

## ANIZOTROPIA PODATNOŚCI MAGNETYCZNEJ JAKO POTENCJALNE NARZĘDZIE WYZNACZENIA KIERUNKÓW PALEOPRĄDÓW W OSADACH GLACJALNYCH W OBSZARZE MIĘDZY PIOTRKOWEM TRYBUNALSKIM, RADOMSKIEM A PRZEDBORZEM (ŚRODKOWA POLSKA)

### ZARYS TREŚCI

Przedstawiono wyniki pomiarów anizotropii podatności magnetycznej (AMS) osadów czwartorzędowych pobranych z 13 stanowisk położonych w strefach I–IV form glacygenicznych SE części regionu łódzkiego. Na podstawie analizy statystycznej i graficznej położenia osi głównych elipsoid obrazujących tensory anizotropii podatności magnetycznej, odtworzono kierunki transportu glacialnego dla 206 próbek osadów różnego wieku i typu, głównie glacialnych. Stwierdzono przydatność analizy AMS przy wyznaczaniu kierunku transportu klastów w glinie lodowcowej oraz przy weryfikacji wyników pomiarów kierunkowych w osadach warstwowych wykonanych innymi metodami.

**Słowa kluczowe:** anizotropia podatności magnetycznej, kierunki paleoprądów, osady glacialne, łądolód warty, region łódzki, środkowa Polska

### WPROWADZENIE

Wszystkie rodzaje skał, w tym skały osadowe zawierają w swoim składzie trzy rodzaje minerałów magnetycznych (tzn. ferromagnetyki, paramagnetyki i diamagnetyki), które występują w nich w różnych ilościach. Te magnetyczne minerały pod wpływem działania słabego, zewnętrznego pola magnetycznego o natężeniu  $\vec{H} < 1mT$ , np. ziemskiego pola magnetycznego, nabierają indukowanego namagnesowania  $\vec{M}$ , którego wartość jest proporcjonalna do natężenia zewnętrznego pola magnetycznego  $\vec{H}$ . Kierunek uzyskanego namagnesowania zależy od orientacji owego pola w przestrzeni względem położenia danej formacji skalnej:

$$\vec{M} = k\vec{H} \quad (1)$$

Współczynnik proporcjonalności  $k$  w równaniu (1) to tensor – parametr fizyczny, zwany **podatnością magnetyczną**. Mówi on o tym, jak łatwo dana substancja może być namagnesowana. W układzie SI jest to bezwymiarