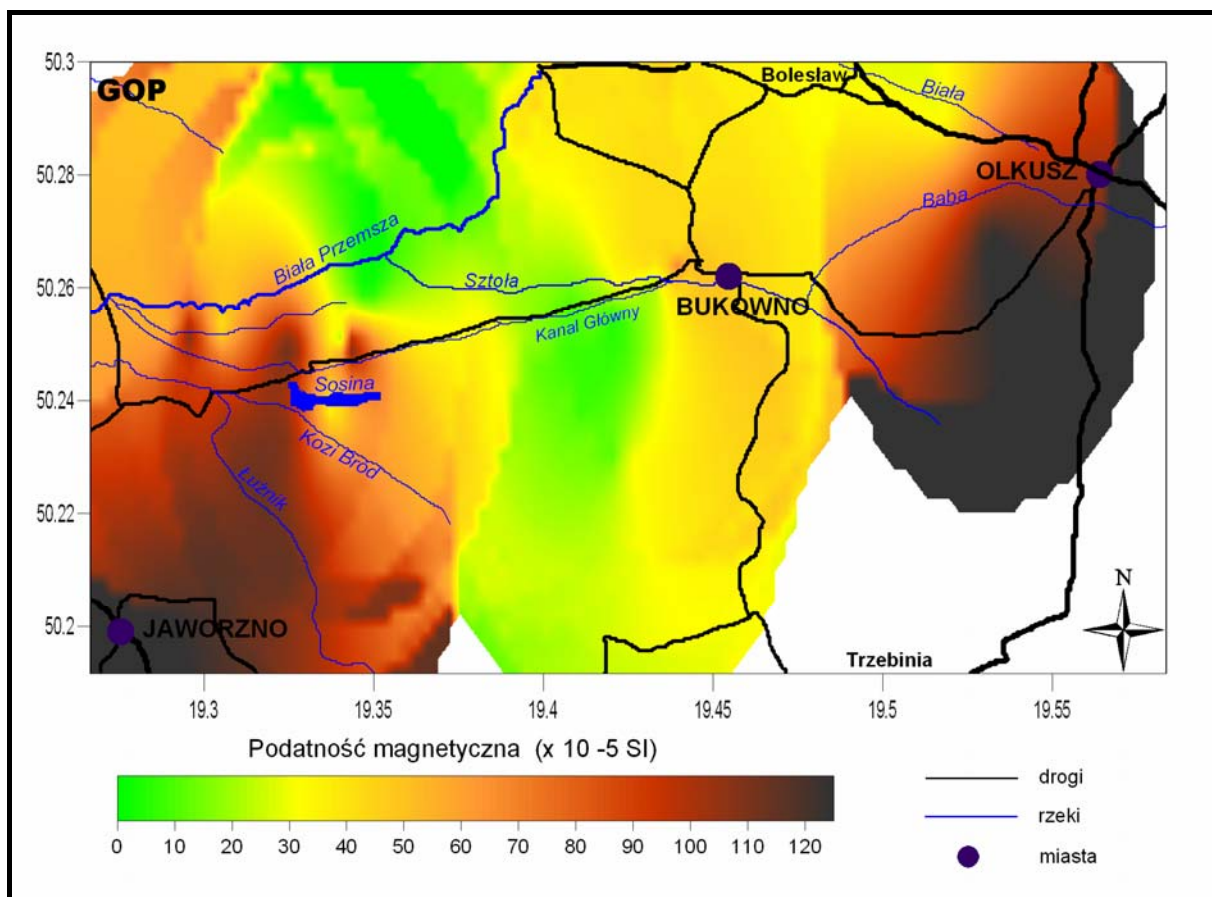
natomiast jony kompleksowe. W glebach kwaśnych ($\text{pH} < 5,5$) przeważa kation PbHCO_3^+ , a w glebach obojętnych i alkalicznych ($\text{pH} 6,5$) dominują jony $\text{Pb}(\text{OH})_4^{2-}$, $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$ i PbOH^+ oraz kompleksy organiczne (Kabata-Pendias 1998).

Na wzrost ilości form rozpuszczalnych metali ciężkich w glebach narażonych na duże imisje wskazują niektóre doniesienia, klasyfikując jednocześnie metale wg stopnia ich mobilności: $\text{Cd} \gg \text{Zn} \geq \text{Pb}$ (Greszta 1988, Billet i in. 1991, Blaser i in. 2000, Sterckeman i in. 2000, Brännvall i in. 2001). Zwracają też uwagę na czynniki zwiększające ich ruchliwość: duże nagromadzenie na powierzchni gleby, spadek odczynu gleby, wzrost zawartości frakcji piasku, czy też w przypadku cynku – wysoka zawartość węgla organicznego w wierzchniej warstwie gleby (Sterckeman i in. 2000).

Wcześniej prowadzone badania (Strzyszczyk 2004), dotyczące form występowania ołowiu i innych metali ciężkich w glebach leśnych Jaworzna metodą Zeiena i Brünnera (1991) wykazały, że cynk i kadm występują w glebach w formie rozpuszczalnej i związanej z substancją organiczną (Zn – odpowiednio: 32% i 17%, Cd – 27-30% i 17-20%). Ołów zaś występuje w formie związanej z substancją organiczną (45–48%) oraz tlenkami manganu. W niżej leżących poziomach (E, E/B) układ metali w glebach ulega zmianie. Ołów występuje głównie w formie rozpuszczalnej, cynk i kadm również, ale pewne ilości Zn i Cd związane są też z amorficznymi i krystalicznymi związkami żelaza. Jak widać z przedstawionych danych, metale ciężkie po przedostaniu się do gleby podlegają różnym przemianom, których ocenę ekologiczną nie zawsze łatwo jest określić.

Rozkład przestrzenny podatności magnetycznej i jej układ w profilu glebowym świadczą o występowaniu w rejonie badań dwóch anomalii magnetycznych: zachodniej – jaworznickiej związanej z oddziaływaniem przemysłu Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego i Zespołu Elektrowni „Jaworzno” oraz wschodniej – olkuskiej związanej głównie z hutnictwem cynku i ołowiu. Biorąc pod uwagę różne źródła imisji dla stwierdzonych anomalii, inny może być sposób i zasięg rozprzestrzeniania się emitowanych pyłów. Powierzchniowy rozkład podatności magnetycznej potwierdza ten fakt, ponieważ zasięg anomalii zachodniej jest wyraźnie większy niż tej w rejonie Olkusza, ale w obydwu przypadkach zauważa się spadek wartości podatności magnetycznej (a także zawartości metali ciężkich w glebach) wraz z odległością od głównych emitorów (Rys. 13). Przyczyną tego mogą być różnice w granulacji, kształcie i ciężarze właściwym pyłów. Pyły energetyczne (w tym popioły lotne) są mniejsze i mają bardziej opływowe kształty, podczas gdy pyły z procesów metalurgicznych są ostrokrawędziste i cięższe. Jednak ze względu na sąsiedztwo obiektu badań, istotne znaczenie mogą mieć imisje pyłów miejsko-przemysłowych

z aglomeracji śląskiej (wpływającej na anomalię jaworznicką) i krakowskiej (wpływającej na anomalię olkuska). Nie bez znaczenia wydaje się też wiek powierzchni badawczych, który maleje w centralnej części transektu (z najmłodszymi powierzchniami – do 30 lat), czyli na obszarze o najniższej podatności.



Rysunek 13. Rozkład przestrzenny podatności magnetycznej na badanym obszarze.

Wartości podatności magnetycznej wyższe niż 30×10^{-5} stwierdzono na około 60% badanego obszaru, z czego 20% to wartości przekraczające 50×10^{-5} , co może sugerować, że zawartość przynajmniej jednego z metali ciężkich, zwłaszcza ołowiu, cynku lub kadmu może przekroczyć wartość dopuszczalną. Jak już wspomniano wcześniej, na prawie całej powierzchni transektu zawartości tych trzech pierwiastków (ekstrahowane 2 M HNO₃), w stosunku do których magnetyt obecny w pyłach (i powodujący wzrost podatności magnetycznej) pełni rolę nośnika, są wyższe od wartości granicznych (Desaules 2001). Rozkład zawartości tych metali wzdłuż linii transektu pokrywa się z rozkładem podatności magnetycznej, pozwalając na stwierdzenie, że na badanym obszarze anomalom magnetycznym towarzyszą anomalie geochemiczne gleb.

W związku z tym, że rejon Jaworzno – Bukowno – Olkusz porośnięty jest głównie monokulturami sosnowymi, rosnącymi na ubogich siedliskach, nagromadzenie toksycznych metali ciężkich w glebie, może prowadzić do degradacji drzewostanów. Pyły, zawierające metale ciężkie, emitowane do atmosfery, oddziałują bezpośrednio na ekosystemy leśne, osadzając się na aparatach asymilacyjnych roślin, powodując tym samym zakłócenia w procesach fotosyntezy, metabolizmu i wymiany gazowej. Zubożenie składu gatunkowego na istniejących siedliskach, zmniejszenie bioróżnorodności warstwy przyziemnej (mchów i porostów) oraz intensywne wydzielanie się posuszu to tylko niektóre objawy degradacji drzewostanów, będących pod wpływem metalonośnych imisji pyłowych (Zwoliński 1995).

8. WNIOSKI

1. Obszar transektu charakteryzuje się zróżnicowanymi wartościami, zarówno opadu pyłu, jak i podatności magnetycznej: objętościowej i specyficznej. Wynika to prawdopodobnie z różnicy w zawartości metali ciężkich, a zwłaszcza Zn, Pb i Cd w pyłach metalurgicznych (żelaza oraz metali nieżelaznych), energetycznych oraz cementowych, deponowanych na powierzchni gleby.
2. Układ podatności magnetycznej w profilu glebowym charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem pod względem wielkości podatności magnetycznej. Wysokie wartości tego parametru odnotowano w górnej warstwie gleby (2 – 5 cm), najczęściej w podpoziomie butwinowym i humifikacyjnym, a najniższe w skale macierzystej, co jest typowe dla obszarów o dużym wpływie czynników technogenicznych.
3. Rozkład podatności wzdłuż transektu zachód–wschód uwidacznia istnienie dwóch obszarów anomalii magnetycznych:
 - na zachodzie w rejonie Jaworzna,
 - na wschodzie w rejonie Olkusza,przy czym źródłami tych anomalii są prawdopodobnie cząstki magnetyczne, pochodzące z różnych sektorów gospodarki, ale również z tzw. niskiej emisji.
4. Podwyższone zawartości metali ciężkich w rejonie badań oraz wysokie współczynniki korelacji między podatnością magnetyczną a niektórymi metalami ciężkimi potwierdzają tezę, że anomaliiom magnetycznym towarzyszą anomalie geochemiczne. Czynnikiem wpływającym na wielkość tych anomalii są: opad pyłu, jego skład chemiczny oraz rodzaj i wiek drzewostanu.
5. Możliwość wykrywania nawet minimalnej ilości ferrimagnetyków antropogenicznego pochodzenia, powodujących wzrost wartości podatności magnetycznej wierzchnich warstw gleby, pozwala na zastosowanie metody magnetometrii glebowej do monitorowania obszarów narażonych na emisje przemysłowe o zróżnicowanej intensywności.
6. Wysokie współczynniki wzbogacenia poziomów organicznych i próchnicznych w metale ciężkie oraz wartości przekraczające liczby graniczne określone dla tych

pierwiastków kwalifikują rejon badań jako obszar o dużym zagrożeniu ekologicznym spowodowanym antropopresją przemysłową.

7. Przeprowadzone badania mają szeroki wymiar praktyczny, pozwalają bowiem na wydzielenie obszarów o potencjalnych zagrożeniach ekologicznych spowodowanych m.in. emisją zanieczyszczeń pyłowych w glebie. Rejon badań jest obszarem rekreacyjnym, gdzie zlokalizowanych jest kilka zbiorników wodnych oraz rozległe kompleksy leśne, w których mieszkańcy zbierają grzyby i owoce leśne.

9. SPIS LITERATURY

- Babanin W.F.: O primienienii izmierenij magnitnoj wospriimczivosti w diagnostikie form żelieza w poczwach. *Poczwowiedienije*, 7, 1973, 154-160.
- Babanin W.F., Ivanov A.W., Kutkin I.A., Siedmov N.A.: Morfologija i mössbauerowskaja spektroskopija silnomagnitnych sferul iz poczw Jarosławskoj obłasti. *Gieochimija*, 12, 1987, 1792-1798.
- Babanin W.F., Truchin W.J., Karpaczewskiy L.O., Ivanov A.W., Morozov W.W.: *Magnetism poczw*. JGTU, Moskwa, Jarosław 1995, s. 222.
- Bednarek R., Dziadowiec H., Pokojska U., Prusinkiewicz Z.: *Badania ekologiczno-gleboznawcze*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2004, s. 344.
- Bhathal R.S., Stacey F.D.: Frequency independence of low field susceptibility of rocks. *J. geophys. Res.*, 90, 1969, 8789-8792.
- Billet M.F., Fitzpatrick E.A., Cresser M.S.: Long-term changes in the Cu, Pb and Zn content of forest soil organic horizons from north-east Scotland. *Water, Air, Soil Pollut.*, 59, 1991, 179-191.
- Blakemore R.P.: Magnetotactic bacteria. *Science*, 190, 1975, 377-379.
- Blaser P., Zimmermann S., Luster J., Shotyk W.: Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in Swiss forest soils. *Sci. Tot. Env.*, 249, 2000, 257-280.
- Brännvall M.-L., Bindler R., Emteryd O., Renberg I.: Vertical distribution of atmospheric pollution lead in Swedish boreal forest soils. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 1, 2001, 357-370.
- Cabała J.: Koncentracje pierwiastków śladowych w rudach Zn-Pb i możliwość przechodzenia ich do odpadów. *Prace Nauk GIG, Seria Konferencje*, 13. 1996, 17-32.
- Cabała J.: Development of oxidation in Zn-Pb deposits in Olkusz area. *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century*, 2001, 121-124.
- Cornell R.M., Schwertmann U.: *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses* - VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Germany, 1996, s. 573.
- Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A., O'Grady, K.: Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophys. J. Int.* 124, 1996, 228-240.
- Dedik A. N., Hoffmann P., Enslin J.: Chemical characterization of iron in atmospheric aerosols, *Atmos. Environ.*, 26A, 1992, 2545-2548.
- Dell C.I.: An occurrence of greigite in Lake Superior sediments. *Am. Mineralogist* 57, 1972, 1303-4.
- Desaules A., Hämmann M., Weisskopf M.: Commentary on the Ordinance of 1 July 1998 relating to impacts on the soil (OIS). Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape, Berne 2001, s. 43.
- Dobrzański B., Zawadzki S.: *Gleboznawstwo. Podręcznik dla studentów akademii rolniczych*. Państwowe Wyd. Rolnicze i Leśne, Warszawa 1995, s.576.

- Dokumentacja geologiczna złoża piasków podsadzkowych „Szczakowa” - Pole II Kategoria B. Kombinat Geologiczny Południe, Zakład Projektów i Dokumentacji Geologicznych w Katowicach, oddział terenowy w Częstochowie, z archiwum KP „Szczakowa”, 1980.
- Doyle J.L., Hopkins T.L., Betzer P.R.: Black magnetic spherule fallout in the eastern Gulf of Mexico. *Science*, 194, 1976, 1157-1159.
- Drozd J., Kowaliński S.: Zmiany niektórych właściwości gleb pod wpływem zanieczyszczeń emitowanych przez hutę miedzi Legnica. *Roczniki Gleboznawcze*, 28(2), 1977, 49-75.
- Dunlop D.J., Özdemir Ö.: *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge Univ. Press, 1997, s. 570.
- Đurža O.: Heavy Metals Contamination and Magnetic Susceptibility in Soils Around Metallurgical Plant. *Phys. Chem. Earth (A)*, 24, 6, 1999, 541-543.
- FAO-UNESCO: *Soil Map of the World. Revised Legend*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma 1988.
- Fassbinder J.W.E., Stanjek H.: Magnetic properties of biogenic soil greigite (Fe₃S₄). *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1994, 2349-2352.
- Fassbinder J.W.E., Stanjek H., Vali H.: Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature* 343, 1990, 161-163.
- Fischer W.R.: Microbiological reactions of iron in soils. [w] Stucki J.W., Goodman B.A., Schwertmann U.: *Iron in soils and clay minerals*, Reidel, Dordrecht, 1988, 715-749.
- Flanders P.J.: Collection, measurements and analysis of airborne magnetic particulates from pollution in the environment. *J. Appl. Phys.*, 75, 1994, 5931-5936.
- Furdyna L.: Wpływ metod zagospodarowania wyrobisk popiaskowych na kształtowanie się środowiska leśnego na przykładzie wyrobiska Kopalni Piasku Podsadzkowego „Szczakowa”. Praca doktorska, maszynopis, Katowice-Kraków, 1968.
- Gadd G.M.: Microbial biosorption of heavy metals and radionuclides for environmental protection. [w] *Heavy metals in the environment*, red. J.G.Farmer, CEP, Edinburgh, 1, 1991, 403-411.
- Gilewska S.: Wyżyny Śląsko-Małopolskie. [w] *Geomorfologia Polski, Polska Południowa, Góry i Wyżyny*, cz. I, red. M. Klimaszewskiego, PWN, Warszawa 1972.
- Glebova I.N., Babanin W.F., Karpaczewskij L.O., Kutkin I.A., Szoba S.A.: O prirode powyszennogo magnietizma organo-akkumuliativnyh gorizontow poczw. *Wiestn. Mosk. un-ta. Ser.17. Poczwowiedienije*, 3, 1984, 37-43.
- Goddu S.R., Appel E., Jordanova D., Wehland F.: Magnetic properties of road dust from Visakhapatnam (India) - relationship to industrial pollution and road traffic. *Phys. Chem. Earth*, 29, 2004, 985-995.
- Gołuchowska B.: Ekologiczne konsekwencje wzrostu podatności magnetycznej gleb objętych emisją pyłów cementowych. *Prace Komisji Naukowych PAN, Oddział w Katowicach*, 24, 1996, 78-80.
- Gołuchowska B., Strzyszczyk Z.: Niektóre nowo poznane czynniki zagrażające środowisku glebowemu wywołane działalnością przemysłu cementowo - wapienniczego w woj. opolskim, *Prace Komisji Naukowych PAN*, 23, 1999, 69-71.
- Greszta J.: The effects of dusts from copper and zinc works introduced into the soil on the growth of the seedlings of selected tree species. *Fragm. Flor. Geobot.*, 28 (1), 1983, 3-28.

Greszta J.: Effect of dusts from selected industrial plants on chemical properties of soils. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, 18, 1988, 22-64.

GUS: Roczniki statystyczne, 1975-2005.

Hallam D.F., Maher B.A.: A record of reversed polarity carried by the iron sulphide greigite in British early Pleistocene sediments. Earth planet. Sci. Lett., 121, 1994, 71-80.

Hanesch M., Scholger R.: Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. Environ. Geol. 42, 2002, 857-870.

Hansen L.D., Silberman D., Fisher G.L.: Crystalline components of stack-collected, size-fractionated coal fly ash. Environ. Sci. Technol., 15, 1981, 1057-1062.

Heinrichs H., Mayer R.: Distribution and Cycling of Major and Trace Elements in Two Central European Forest Ecosystems, J. of Environ. Qual., 6, 4, 1977, 401-406.

Heinrichs H., Mayer R.: The role of forest vegetation in the biogeochemical cycle of heavy metals. J. Environ. Qual., 9, 1980, 111-118.

Heller F., Strzyszczyk Z., Magiera T.: Magnetic record of industrial pollution on forest soils of Upper Silesia (Poland). J. Geophys. Res. 103 (B8), 1998, 17767-17774.

Hay K.L., Dearing J.A., Baban S.M.J., Loveland P.J.: A preliminary attempt to identify atmospherically-derived pollution particles in English topsoils from magnetic susceptibility measurements. Phys. Chem. Earth, 22, 1997, 207-210.

Hulett L.D., Weinberger A.J., Ferguson M., Northcutt K.J., Lyon W.S.: Trace element and phase relations in fly ash. DE-81028555 EPR1-EA-1822, 1981.

Hundesrügge T.: Phasenanalytische Untersuchungen an Filteraschen aus Müllverbrennungsanlagen. Aufschluss, 41, 1990, 281-285.

IMGW w Katowicach: Dane źródłowe niepublikowane, 2004.

Jabłońska M.: Skład fazowy pyłów atmosferycznych w wybranych miejscowościach Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego. Prace Naukowe UŚL, 2151, Katowice 2003, s. 103.

Janek M.: Wody glebowe jako ogniwo w obiegu jonów w ekosystemach, na przykładzie borów Puszczy Augustowskiej. Przegląd Geologiczny, 11, t. 51, 2003, 960-960.

Jarzębski S., Kapała J.: Atlas zanieczyszczeń wydzielanych przy procesach hutnictwa żelaza. Śląsk, Katowice 1976, s. 345.

Jordanova D., Jordanova N., Hoffmann V.: Magnetic mineralogy and grain-size dependence of hysteresis parameters of single spherules from industrial waste products. Phys. Earth. Planet. Interiors, 154, 2006, 255-265.

Józwiak M., Kozłowski R.: Wpływ wód opadowych i roślinności na przestrzenne zróżnicowanie pH w glebach zlewni reprezentatywnej Stacji Bazowej ZMŚP Święty Krzyż, [w] Kostrzewski A., Szpikowski J. (red.): Funkcjonowanie geosystemów zlewni rzecznych, 3, 2003, 335-344.

Kabała C., Szerszeń L., Karczewska A.: Całkowita zawartość i formy ołowiu w glebach leśnych Sudetów. [w] Ołów w środowisku. Problemy ekologiczne i metodyczne, red. A. Kabata-Pendias, B. Szteke, Zeszyty Naukowe PAN, Komitet Naukowy przy Prezydium PAN „Człowiek i Środowisko”, Warszawa, 1998, 25-32.

Kabata-Pendias A.: Chemiczne zanieczyszczenie gleb Polski. Kosmos, 1, 1986.

- Kabata-Pendias A.: Biogeochemia ołowiu. [w] Ołów w środowisku. Problemy ekologiczne i metodyczne, red. A. Kabata-Pendias, B. Szteke, Zeszyty Naukowe PAN, Komitet Naukowy przy Prezydium PAN „Człowiek i Środowisko”, Warszawa, 1998, 9-18.
- Kabata-Pendias A., Pendias H.: Biogeochemia pierwiastków śladowych. PWN, Warszawa, 1993.
- Kapička A., Petrovský E., Ustjak S., Macháčková K.: Proxy mapping of fly-ash pollution of soils around a coal-burning power plant: a case study in the Czech Republic. *J. Geochem. Explor.*, 66, 1999, 291-297.
- Kapička A., Jordanova N., Petrovský E., Ustjak S.: Effect of different soil conditions on magnetic parameters of power-plant fly ashes. *J. Appl. Geoph.*, 48, 2001, 93-102.
- Katzur J., Haubold-Rosar M.: Amelioration and reforestation of sulfurous mine soils in Lusatia (Eastern Germany). *Water, Air, Soil Pollut.*, 91, 1996, 17-32.
- Każmierczyk T., Kopczyńska J., Kościej A., Krzykowski A., Matyasik G., Noworyta M., Regulewski S., Wdaniec J.: Monografia Kopalni Piasku „Szcakowa” S.A., 1997.
- Knab M., Appel E., Hoffmann V.: Separation of the anthropogenic portion of heavy metal contents along a highway by means of magnetic susceptibility and fuzzy C-means cluster analysis. *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.* 6, 2001, 125–140.
- Kondracki J.: Geografia Polski. Mezoregiony fizyczno-geograficzne. PWN Warszawa 1994.
- Koniecznyński J.: Skuteczność pracy elektrofiltrów a emisja metali śladowych w spalinach elektrowni węglowych. *Ochrona Powietrza*, 1-3, 1982, 7-14.
- Koniecznyński J., Cwiklak K., Grochowalski A., Komosiński B., Kozielska B., Mathews B., Pałamarczuk P., Rachwał T., Stec K., Żelechower M.: Emisja zanieczyszczeń z kotłów fluidalnych. *Prace i Studia*, 66, IPIŚ PAN, Zabrze, 2005, s. 136.
- Kowalkowski A., Józwiak M., Kozłowski R.: Metoda badania wpływu wód opadowych na właściwości gleb leśnych. *Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, KTN, 2002, 45-51.
- Kozioł S.: Budowa geologiczna Pustyni Błędowskiej. *Biuletyn PIG*, 65/52, 1952.
- Kruiver P.P, Dekkers M.J., Heslop D.: Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth and Planetary Science Letters*, 189, 2001, 269-276.
- Kuhl J.: Chemiczno-mineralna budowa nieorganicznej substancji mineralnej w węglu kamiennym. *Kwartalnik Geologiczny*, 5, 1961, 801-815.
- Kusza G., Strzyszczyński Z.: Rezerваты Leśne Opolszczyzny – stan i technogenne zagrożenia. *Prace i Studia*, 63, IPIŚ PAN, Zabrze, 2005, s. 156.
- Kuzio B., Kuzio S.: Opracowanie ekofizjograficzne do zmiany miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego gminy Bolesław obejmujące obszar przemysłowy w Bolesławiu – Ujkowie Starym. *Envitech*. Dąbrowa Górnicza, grudzień 2002.
- Lauf R.J., Harris L.A., Rawiston S.S.: Pyrite framboids as the source of magnetite spheres in fly ash. *Environ. Sci. Technol.*, 16, 1982, 218-220.
- Le Borgne E.: Abnormal magnetic susceptibility of the top soil. *Ann. Geophys.*, 11, 1955, 399-419.

- Le Borgne E.: Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et du granite. *Ann. Geophys.*, 16, 1960, 159-195.
- Lovely D.R., Stoltz J.F., Nord G.L., Phillips E.J.P.: Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron-reducing microorganism. *Nature* 330, 1987, 252-254.
- Lowrie W.: *Fundamentals of Geophysics* – Cambridge University Press, 1997, s. 339.
- Łukszin A.A., Rumiancewa T.I., Kowrigo W.P.: Magnitnaja wospriimeczivost osnovnykh tipow poczwy Udmurtskoj ASSR. *Poczwowiedienije*, 1, 1968.
- Magiera T.: Wykorzystanie magnetometrii do oceny zanieczyszczenia gleb i osadów jeziornych, *Prace i Studia*, 59, IPIŚ PAN, Zabrze, 2004, s. 130.
- Magiera T., Strzyszczyk Z.: The use of magnetic methods to identify anthropogenic ferrimagnetics in soils. *Geologica Carpathica*, 47 (3), 1996, 187-189.
- Magiera T., Strzyszczyk Z.: Monitoring magnetyczny na terenach objętych emisjami przemysłowymi. [w] *Monitoring Środowiska*, red. Wiatr I., Marczak H., II Forum Inżynierii Środowiska, 1998, 255-266.
- Magiera T., Strzyszczyk Z.: Record of industrial pollution in Polish ombrotrophic peat bogs. *Phys. Chem. Earth*, 26(11-12), 2001, 859-866.
- Magiera T., Strzyszczyk Z., Ferdyn M.: Możliwości wykorzystania magnetometrii terenowej w monitoringu regionalnym gleb leśnych na przykładzie Nadleśnictwa Katowice. [w:] *Obieg Pierwiastków w przyrodzie tom. II*, B. Gworek i J. Misiak [ed], IOŚ Warszawa 2003, 708-713.
- Magiera T., Lis J., Nawrocki J., Strzyszczyk Z.: Podatność magnetyczna gleb Polski. *PIG Warszawa* 2002, s. 14.
- Magiera T., Strzyszczyk Z., Petrovský E., Kapička A., Smolka D.: Ferrimagnetic minerals and heavy metal distribution within different granulometric fraction of fly ashes. *Geologica Carpathica*, 49(4), 1998, 238-239.
- Maher B.A.: Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implication. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 137, 1998, 25-54.
- Maher B.A., Thompson R.: Mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols. *Geology*, 19, 1991, 3-6.
- Maher B.A., Thompson R.: Paleoclimatic significance of the mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols. *Quat. Res.* 37, 1992, 155-170.
- Maier G., Scholger R.: Demonstration of connection between pollutant dispersal and atmospheric boundary layers by use of magnetic susceptibility mapping, St. Jacob (Austria). *Phys. Chem. Earth*, 29, 2004, 997-1009.
- Matysek D., Raclavska H., Raclavsky K.: Relationship between magnetic susceptibility of soils and concentrations of heavy metals in the region of Moravo-Silesian Beskydy Mts., Czech Republic. [w] *Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems*, 22-26 February, Colorado-Springs, Denver. CO, 2004, 1332-1336.
- Mullins C.E.: The magnetic properties of the soil and their application to archeological prospecting. *Archeo-Physica*, 5, 1974, 143-347.
- Mullins C.E.: Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science - a review. *J. Soil Sci.*, 28, 1977, 223-246.

- Mullins C.E., Tite M.S.: Magnetic viscosity, quadrature susceptibility and frequency dependence of susceptibility in single domain assemblies of magnetite and maghemite. *J. Geophys. Res.*, 78 (5), 1973, 804-809.
- Muxworthy A.R., Matzka J., Davila A.F., Petersen N.: Magnetic signature of daily sampled urban atmospheric particles. *Atmospheric Env.*, 37, 2003, 4163–4169.
- Néel L.: Some theoretical aspects of rockmagnetism. *Adv. Phys.* 4, 1955, 191-243.
- Neumeister H., Haase D., Regber R.: Methodische Aspekte zur Ermittlung von Versauerungstendenzen und zur Erfassung von pH-Werten in Waldböden. *Peterm. Geogr. Mitt.*, Gotha, 141, 1997, 385-399.
- Oades J.M., Townsend W.N.: The detection of ferromagnetic minerals in soils and clays. *J. Soil Sci.*, 14, 1963, 179-187.
- Oldfield F., Thompson R., Dickson D.P.E.: Artificial enhancement of stream bedload: a hydrological application of superparamagnetism. *Phys. Earth Planet. Int.*, 26, 1981, 107-124.
- Ondov J.M., Ragaini R.C., Biermann A.H.: Emission and particle size distribution of minor and trace elements at two western coal-fired power plants equipped with cold-side electrostatic precipitators. *Environ. Sci. Technol.*, 13, 1979, 946-953.
- Operat siedliskowy dla Nadleśnictwa Chrzanów RDLP Katowice, P.P. Biuro Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej w Warszawie, Oddział w Krakowie, Kraków 2005.
- Özdemir O., Dunlop D.J., Moskowitz B.M.: The effect of oxidation on the Verwey transition in magnetite. *Geophys. Res. Lett.* 20, 1993, 1671–1674.
- Pazdur M.: Badanie dokładności datowania metodą ^{14}C późnoplejstoceny i holoceny osadów organogenicznych. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl.*, Gliwice 1982, s. 81.
- Peters C., Thompson R.: Magnetic identification of selected natural iron oxides and sulphides. *J. of Magnetism and Magnetic Materials* 183, 1998, 365-374.
- Petrovský E., Ellwood B. B.: Magnetic monitoring of air, land and water pollution. [w] *Quaternary Climates, Environments and Magnetism* (red. Maher B.A. and Thompson R.) Edinburgh, 1999, 279-322.
- Petrovský E., Kapička A., Jordanova N., Knab M., Hoffmann V.: Low-field magnetic susceptibility: A proxy method in estimating increased pollution of different environmental systems - *Environ. Geol.*, 39, 2000, 312-318.
- Pietrzykowski M.: Charakterystyka gleb i roślinności na gruntach rekultywowanych oraz na powierzchniach pozostawionych wyłącznie procesowi sukcesji na przykładzie wyrobiska kopalni piasku „Szczakowa”. Praca doktorska. AR, Kraków, 2004.
- Pikulski A.: Ocena hodowlana zalesień wyrobiska piasku podsadzkowego w Szczakowej (Pole I). Praca doktorska, maszynopis, AR, Kraków, 1989.
- Prusinkiewicz Z.: *Leksykon ekologiczno-gleboznawczy*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994, s. 289.
- Prusinkiewicz Z., Pokojska U.: Wpływ emisji przemysłowych na gleby. [w] *Białobok S.: Życie drzew w skażonym środowisku*, PWN, W-wa, Poznań 1989.
- Puchalski T., Prusinkiewicz Z.: *Ekologiczne podstawy siedliskoznawstwa leśnego*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1990, s. 619.

- Röderer G.: Tonic effects In plant organisms. [w] Biological effects of organolead compounds, CRC Press. Boca Raton, FL, 1984, 63-95.
- Rossellomora R.A., Caccavo F., Osterlegner K., Springer N., Spring S., Schuler D., Ludwig W., Amann R., Vannanneyt M., Schleifer K.H.: Isolation and taxonomic characterization of a halotolerant, facultatively iron-reducing bacterium. *Syst. Appl. Microbiol.*, 17 (4), 1995, 569-573.
- Schibler L., Boyko T., Ferdyn M., Gajda B., Höll S., Jordanova N., Rösler W. and Magprox team: Topsoil magnetic susceptibility mapping: Data reproducibility and compatibility, measurement strategy. *Stud. geophys. geod.*, 46, 2002, 43-57.
- Scholger R.: Heavy metal pollution monitoring by magnetic susceptibility measurements applies to sediments of the river Mur (Styria, Austria). *Eur. J. Environ. Eng. Geoph.*, 3, 1998, 25-37.
- Schwertmann, U., Cornell, R.M.: Iron oxides in the laboratory-preparation and characterization. Wiley-VCH, Weinheim 2000, s.137.
- Schwertmann U., Taylor R.M.: Iron oxides. [w] Dixon J.B.: Minerals in soil environments, *Soil. Sci. Soc. Am.*, 1977, 145-180.
- Scoullou M., Oldfield F., Thompson R.: Magnetic monitoring of marine particulate pollution in the Elefsis Gulf, Greece. *Marine Pollut. Bull.*, 10, 1979, 287-291.
- Skawina T.: Przebieg rozwoju procesów glebotwórczych na zwałowiskach kopalnictwa węgla. *Roczn. Glebozn., dodatek do tomu VII*, 1958, 149-162.
- Snowball I.F., Thompson R.: The occurrence of greigite in the sediments of Loch Lomond. *J. Quat. Sci.*, 3, 1988, 121-125.
- Spiteri C., Kalinski V., Rösler W., Hoffmann V., Appel E., MAGPROX team: Magnetic screening of a pollution hotspot in the Lausitz area, Eastern Germany: correlation analysis between magnetic proxies and heavy metal contamination in soils. *Environ. Geol.*, 49, 2005, 1-9.
- Sterckeman T., Douay F., Proix N., Fourrier H.: Vertical distribution of Cd, Pb and Zn in soils near smelters in the North of France. *Environ. Pollution*, 107, 2000, 377-389.
- Strugała A.: Substancja mineralna węgla kamiennego i jej przemiany w procesie koksowania. *Gospodarka Surowcami mineralnymi*, 14(1), 1998, 5-28.
- Strzyszczyk Z.: Ocena przydatności do rekultywacji terenów po eksploatacji piasku podsadzkiowego w oparciu o studia gleboznawcze i hydrochemiczne. *Rozprawa doktorska, Zakład Badań Naukowych Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego PAN, Zabrze*, 1967.
- Strzyszczyk Z.: Anwesenheit des ferromagnetischen Eisens in ober-schlesischen Waldböden und deren Ursachen. *Mitt. Deut. Boden. Ges.*, 59, II, 1989, 1197-1202.
- Strzyszczyk Z.: Ferromagnetism of Soils in Some Polish National Parks. *Mitt. Deut. Boden. Ges.*, 66, II, 1991, 1119-1122.
- Strzyszczyk Z.: Magnetic susceptibility of soils in the areas influenced by industrial emissions. [w] Schulin R., Desaulles A.: *Soil Monitoring*, Birkhäuser Verlag Basel, 1993, 255-269.
- Strzyszczyk Z.: Gehalt an Ferromagnetika in der von der Immission der Zementindustrie in der Wojewodschaft Opole beeinflussten Boden. *Mitt. Deut. Boden. Ges.*, 76, 1995, 1477-1480.
- Strzyszczyk Z.: Sources of anthropogenic ferrimagnetic minerals in soils. *Mitt. Deut. Boden. Ges.*, 91, III, 1999, 1427-1431.

Strzyszczyk Z.: Zagrożenie gleb użytków rolnych i siedlisk leśnych przez imisje ferromagnetyków. *Arch. Ochr. Środ.*, 30(4), 2004, 101-112.

Strzyszczyk Z., Chróst L.: Określenie depozycji niektórych metali ciężkich na przykładzie torfowiska wysokiego na Hali Izerskiej. [w] *Problemy Ekologiczne Wysokogórskiej Części Karkonoszy*, red. Fischer Z., Oficyna Wyd. Inst. Ekologii PAN, Dziekanów Leśny, 1995, 123-129.

Strzyszczyk Z., Magiera T.: Ferromagnetyczność gleb w parkach narodowych i jej wykorzystanie w monitoringu skażeń ekosystemów leśnych. *Prace i Materiały Muzeum im. Prof. W. Szafera*, Prądnik, 7-8, 1993, 125-132.

Strzyszczyk Z., Magiera T.: Ferromagnetyki – nowy wskaźnik zanieczyszczenia gleb leśnych przez imisje przemysłowe. [w] *Reakcje biologiczne drzew na zanieczyszczenia przemysłowe – II Krajowe Sympozjum*, Kórnik, 23-26 maja 1994, 193-198.

Strzyszczyk Z., Magiera T.: Magnetic Susceptibility and Heavy Metal Contamination in Soils of Southern Poland. *Phys. Chem. Earth*, 23(9-10), 1998, 1127-1131.

Strzyszczyk Z., Magiera T.: Podatność magnetyczna niektórych przemysłowych pyłów atmosferycznych i jej znaczenie w monitoringu ekologicznym powierzchni Ziemi. *Prace i Studia IPIŚ PAN*, 54, 2000, 205-215.

Strzyszczyk Z., Magiera T.: Content of heavy metals in soils of Polish-Czech border areas. *Proceedings of Sixth International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements*. University of Guelph s, 2001, 500-500.

Strzyszczyk Z., Magiera T.: Zastosowanie magnetometrii do oceny zagrożenia gleb przez imisje przemysłowe. *I Kongres Inżynierii Środowiska. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN*, 13, 2003, 93-115.

Strzyszczyk Z., Magiera T.: Magnetic susceptibility of forest soil in Poland-Germany border area. *Mitt. Deut. Boden. Ges.*, 103, 2004, 109-110.

Strzyszczyk Z., Magiera T., Bzowski Z.: Magnetic susceptibility as an indicator of soils contamination in some regions of Poland. *Roczniki Gleboznawcze*, Warszawa, vol. XLIV, 1994, 85-93.

Strzyszczyk Z., Magiera T., Heller F.: The influence of industrial immissions on the magnetic susceptibility of soils in Upper Silesia. *Studia geoph. et geod.*, 40, 1996, 276-286.

Strzyszczyk Z., Magiera T., Rachwał M.: Application of soil magnetometry for identification of technogenic anomalies in trace metal and iron contents: a case study in the Katowice Forest District. *Polish J. Environ. Stud.*, 15(2a), 2006, 176-184.

Strzyszczyk Z., Rachwał M., Magiera T.: Ocena zagrożeń ekologicznych obszarów zieleni miejskiej metodą magnetometrii glebowej. [w] *Zieleń miejska naturalne bogactwo miasta. Zasady gospodarowania i ochrona*. Mat. konf. pod red. Oleksiejuk E. i Piotrowiaka J., Toruń 2005, 139-146.

Strzyszczyk Z., Tölle R., Katzur J.: Zur Anwendung eines hochfrequenten Messverfahrens für den Nachweis von ferromagnetischen Eisen in der Umwelt. *Arch. Ochr. Środ.*, 3-4, 1988, 137-143.

Strzyszczyk Z., Brożek S., Zwydak M., Magiera T.: Podatność magnetyczna niektórych typów leśnych gleb górskich w zależności od depozycji pyłów przemysłowych. *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich*, 25, 2005, 87-95.

- Sverdrup H., Warfvinge P.: The $(Ca+Mg+K)/Al$ ratio as an indicator of soil acidification effects on tree Growth. [w] Nillson L.O., Hüttl R.F., Johansson U.F., Mathy P. (red.), Nutrient uptake and cyg in forest ecosystems, Ecosystem Res. Rep., 2, Brussels, 1995, 235-249.
- Szumny M.: Ciekawy obszar procesów i form eolicznych Pustynia Błędowska. *Aura*, 10, 2001, 22-24.
- Szymański S.: Ekologiczne podstawy hodowli lasu. PWRiL, Warszawa 2000.
- Świercz A.: Wpływ emisji alkalicznej na gleby i bory sosnowe w „Białym Zagłębiu”. Część I. PAN, Oddz. w Krakowie, Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce 1999, s. 201.
- Terelak H., Piotrkowska M.: Zawartość ołowiu w glebach użytków rolnych Polski i niektórych województw. [w] Ołów w środowisku. Problemy ekologiczne i metodyczne, red. A. Kabata-Pendias, B. Szeke, Zeszyty Naukowe PAN, Komitet Naukowy przy Prezydium PAN „Człowiek i Środowisko”, Warszawa, 1998, 19-24.
- Teske M.E., Thistle H.W.: A library of forest canopy structure for use in interception modeling. *Forest Ecology and Management*, 198(1-3), 2004, 341-350.
- Thompson R., Oldfield F.: Environmental magnetism. Allen and Unwin, London 1986, s.227.
- Trampler T., Kliczkowska A., Dmyterko E., Sierpińska A.: Regionalizacja przyrodniczo-leśna na podstawach ekologiczno-fizjograficznych. PWRiL, Warszawa 1990.
- Ulrich B., Mayer R., Khanna P.K.: Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen des Sollings, Sauerländer Verlag, Frankfurt 1979, s.293.
- Vlasov A.Y., Kovalenko G.V., Chikhacher V.A.: The superparamagnetism of α -FeOOH. *Izv. Earth Physics*, 7, 1967, 64-69.
- Vadyunina A.F., Babanin W.F.: Magnitnaja wospriimczivost niekatorych poczw ZSSR. *Poczwoiwiedienije*, 10, 1972, 55-66.
- Vodyanickiy Yu.N.: Formation of ferromagnets in soddy-podzolic soils. *Poczwoiwiedienije*, 5, 1981, 114-123.
- Vodyanickiy Yu.N., Bagin V.J., Mymrin V.A.: Ferromagnetic minerals distribution in the podzolic soil profile. *Poczwoiwiedienije*, 3, 1983, 104-111.
- Vodyanickiy Yu.N., Dobrovolskiy V.V.: Żelieznyje minerały i tjażelyje metally w poczwach (po rosyjsku). Moskwa 1998, s. 216.
- Wedge A., Hutton M., Peterson P.J.: The concentration and particle size relationships of selected trace elements in fly ashes from U.K. coal-fired power plants and a refuse incinerator. *The Science of the Total Environment*, 54, 1986, 13-27.
- Westphal M.: Paleomagnetyzm i własności magnetyczne skał (przy współpracy H. Pfaff), Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993, s. 176.
- Woś A.: Klimat Polski. PWN, Warszawa 1999.
- WSSE w Katowicach: Zanieczyszczenie atmosfery w województwie katowickim/śląskim, 1976-2005.
- Zawadzki J., Magiera T., Strzyszczyński Z.: Analiza korelacji i regresji pomiędzy zawartością metali ciężkich w glebach Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego, a ich podatnością magnetyczną. *Arch. Ochr. Środ.*, 30(2), 2004, 71-82.
- Zeien H., Brümmer G.W.: Ermittlung der Mobilität und Bindungsformen von Schwermetallen in Boden mittels Sequentieller Extraktionen. *Mitt. Deut. Boden. Ges.*, 66, 1991, 439-442.

Zergeny R.S., Hirt A.M., Lanci L., Lowrie W., Luscher P.: Magnetic mapping of soils in Alpine area, Part I. Suppl. I, 16, C219, 1998.

Zespół Klasyfikacji Gleb Leśnych PTG pod red. Kowlakowski A., Czepińska-Kamińska D., Krzyżanowski A., Okołowicz M., Chojnicki J.: Klasyfikacja Gleb Leśnych Polski. Wyd. Centrum Informacyjne LP, Warszawa 2000.

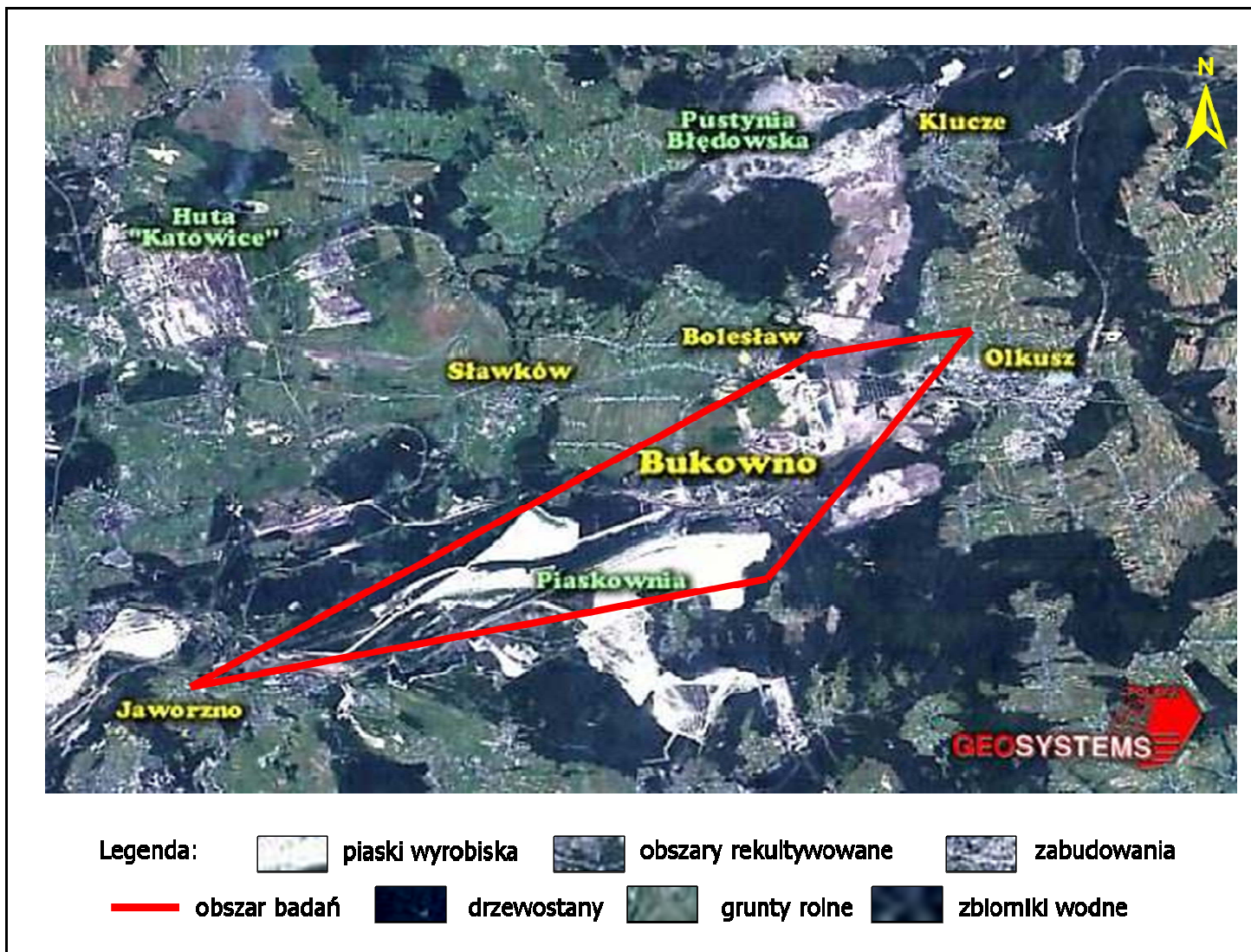
Zwoliński J.: Wpływ emisji zakładów przemysłu metali nieżelaznych na środowisko leśne - rola metali ciężkich w degradacji lasów. Prace Inst. Bad. Leśnictwa, 809, 1995, s. 85.

Zwoździak J., Kowalski M., Jagiełło R.: Zastosowanie metod mikroskopowych i dyfrakcyjnych do badań aerozoli atmosferycznych i identyfikacji źródeł emisji. Arch. Ochr. Środ., 3-4, 1987, 7-17.

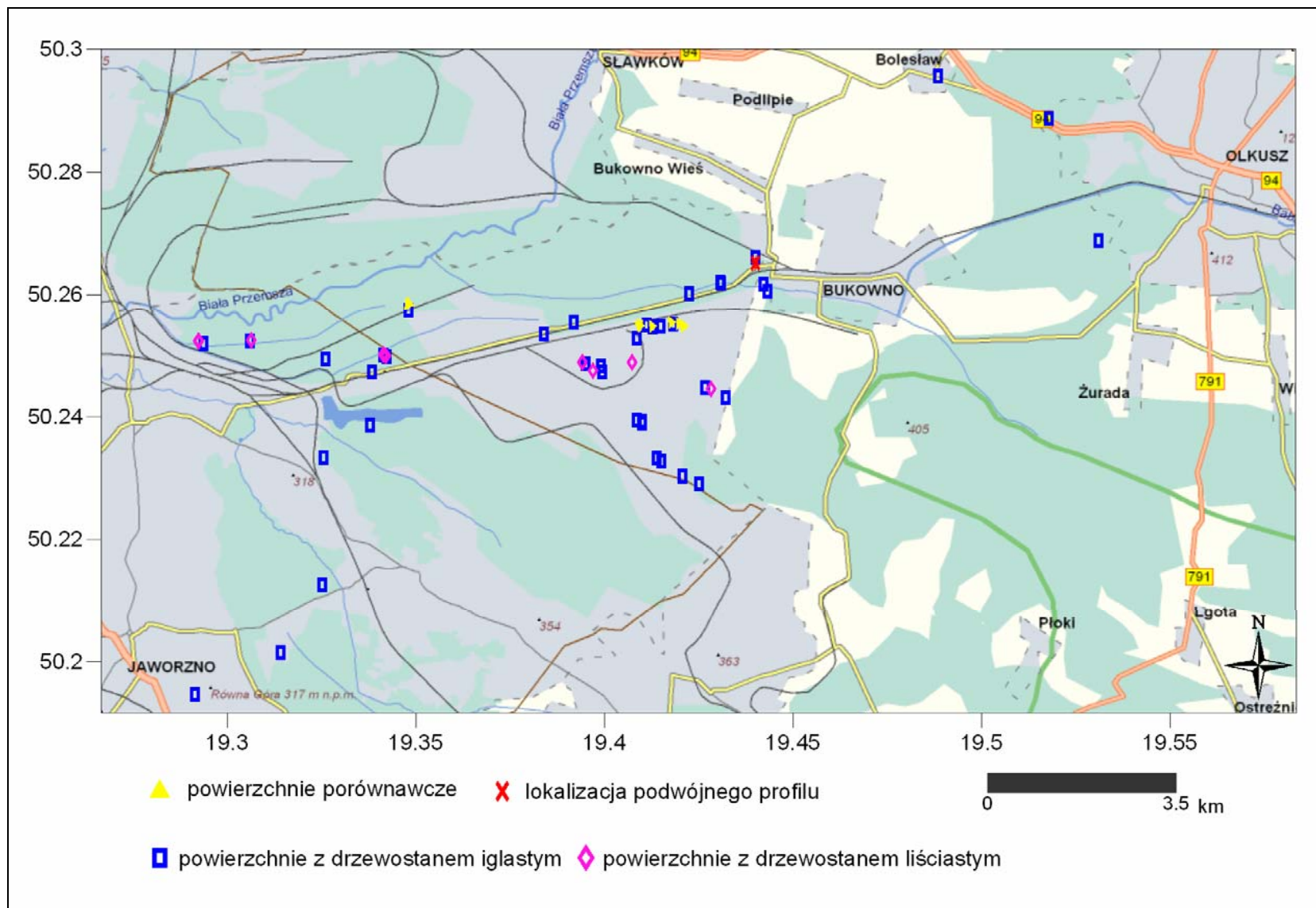
ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1. Lokalizacja obiektu badań (fragment zdjęcia satelitarnego Landsat TM z okolic Bukowna; zdjęcie udostępnione w ramach promocji przez firmę GEOSYSTEMS POLSKA z Warszawy, 2004).....	90
Załącznik 2. Lokalizacja powierzchni badawczych w transekcie Jaworzno – Bukowno – Olkusz.....	91
Załącznik 3. Charakterystyka powierzchni badawczych na podstawie badań własnych oraz danych Nadleśnictwa Chrzanów i Olkusz (Operat... 2005) wraz z zestawieniem wyników pomiarów terenowych objętościowej podatności magnetycznej κ	92
Załącznik 4. Kształtowanie się objętościowej podatności magnetycznej (κ) powierzchni gleby, zmierzonej w terenie w transekcie Jaworzno – Bukowno – Olkusz z zachodu na wschód (kolumny niebieskie, numery 11-51 (S lub R) – drzewostan iglasty; kolumny różowe, numery 52-60 (S lub R) – drzewostan liściasty; kolumny żółte, numery 1-10 – powierzchnie porównawcze, kolumna czerwona, nazwa – profil gleby kopalnej - Pgk) na tle wielkości opadu pyłu w roku 1985 i 1998.....	100
Załącznik 5. Pionowy układ podatności magnetycznej mierzonej w 30 cm rdzeniach.	101
Załącznik 6. Krzywe termomagnetyczne próbek z poziomów organicznego i próchnicznego oraz skały macierzystej z powierzchni 57R.	105
Załącznik 7. Zawartości metali ciężkich w glebach wzdłuż transektu zachód-wschód oraz wartości współczynników wzbogacenia (a) w stosunku do skały macierzystej dla poszczególnych pierwiastków.	106
Załącznik 8. Morfologia i skład chemiczny (mierzony punktowo) różnych cząstek magnetycznych wyseparowanych z podpoziomu butwinowego powierzchni 39S (powiększenia SEM: A - 5000x, B – 4000x, C – 3500x, D – 1900x).	108
Załącznik 9. Kulista cząstka zawierająca żelazo i cynk oraz ziarna kwarcu i węgla wapnia o nieregularnych kształtach.	108
Załącznik 10. Cząstki wyseparowane z poziomu organicznego powierzchni 57R, zawierające tlenki żelaza, manganu oraz glinokrzemiany.	109
Załącznik 11. Cząstki wyseparowane z poziomu organicznego powierzchni 39S, zawierające m.in. potas, wapń, żelazo oraz cynk.	109
Załącznik 12. Zdjęcie SEM (powiększenie 10000x) cząstek magnetycznych wyseparowanych z poziomu Oh/Ah powierzchni 39S zawierające związki o bardzo zróżnicowanym składzie chemicznym.....	110
Załącznik 13. Cząstki wyseparowane z poziomu próchnicznego powierzchni 39S, różniące się kształtem i strukturą powierzchni.....	110
Załącznik 14. Układ podatności magnetycznej: objętościowej κ zmierzonej w terenie i w laboratorium, specyficznej χ oraz zawartości metali ciężkich: żelaza (wartości $\text{Fe} \times 10$) i cynku (A); manganu i ołowiu (B) w profilu gleby kopalnej.	111
Załącznik 15. Wyniki pomiarów terenowych i laboratoryjnych objętościowej podatności magnetycznej (κ), specyficznej podatności magnetycznej (χ); wartości współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}), zawartości metali ciężkich, współczynniki korelacji między podatnością magnetyczną a zawartością metali ciężkich, z uwzględnieniem wieku próbek podwójnego profilu.	112

Załącznik 1. Lokalizacja obiektu badań (fragment zdjęcia satelitarne Landsat TM z okolic Bukowna; zdjęcie udostępnione w ramach promocji przez firmę GEOSYSTEMS POLSKA z Warszawy, 2004).



Załącznik 2. Lokalizacja powierzchni badawczych w transekcie Jaworzno – Bukowno – Olkusz.



Załącznik 3. Charakterystyka powierzchni badawczych na podstawie badań własnych oraz danych Nadleśnictwa Chrzanów i Olkusz (Operat... 2005) wraz z zestawieniem wyników pomiarów terenowych objętościowej podatności magnetycznej κ .

1	2	3	4	5	6	7
Nr powierzchni badawczej	Lokalizacja	Wysokość (m npm)	Wiek (lata)	Charakterystyka powierzchni badawczej: dominujący drzewostan; zwarcie; typ i podtyp gleby	(Pod)poziom genetyczny (głębokość – cm)	Podatność magnetyczna κ ($\times 10^5$ SI)
POWIERZCHNIE PORÓWNAWCZE - brak roślinności						
1	Pole 2 wyrobiska po eksploatacji piasku PCC Rail „Szcakowa”	310	-	szary piasek	powierzchnia gruntu	0,4
2		265	-	szary piasek	powierzchnia gruntu	0,0
3		301	-	żółty piasek	powierzchnia gruntu	4,3
4	Pole 1 wyrobiska po eksploatacji piasku PCC Rail „Szcakowa”; rekultywowana skarpa	262	-	żółty piasek	powierzchnia gruntu	2,5
5		260	-	jasnożółty piasek	powierzchnia gruntu	3,0
6		263	-	jasnożółty piasek	powierzchnia gruntu	2,0
7	Pole 2 wyrobiska po eksploatacji piasku PCC Rail „Szcakowa”	271	-	biały piasek, żwir	powierzchnia gruntu	10,0
8		270	-	biały piasek, żwir	powierzchnia gruntu	8,0
9		272	-	biały piasek, żwir	powierzchnia gruntu	2,4
10		272	-	biały piasek, żwir	powierzchnia gruntu	11,0
POWIERZCHNIE Z DRZEWOSTANEM IGLASTYM W WIEKU DO 10 LAT						
11 S*	Oddział leśny 36A, Leśnictwo Sławków	263	2	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie luźne; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	AinCan (0-0,5) Can (0,5-1) Can (1-1,5)	5,4 5,0 2,0
12 S	Oddział leśny 55A, Leśnictwo Bukowno	274	6	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie przerywane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	AinCan (0-0,5) Can (0,5-1) Can (1-2)	14,0 32,8 6,6
13 R**	Oddział leśny 55B, Leśnictwo Bukowno	272	6	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie przerywane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	AinCan (0-0,5) Can (0,5-1)	10,5 0,4
14 R	Oddział leśny 38, Leśnictwo Sławków	265	7	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L. z domieszką dębu czerwonego <i>Quercus rubra</i> L., modrzewia europejskiego <i>Larix decidua</i> L.; zwarcie luźne; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	AinCan (0-0,5)	17,3

1	2	3	4	5	6	7
15 S	Oddział leśny 55B, Leśnictwo Bukowno	273	10	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie luźne; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	AinCan (0-1)	14,0
16 S	Oddział leśny 55B, Leśnictwo Bukowno	272	10	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie luźne; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-0,5) AinCan (0,5-1)	21,0 1,3
POWIERZCHNIE Z DRZEWOSTANEM IGLASTYM W WIEKU 11 - 20 LAT						
17 R	Oddział leśny 63, Leśnictwo Bukowno	308	15	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie przerwane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-1) Ainan (1-1,5) Can (<1,5)	10,6 24,1 3,1
18 S	Oddział leśny 64, Leśnictwo Bukowno	284	15	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L. z domieszką brzozy brodawkowatej <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie umiarkowane; arenosol inicjalny	Olf (0-1) Ain (1-3) C (<3)	12,6 33,2 3,0
19 R	Oddział leśny 38, Leśnictwo Sławków	265	15	modrzew europejski <i>Larix decidua</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-2) Ainan (2-25) Can (<25)	16,5 18,5 0,5
20 S	Oddział leśny 55B, Leśnictwo Bukowno	269	16	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-2) Ainan (2-3) Ain/Can (3-10) Can (<10)	10,4 24,5 9,5 2,0
21 R	Oddział leśny 62, Leśnictwo Bukowno,	294	18	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-2) Ainan (2-6) Ain/Can (6-20) Can (<20)	13,5 22,9 6,4 2,5
22 R	Oddział leśny 78, Leśnictwo Szczakowa	271	19	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	OI (0-1) Of/Oh (1-2) Ain (2-3,5) AinC (3,5-9)	30,2 31,0 102,3 83,5
23 R	Oddział leśny 40, Leśnictwo Sławków	260	20	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	OI (0-1) Ainan (1-7) AinC1an (7-12) AinC2an (12-16) Can (<16)	117,5 190,0 140,0 20,0 5,0

1	2	3	4	5	6	7
POWIERZCHNIE Z DRZEWOSTANEM IGLASTYM W WIEKU 21 - 40 LAT						
24 S	Oddział leśny 64, Leśnictwo Bukowno	282	22	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L. z domieszką topoli osiki <i>Populus tremula</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-1) Ainan (1-3) Ain/Can (3-6) Can (<6)	14,8 31,9 12,0 1,9
25 R	Oddział leśny 65, Leśnictwo Bukowno	274	22	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie pełne; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-3) Ainan (3-13) Ain/Can (13-25) Can (<25)	19,4 30,0 9,6 2,4
26 R	Oddział leśny 65, Leśnictwo Bukowno	269	24	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie pełne; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	OI (0-1) Of (1-3) Ainan (3-8) Can (<8)	13,3 23,8 36,3 1,9
27 R	Oddział leśny 65, Leśnictwo Bukowno	273	25	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie pełne; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	OI (0-0,5) Of (0,5-1,5) Ainan (1,5-13) Ain/Can (<13)	11,8 28,3 28,0 3,6
28 R	Oddział leśny 65, Leśnictwo Bukowno	278	25	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie pełne; arenosol biellicowany	OI (0-1) Of/Oh (1-3) Oh (3-3,5) Ah (3,5-9)	51,1 94,0 129,2 147,1
29 S	Oddział leśny 62B, Leśnictwo Bukowno	279	27	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L., z domieszką brzozy brodawkowatej <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie przerywane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-2) Ainan (2-4) Ain/Can (4-14) Can (<14)	12,3 45,2 7,3 2,9
30 S	Oddział leśny 62B, Leśnictwo Bukowno	276	27	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L., z domieszką brzozy brodawkowatej <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie umiarkowane; arenosol inicjalny	Olf (0-3) Ain (3-5) Ain/C (5-16) C (<16)	7,3 21,7 14,2 1,0
31 S	Oddział leśny 62B, Leśnictwo Bukowno	279	27	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L., z domieszką brzozy brodawkowatej <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie umiarkowane; arenosol inicjalny	Olf (0-2) Ain (2-4) Ain/C (4-16) C (<16)	6,2 15,5 7,8 1,0
32 S	Oddział leśny 43A, Leśnictwo Bukowno	311	28	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie przerywane; arenosol biellicowany	OI (0-1) Of (1-2) Oh (2-4) A/Ees (4-10)	37,1 76,9 93,6 78,2

1	2	3	4	5	6	7
33 R	Oddział leśny 44, Leśnictwo Bukowno	313	30	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie przerywane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Ol (0-0,5) Of (0,5-6) Of/Oh (2-4) Ain/Can (4-10)	27,0 56,5 110,1 27,2
34 R	Oddział leśny 38, Leśnictwo Sławków	263	30	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Ol (0-1) Of (1-2) Of/Oh (2-5) Ah/Can (5-11) Can (<11)	41,0 85,5 186,9 105,0 9,0
35 R	Oddział leśny 33, Leśnictwo Sławków	285	36	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Ol (0-1) Of (1-4) Of/Oh (4-6) Oh/Ah (6-8) Ah (<8)	32,0 47,5 61,1 85,2 81,8
36 R	Oddział leśny 220, Leśnictwo Pomorzany (Nadl. Olkusz)	313	40	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Ol (0-0,5) Of (0,5-3,5) Of/Oh (3,5-5)	31,0 50,4 96,3
POWIERZCHNIE Z DRZEWOSTANEM IGLASTYM W WIEKU 41 - 60 LAT						
37 S	Oddział leśny 28, Leśnictwo Sławków	287	50	sosna czarna <i>Pinus nigra</i> Arn.; zwarcie pełne; arenosol właściwy	Ol (0-1) Of (1-2) Of/Oh (2-3) Ah (3-4) Ah/C1 (4-7) Ah/C2 (7-10) C (<10)	33,0 43,1 64,0 166,6 70,0 10,9 7,1
38 R	Oddział leśny 225, Leśnictwo Pomorzany (Nadl. Olkusz)	337	55	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie pełne; arenosol właściwy	Ol (0-2) Of (2-5) Of/Oh (5-7) Oh/Ah (7-8)	31,1 45,9 76,3 87,0
39 S	Oddział leśny 28, Leśnictwo Sławków	263	60	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; arenosol właściwy	Ol (0-1) Of (1-4) Oh/Ah (4-9) Ah (9-11) Ah/C (11-20) C (<20)	123,7 248,3 250,0 148,0 340,0 11,0

1	2	3	4	5	6	7
40 S	Oddział leśny 54A, Leśnictwo Bukowno	299	60	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie pełne; gleba bielnicowa właściwa	Ol (0-1) Of (1-7) Oh/Ah (7-8)	33,5 68,2 100,2
POWIERZCHNIE Z DRZEWOSTANEM IGLASTYM W WIEKU 61 - 75 LAT						
41 S	Oddział leśny 54, Leśnictwo Bukowno	307	70	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie przerywane; gleba bielnicowa właściwa	Ol (0-2) Of (2-3) Of/Oh1 (3-4) Of/Oh2 (4-7) Oh/Ah (7-10) Ah/Ees (10-15)	41,0 57,0 206,0 191,0 20,0 5,8
42 S	Oddział leśny 43A, Leśnictwo Bukowno	305	75	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba bielnicowa właściwa	Ol (0-1) Of (1-3) Of/Oh (3-9) Oh/Ah (9-11) AEes (11-18)	51,0 72,1 109,0 68,0 5,7
POWIERZCHNIE Z DRZEWOSTANEM IGLASTYM W WIEKU 76 - 130 LAT						
43 S	Las Miejski, Jaworzno	315	80	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba bielnicowa właściwa	Ol (0-2) Of (2-7) Oh (7-9) Ah (9-12) Ah/Ees (12-25) Ees (25-30) Bs (30-42)	126,8 229,9 955,4 332,2 86,2 78,7 80,1
44 S	Oddział leśny 187, Leśnictwo Ciężkowice	281	80	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba bielnicowa właściwa	Ol (0-3) Of (3-8) Oh (8-10) Ah (10-15) Ees (15-30) Bfe (30-40)	112,8 285,1 506,8 176,2 80,6 82,5
45 S	Oddział leśny 163, Leśnictwo Szczakowa	305	80	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba bielnicowa właściwa	Ol (0-2) Of (2-6) Oh/Ah (6-10) Ah/Ees (10-16) Bfe (16-20) B/C (20-43)	107,9 187,2 169,0 77,8 85,7 90,9

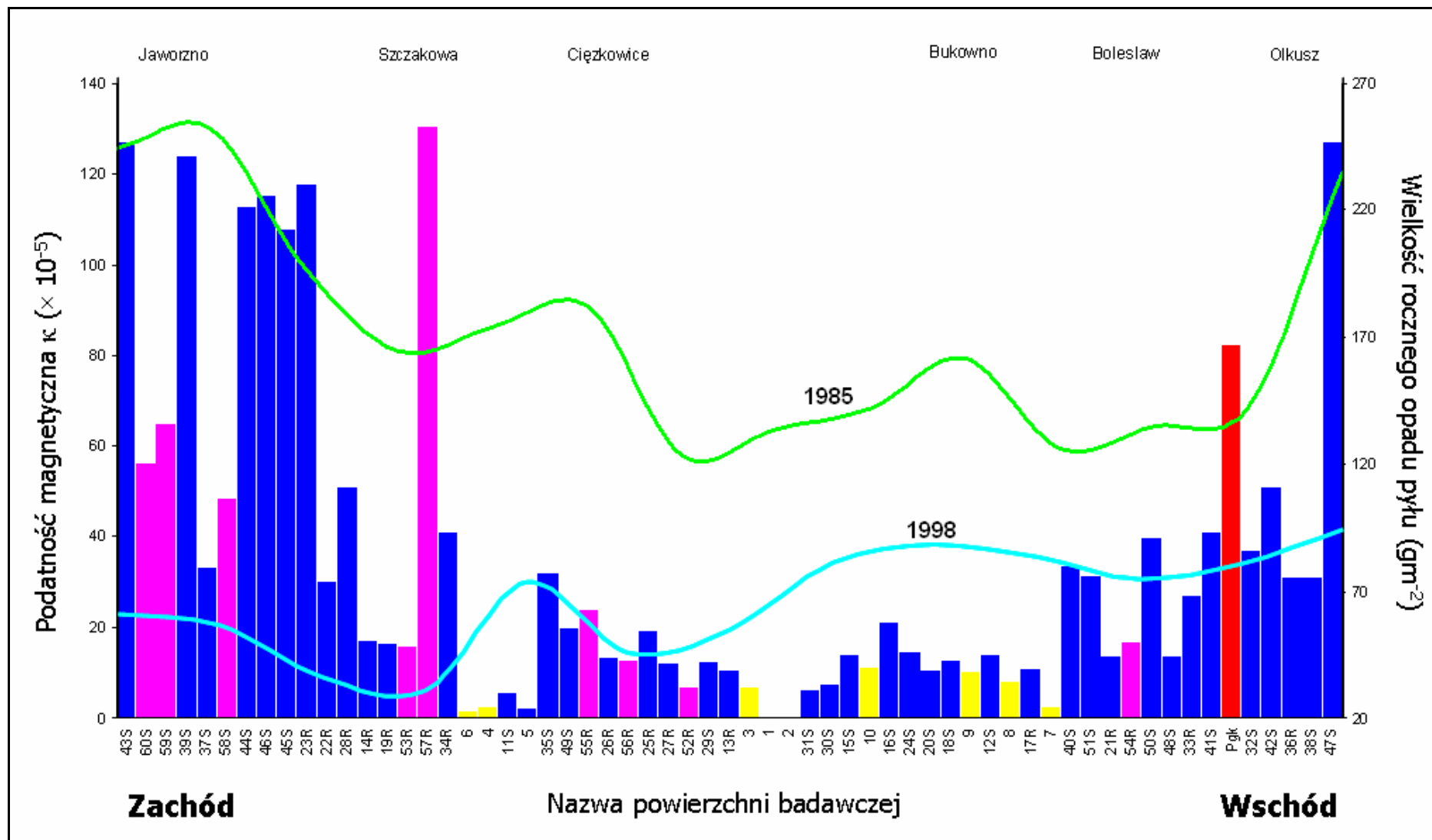
1	2	3	4	5	6	7
46 S	Oddział leśny 163, Leśnictwo Ciężkowice	277	80	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; gleba biellicowa właściwa	Ol (0-2) Of (2-5) Oh/Ah (5-10) Ah/E (10-16) B (16-25)	115,2 384,9 509,1 105,9 134,0
47 S	Oddział leśny 74 Leśnictwo Żurada (Nadl. Olkusz)	341	80	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie pełne; gleba biellicowa właściwa	Ol (0-2) Of/Oh (2-6) Oh/Ah (6-8) Ah/Ees (8-11)	126,8 342,1 187,5
48 S	Oddział leśny 54, Leśnictwo Bukowno	310	80-100	Sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie pełne; gleba biellicowa właściwa	Ol (0-2) Of (2-7) Of/Oh (7-9) Oh (9-11) Oh/Ah (11-13) Ah (13-15) Ah/Ees (15-30)	13,7 25,0 35,5 102,0 109,0 93,2 47,0
49 S	Oddział leśny 33, Leśnictwo Sławków	301	80-100	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L. z domieszką brzozy brodawkowatej <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie umiarkowane; gleba biellicowa właściwa	Ol (0-1) Of (1-5) Of/Oh (5-8) Ah (8-10) Ah/Ees (10-14) Ees (14-30)	20,3 46,4 93,9 147,0 29,0 4,5
50 S	Oddział leśny 54, Leśnictwo Bukowno	294	95-100	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie umiarkowane; arenosol właściwy	Ol (0-0,5) Of (0,5-1) Oh (1-3) Ah (3-4) Ah/C (4-12) C (<12)	39,8 47,6 74,1 115,0 111,7 12,2
51 S	Oddział leśny 63, Leśnictwo Bukowno	319	120-130	sosna zwyczajna <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie pełne; gleba biellicowa właściwa	Ol (0-1) Of/Oh (1-7) Ah (7-11)	31,2 65,4 104,0
POWIERZCHNIE Z DRZEWOSTANEM LIŚCIASTYM W WIEKU DO 10 LAT						
52 R	Oddział leśny 61B, Leśnictwo Bukowno	268	4-5	brzoza brodawkowata <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie luźne; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	AinCan (0-6) Can (<6)	6,8 2,0

1	2	3	4	5	6	7
53 R	Oddział leśny 38, Leśnictwo Sławków	265	7	dąb czerwony <i>Quercus rubra</i> L. z domieszką sosny zwyczajnej <i>Pinus sylvestris</i> L.; zwarcie przerywane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Ain/Can (0-8) Can (<8)	16,0 2,2
POWIERZCHNIE Z DRZEWOSTANEM LIŚCIASTYM W WIEKU 11 - 20 LAT						
54 R	Oddział leśny 62, Leśnictwo Bukowno	297	12-13	brzoza brodawkowata <i>Betula pendula</i> Roth., zwarcie przerywane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-1) Ainan (1-2) Can (2-30)	16,8 23,7 8,3
55 R	Oddział leśny 65, Leśnictwo Bukowno	269	20	brzoza brodawkowata <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-3) Ainan (3-7) Ain/Can (7-19)	23,8 38,8 9,8
POWIERZCHNIE Z DRZEWOSTANEM LIŚCIASTYM W WIEKU 21 - 40 LAT						
56 R	Oddział leśny 65, Leśnictwo Bukowno	275	22	olsza szara <i>Alnus incana</i> Moench; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	Olf (0-0,5) Of (0,5-1) Ainan (1-2) Ban (2-5) Can (<5)	12,6 29,0 31,5 11,5 2,0
57 R	Oddział leśny 38, Leśnictwo Sławków	263	30	brzoza brodawkowata <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie umiarkowane; gleba industrio- i urbanoziemna o niewykształconym profilu	OI (0-1) Of (1-2,5) Oh/Ah (2,5-4) Ah/C1an (4-6) Ah/C2an (6-12) Can (<12)	130,5 160,0 222,8 47,0 20,0 2,6
POWIERZCHNIE Z DRZEWOSTANEM LIŚCIASTYM W WIEKU 41 - 60 LAT						
58 S	Oddział leśny 28, Leśnictwo Sławków	287	50	brzoza brodawkowata <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie umiarkowane; arenosol właściwy	OI (0-1) Of (1-2) Oh/Ah (2-7) Ah/C1 (7-10) Ah/C2 (10-14) C (<14)	48,3 68,0 162,0 148,9 57,0 8,0
59 S	Oddział leśny 28, Leśnictwo Sławków	262	50-60	brzoza brodawkowata <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie umiarkowane; arenosol właściwy	OI (0-1) Of (1-2) Oh/Ah (2-5) Ah (5-7) AhC (7-20)	65,0 84,5 102,3 109,0 49,0

1	2	3	4	5	6	7
60 S	Oddział leśny 28, Leśnictwo Sławków	264	50-60	brzoza brodawkowata <i>Betula pendula</i> Roth.; zwarcie przerywane; arenosol właściwy	Ol(trawa) (0-0,5) Of (0,5-2) Oh/Ah (2-4) Ah/C1 (4-6) Ah/C2 (6-12) C (<12)	56,0 112,2 133,0 128,1 18,0 0,4

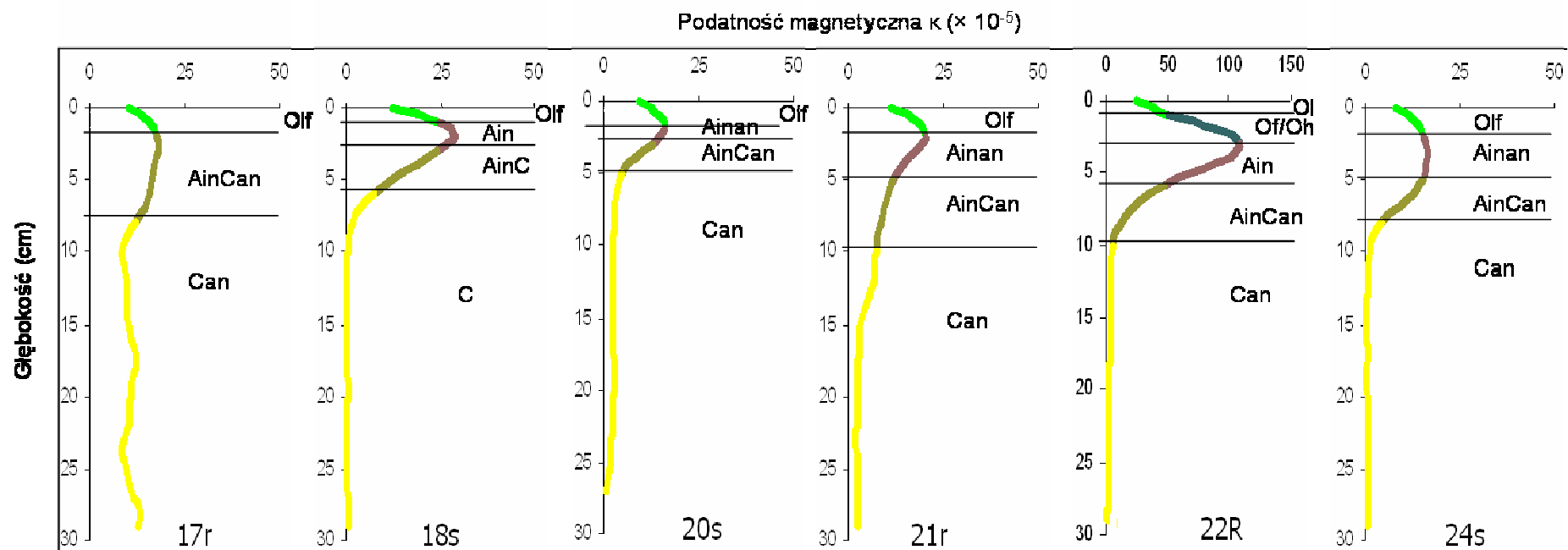
* S (sukcesja) – oznacza, że roślinność pochodzi z sukcesji naturalnej, przy czym w przypadku powierzchni z drzewostanem powyżej 60-letnim oznacza naturalne siedlisko leśne; ** R (rekultywacja) – oznacza, że roślinność została wprowadzona na daną powierzchnię w procesie rekultywacji

Załącznik 4. Kształtowanie się objętościowej podatności magnetycznej (κ) powierzchni gleby, zmierzonej w terenie w transekcie Jaworzno – Bukowno – Olkusz z zachodu na wschód (kolumny niebieskie, numery 11-51 (S lub R) – drzewostan iglasty; kolumny różowe, numery 52-60 (S lub R) – drzewostan liściasty; kolumny żółte, numery 1-10 – powierzchnie porównawcze, kolumna czerwona, nazwa – profil gleby kopalnej - P_{gk}) na tle wielkości opadu pyłu w roku 1985 i 1998.



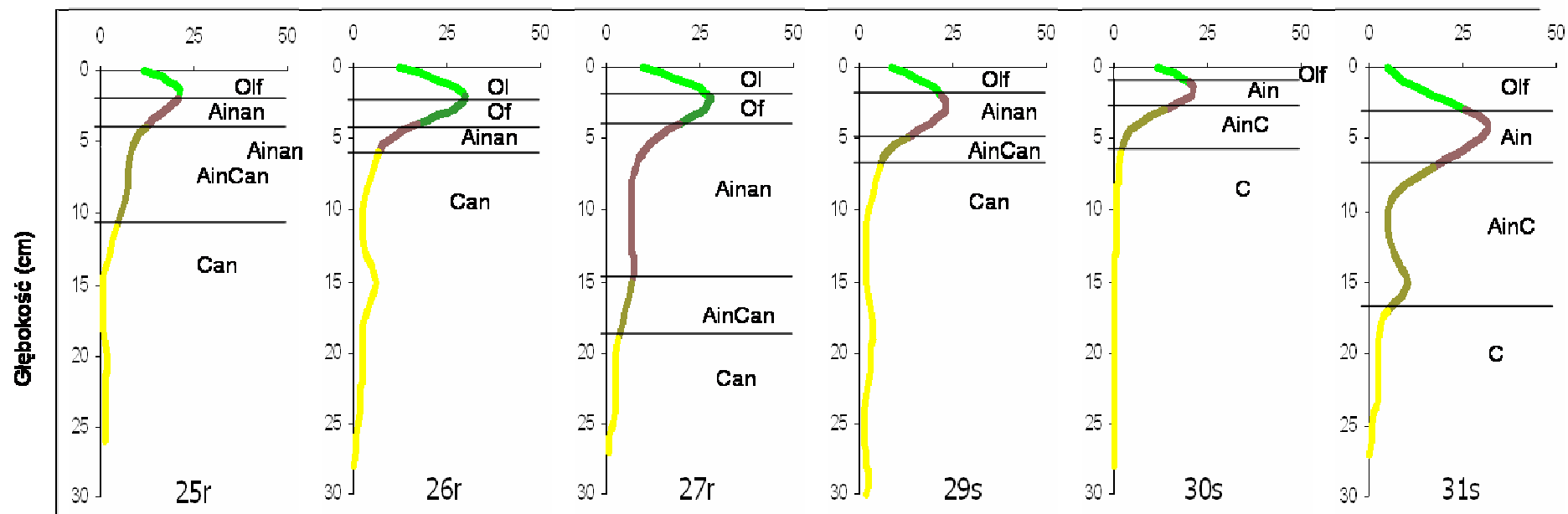
Załącznik 5. Pionowy układ podatności magnetycznej mierzonej w 30 cm rdzeniach.

DRZEWOSTANY IGLASTE
WIEK: 10-22 LATA



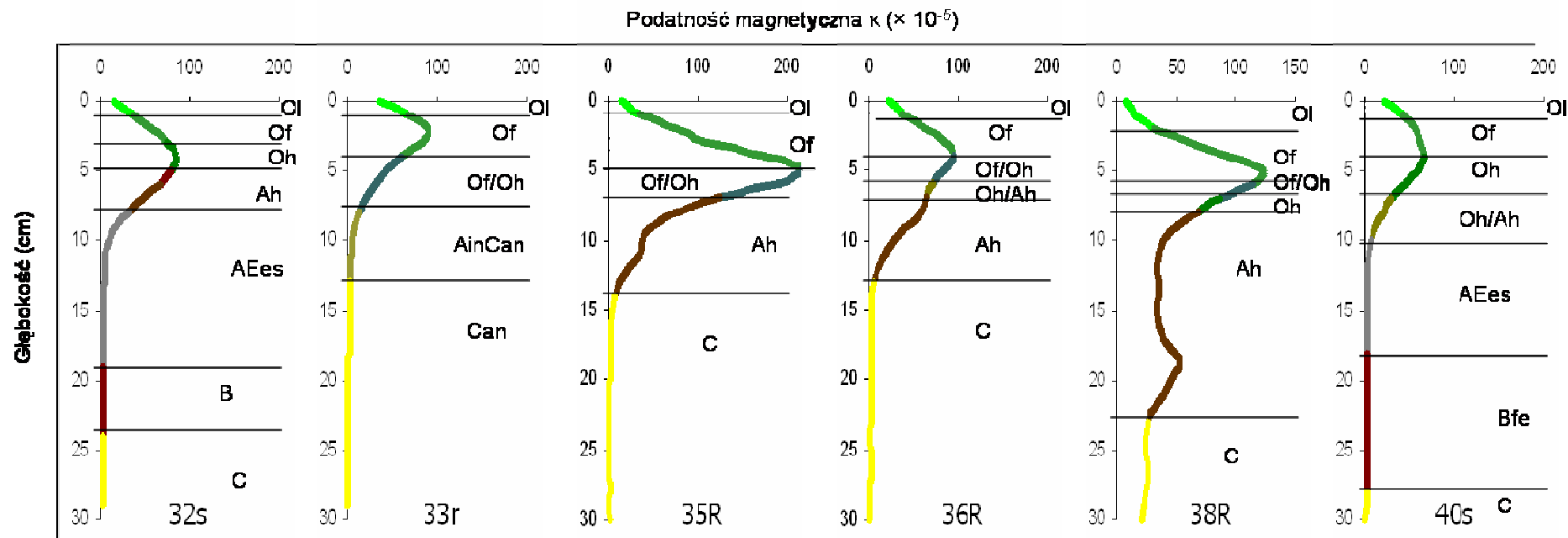
DRZEWOSTANY IGLASTE
WIEK: 22-27 LAT

Podatność magnetyczna κ ($\times 10^{-5}$)

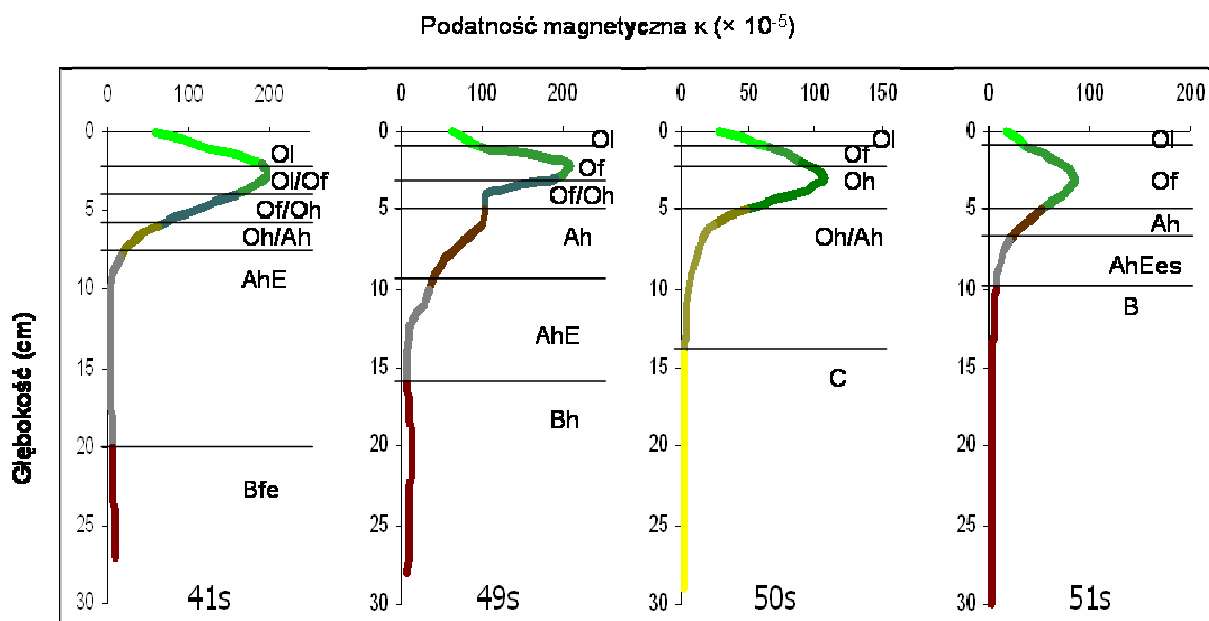


Załącznik 5. c.d.

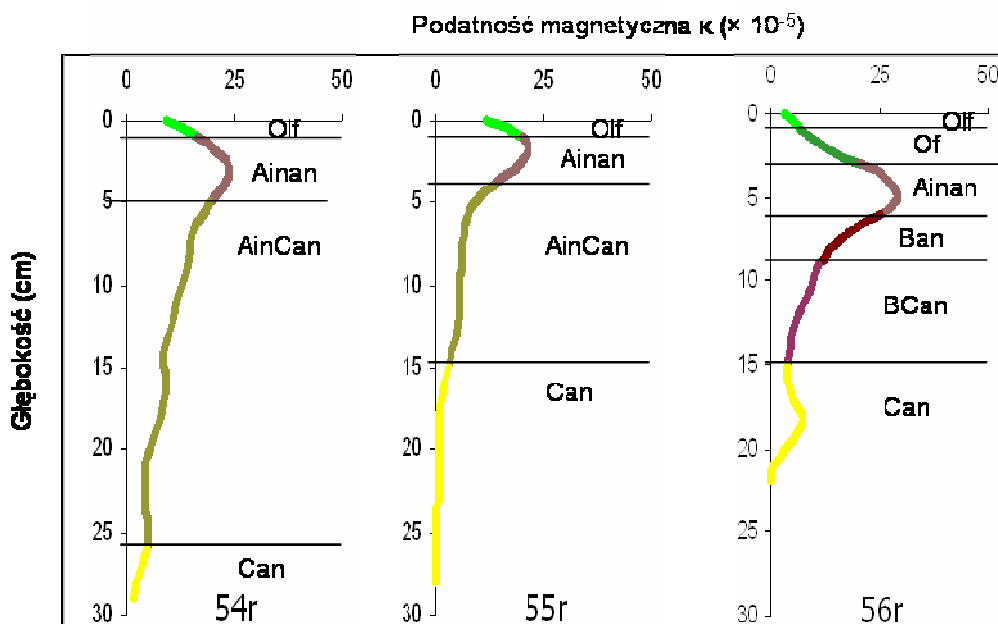
DRZEWOSTANY IGLASTE
WIEK: 28-60 LAT



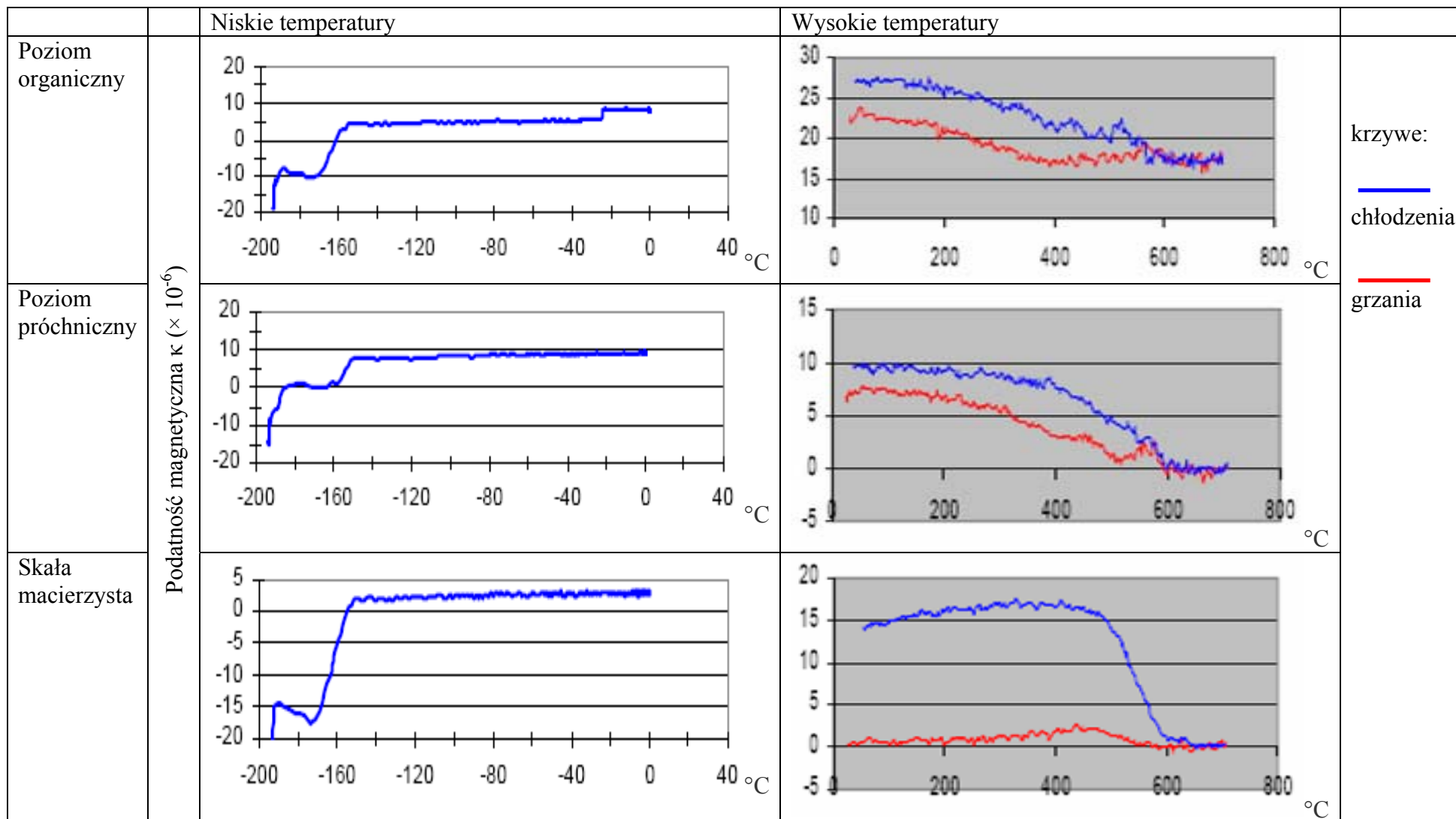
DRZEWOSTANY IGLASTE
WIEK: 61-130 LAT



DRZEWOSTANY LIŚCIASTE
WIEK: 11-22 LATA



Załącznik 6. Krzywe termomagnetyczne próbek z poziomów organicznego i próchnicznego oraz skały macierzystej z powierzchni 57R.

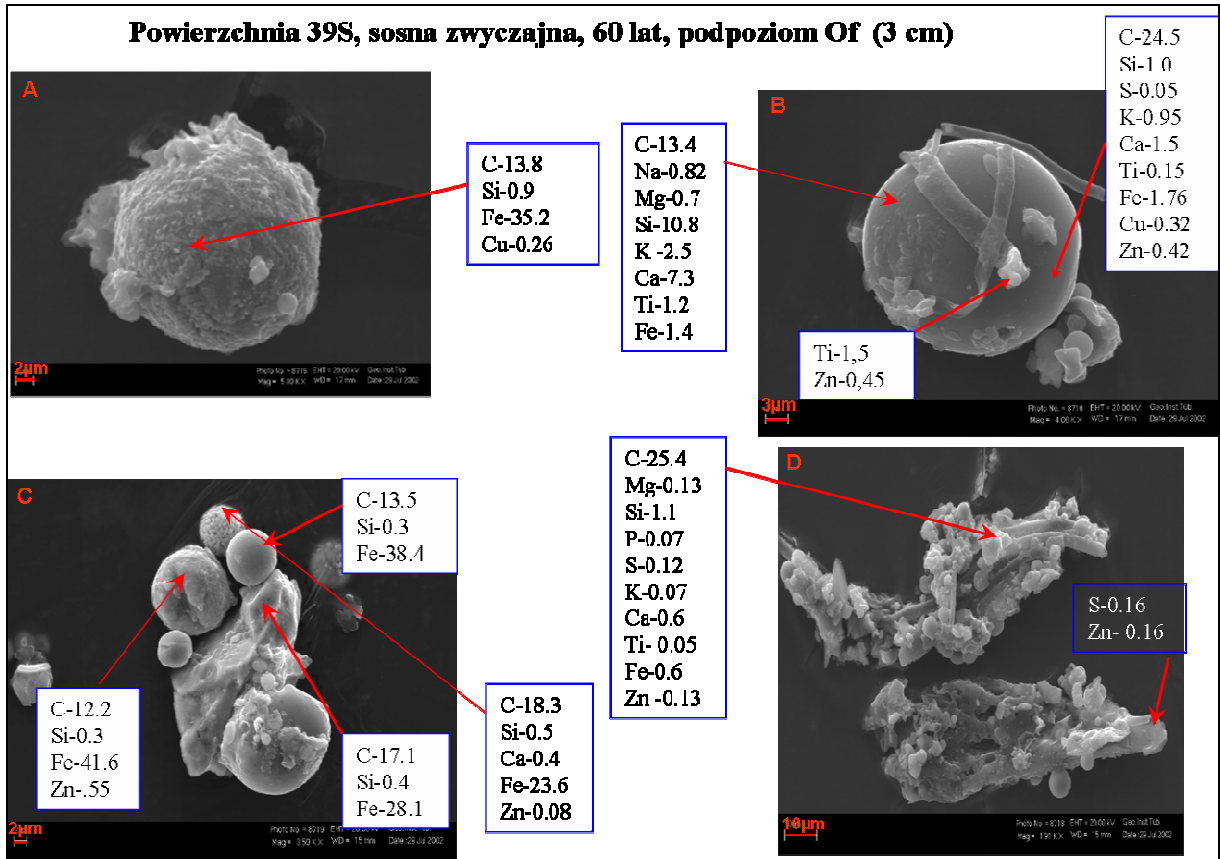


Załącznik 7. Zawartości metali ciężkich w glebach wzdłuż transektu zachód-wschód oraz wartości współczynników wzbogacenia (a) w stosunku do skały macierzystej dla poszczególnych pierwiastków.

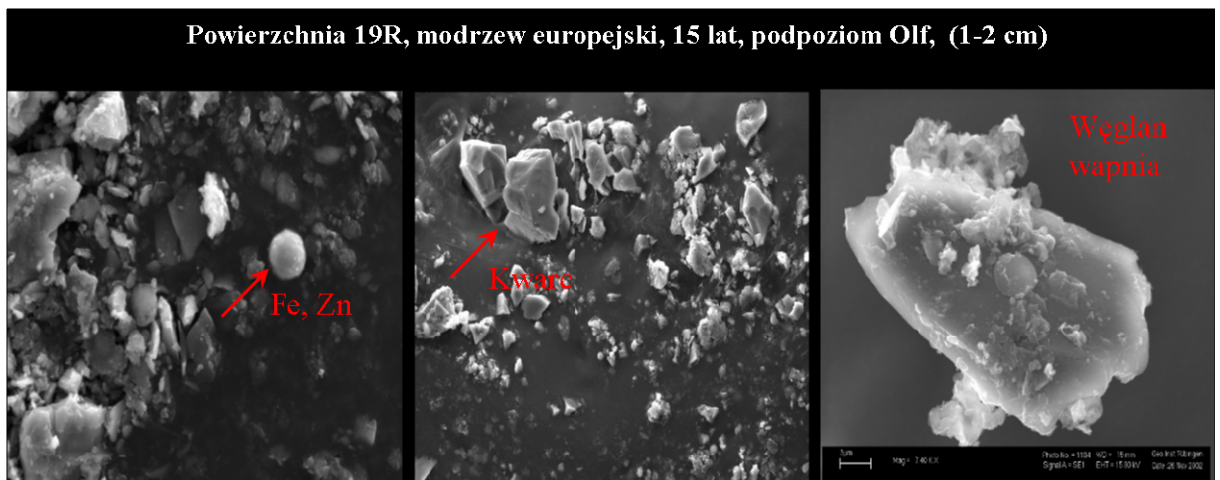
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Numer powierzchni	Poziom genetyczny	κ	Fe		Mn		Zn		Pb		Cd		Cu	
		($\times 10^{-5}$)	mgkg ⁻¹	a	mgkg ⁻¹	a	mgkg ⁻¹	a	mgkg ⁻¹	a	mgkg ⁻¹	a	mgkg ⁻¹	a
39S	Ol	35,5	3360	6,4	164,8	33,3	697,0	140,8	306,0	133,0	10,2	512,0	25,4	39,1
	Of	180,1	7750	14,7	442,0	89,3	2390,0	482,8	826,0	359,1	29,6	1480,0	45,9	70,6
	Oh/Ah	207,0	6510	12,4	364,0	73,5	2570,0	519,2	722,0	313,9	30,6	1529,0	37,4	57,5
	Ah/Ees	6,2	548	1,0	2,2	0,4	68,4	13,8	58,8	25,6	0,8	38,0	2,2	3,4
23R	Ol	16,4	1910	3,6	57,6	11,6	266,0	53,7	71,6	31,1	2,0	101,0	13,8	21,2
	Oh/Ah	238,2	3510	6,7	204,0	41,2	448,0	90,5	150,0	65,2	4,3	214,0	8,6	13,2
	Ah/C	50,8	884	1,7	35,0	7,1	99,3	20,1	32,2	14,0	0,9	43,0	2	3,1
57R	O	235,9	4560	8,7	274,0	55,4	693,0	140,0	224,0	97,4	7,4	370,0	11,2	17,2
	Ah	96,0	4211	8,0	240,0	48,5	697,5	140,9	210,0	91,3	8,7	437,0	10,8	16,6
	Ah/C1	18,0	562	1,1	12,8	2,6	24,4	4,9	9,6	4,2	0,4	18,0	1,4	2,2
	Ah/C2	1,7	208	0,4	3,0	0,6	2,6	0,5	1,0	0,4	0,1	4,0	0,2	0,3
49S	Of/Oh	93,5	2387	4,5	116,6	23,6	704,0	142,2	304,0	132,2	8,0	399,0	10	15,4
	Ah	41,6	800	1,5	32,8	6,6	195,0	39,4	59,6	25,9	2,2	111,0	3,4	5,2
	AhEes	9,3	566	1,1	10,8	2,2	90,0	18,2	14,0	6,1	0,7	37,0	1	1,5
	Bfe	2,1	506	1,0	8,2	1,7	17,0	3,4	3,8	1,7	0,1	6,0	0,2	0,3
55R	Olf	23,8	2070	3,9	695	140,4	997,9	201,6	136,2	59,2	8,9	445,0	30	46,2
	Ainan	38,8	1930	3,7	55	11,1	85,6	17,3	22,4	9,7	0,7	35,0	24,3	37,4
	Ain/Can	9,8	1540	2,9	15	3,0	21,3	4,3	4,6	2,0	0,4	20,0	32,7	50,3
25R	Olf	19,4	1780	3,4	339	68,5	211,8	42,8	82,3	35,8	2,2	110,0	29,6	45,5
	Ainan	30	3660	7,0	44	8,9	68,7	13,9	26	11,3	0,7	35,0	7,9	12,2
	Ain/Can	9,6	2840	5,4	32	6,5	23,4	4,7	8,6	3,7	0,1	5,0	4,2	6,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
29S	Olf	12,3	4240	8,1	501	101,2	458,6	92,6	176,3	76,7	8,3	415,0	32,9	50,6
	Ainan	45,2	2970	5,6	47	9,5	87	17,6	35,4	15,4	0,1	5,0	3,8	5,8
	Ain/Can	7,3	4260	8,1	37	7,5	46,4	9,4	17,2	7,5	śl.		4,1	6,3
30S	Olf	7,3	3170	6,0	1048	211,7	646,5	130,6	132,8	57,7	0,9	45,0	22,9	35,2
	Ain	21,7	3340	6,3	102	20,6	103,3	20,9	50,1	21,8	śl.		2,4	3,7
	Ain/C	14,2	1460	2,8	20	4,0	26,9	5,4	11,6	5,0	śl.		0,9	1,4
20S	Olf	10,4	3200	6,1	144	29,1	293,6	59,3	132,4	57,6	4,7	235,0	22,4	34,5
	Ainan	24,5	3950	7,5	64	12,9	99,2	20,0	49	21,3	0,9	45,0	6	9,2
	Ain/Can	9,5	3840	7,3	60	12,1	52,7	10,6	16,6	7,2	0,3	15,0	3,2	4,9
18S	Olf	12,6	2900	5,5	187	37,8	217,9	44,0	132,1	57,4	4,4	220,0	17,9	27,5
	Ain	33,2	2300	4,4	27	5,5	74	14,9	42,5	18,5	0,4	20,0	2,8	4,3
21R	Olf	13,5	2390	4,5	467	94,3	212,8	43,0	103,9	45,2	3,7	185,0	23,7	36,5
	Ainan	22,9	1930	3,7	73	14,7	46,4	9,4	17,7	7,7	0,3	15,0	7,6	11,7
	Ain/Can	6,4	1250	2,4	22	4,4	19	3,8	5,8	2,5	0,2	10,0	5,3	8,2
41S	Of/Oh1	132,9	1960	3,7	46,0	9,3	486,0	98,2	386,0	167,8	9,2	460,0	21	32,3
	Of/Oh2	261,6	4200	8,0	268,0	54,1	1380,0	278,8	826,0	359,1	26,8	1339,0	23	35,4
	Oh/Ah	15,1	320	0,6	5,2	1,1	110,0	22,2	61,2	26,6	2,6	130,0	1,4	2,2
	Ah/Ees	1,5	760	1,4	1,0	0,2	75,6	15,3	23,6	10,3	0,8	41,0	0,4	0,6
	(B)	2,4	223	0,4	3,2	0,6	50,0	10,1	11,8	5,1	0,1	4,0	0,6	0,9
47S	Of/Oh	143,6	3975	7,5	358	72,3	5550	1121,2	1970	856,5	53,15	2657,5	53,15	81,8
	Oh/Ah	52,2	2125	4	193,5	39,1	3325	671,7	19,5	8,5	32,05	1602,5	3205	49,3
	Ah/E	18,6	202	0,4	4	0,8	305	61,6	64	27,8	0,65	32,5	19,5	1
	E/B	1,5	111	0,2	8,5	1,7	7	1,4	700	304,3	0,5	25	2	3,1
wartości graniczne (Desaules 2001)			-		-		150		50		0,8		40	
współczynnik korelacji Pearson'a κ /			0,54		0,26		0,52		0,57		0,62		0,02	
istotny przy poziomie ufności $p < 0,05$			0,001		0,091		0,001		0,001		0,001		0,913	
współczynnik korelacji Spearman'a κ /			0,48		0,55		0,72		0,57		0,62		0,52	
istotny przy poziomie ufności $p < 0,05$			0,001		0,001		0,001		0,001		0,001		0,001	

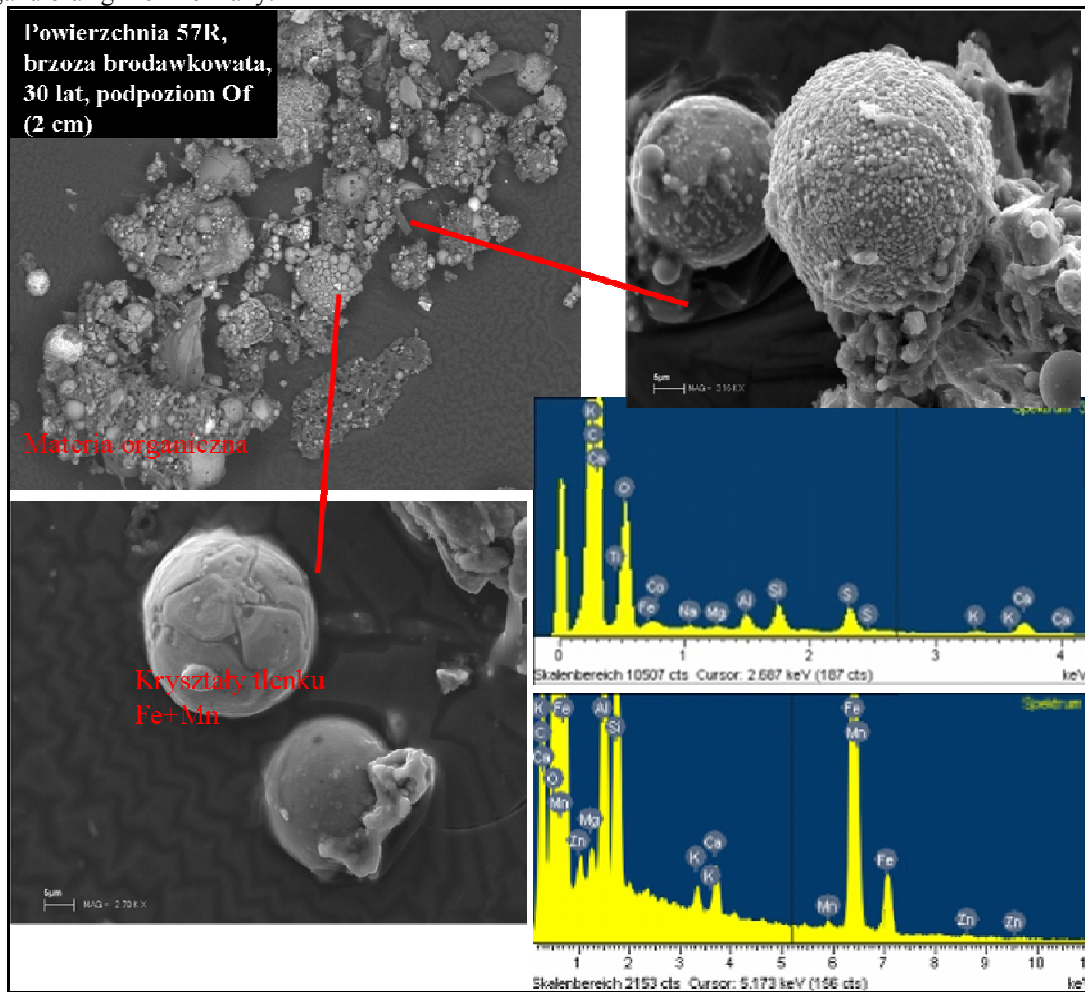
Załącznik 8. Morfologia i skład chemiczny (mierzony punktowo) różnych cząstek magnetycznych wyseparowanych z podziomu butwinowego powierzchni 39S (powiększenia SEM: A - 5000x, B - 4000x, C - 3500x, D - 1900x).



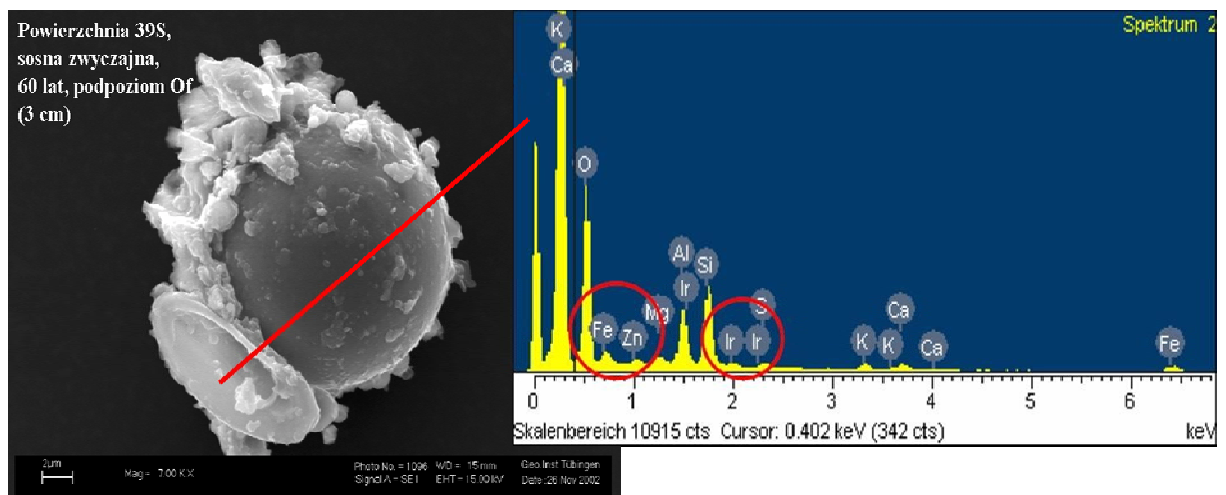
Załącznik 9. Kulista cząstka zawierająca żelazo i cynk oraz ziarna kwarcu i węgla wapnia o nieregularnych kształtach.



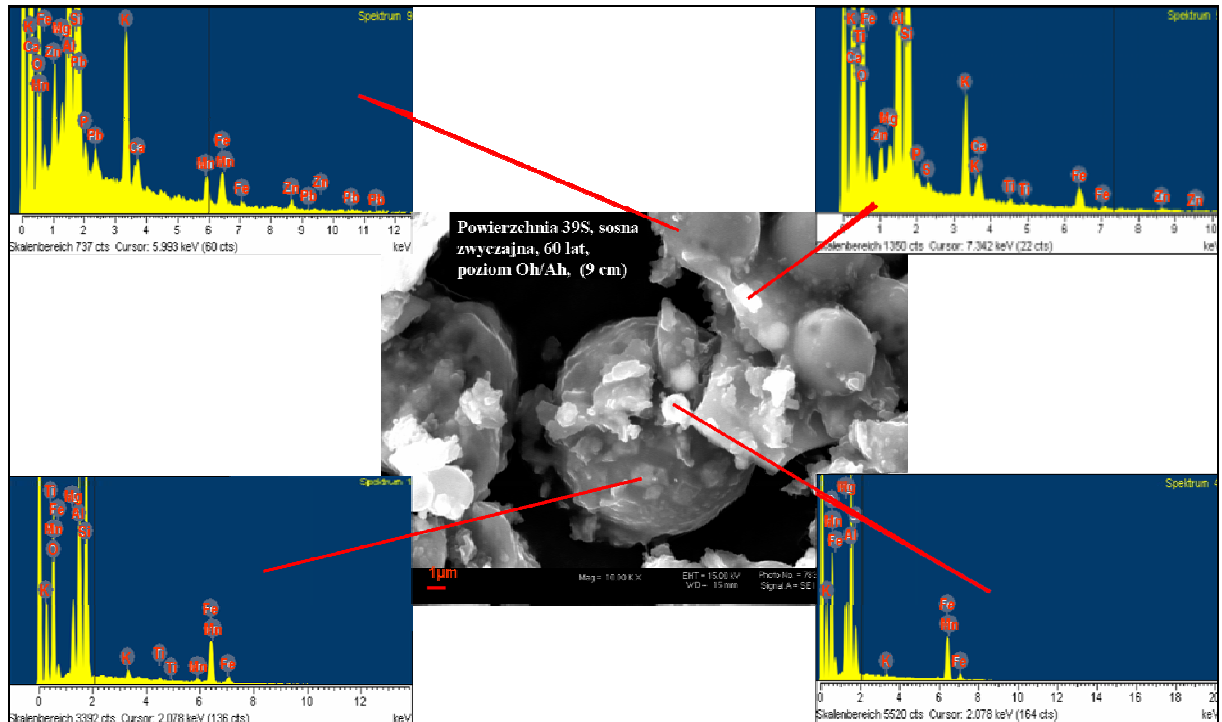
Załącznik 10. Cząstki wyseparowane z poziomu organicznego powierzchni 57R, zawierające tlenki żelaza, manganu oraz glinokrzemiany.



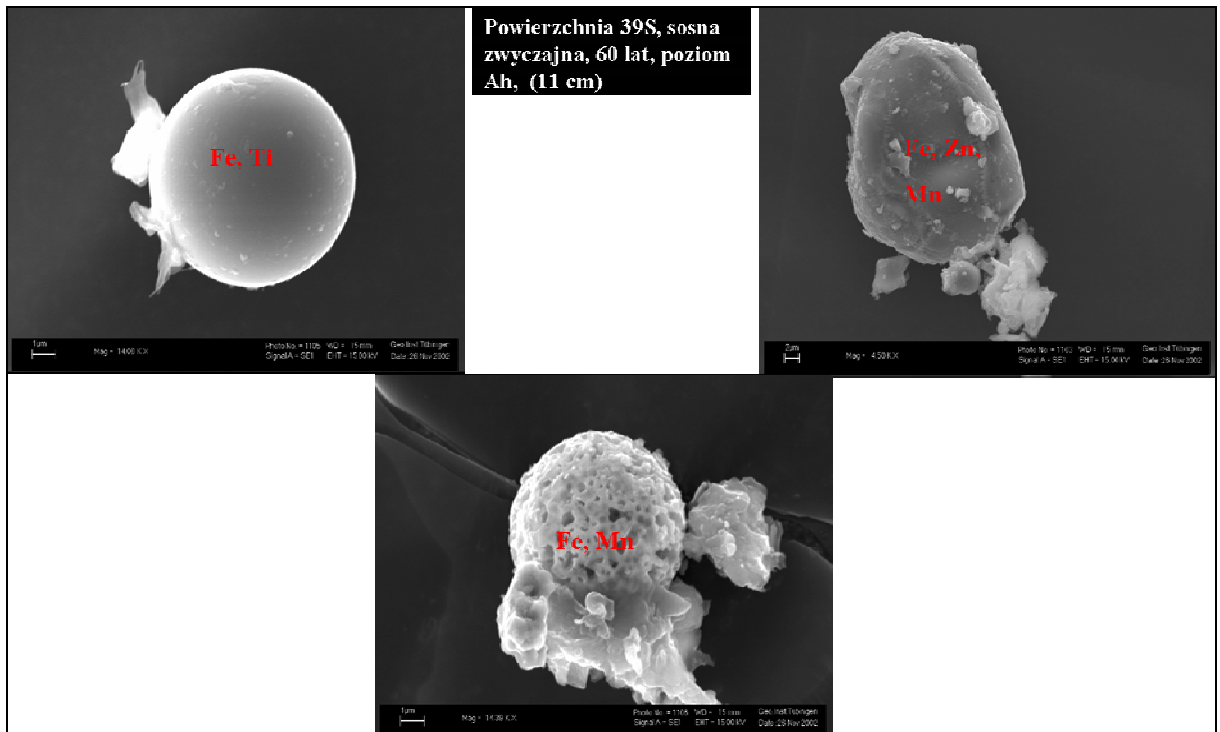
Załącznik 11. Cząstki wyseparowane z poziomu organicznego powierzchni 39S, zawierające m.in. potas, wapń, żelazo oraz cynk.



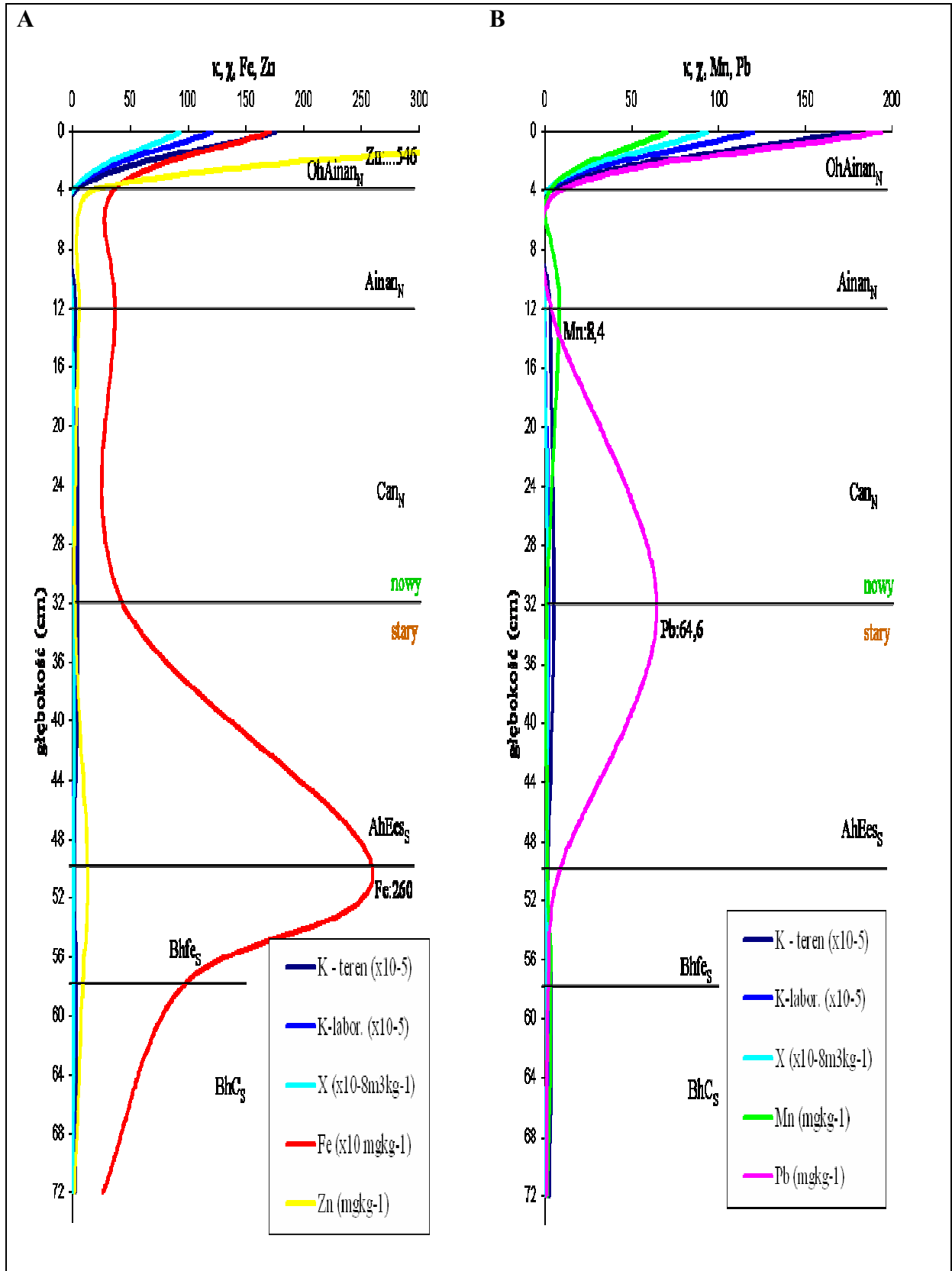
Załącznik 12. Zdjęcie SEM (powiększenie 10000x) cząstek magnetycznych wyseparowanych z poziomu Oh/Ah powierzchni 39S zawierające związki o bardzo zróżnicowanym składzie chemicznym.



Załącznik 13. Cząstki wyseparowane z poziomu próchnicznego powierzchni 39S, różniące się kształtem i strukturą powierzchni.



Załącznik 14. Układ podatności magnetycznej: objętościowej κ zmierzonej w terenie i w laboratorium, specyficznej χ oraz zawartości metali ciężkich: żelaza (wartości Fe $\times 10$) i cynku (A); manganu i ołowiu (B) w profilu gleby kopalnej.



Załącznik 15. Wyniki pomiarów terenowych i laboratoryjnych objętościowej podatności magnetycznej (κ), specyficznej podatności magnetycznej (χ); wartości współczynnika zależności częstotliwościowej podatności magnetycznej (χ_{FD}), zawartości metali ciężkich, współczynniki korelacji między podatnością magnetyczną a zawartością metali ciężkich, z uwzględnieniem wieku próbek podwójnego profilu.

Poziom genetyczny	Głębokość (cm)	$\kappa (\times 10^{-5})$ pomiar terenowy	$\chi (\times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1})$	χ_{FD} (%)	$\kappa (\times 10^{-5})$ pomiar laboratoryjny	Fe	Mn	Zn	Pb	Cd	Cu	Ni	wiek ^{14}C (BP)
						mg·kg ⁻¹							
OhAinan _N *	0-4	176,0	93,57	0,99	120,55	1714	70,4	546,0	194,0	6,42	7,8	1,6	120±95
Ainan _N	4-12	3,4	1,38	—	1,45	362	3,2	19,2	8,8	0,16	0,4	< 0,2	
Can _N	12-32	2,9	0,22	—	0,16	370	8,4	6,4	3,6	0,06	0,2	0,2	—
AhEes _S **	32-50	5,3	1,77	—	2,25	436	1,2	2,2	64,6	< 0,02	0,6	0,2	2080±140
Bhfe _S	50-58	1,8	1,31	—	1,12	2600	1,6	13,2	8,4	≤ 0,02	0,4	0,8	—
BhC _S	58-72	3,7	1,28	—	2,00	948	3,6	9,0	2,0	0,04	1,0	1,0	—
C _S	C>72	2,5	0,46	—	0,35	264	1,2	1,8	1,0	< 0,02	< 0,2	0,2	—
wartości graniczne (Desaules 2001)						—	—	150	50	0,8	40	50	—
współczynnik korelacji poziom ufności	κ – teren/ p	1,00 0,001	— —	— —	1,00 0,001	0,37 0,416	0,99 0,001	1,00 0,001	0,95 0,001	1,00 0,001	1,00 0,001	0,79 0,033	
współczynnik korelacji poziom ufności	χ / p	— —	— —	— —	1,00 0,001	0,38 0,400	0,99 0,001	1,00 0,001	0,95 0,001	1,00 0,001	1,00 0,001	0,80 0,031	
współczynnik korelacji	κ – labor./	1,00	—	—	—	0,38	0,99	1,00	0,95	1,00	1,00	0,80	

* N – oznacza górną nową część profilu; ** S – oznacza dolną starą część profilu; *** współczynniki korelacji istotne przy poziomie ufności p<0,05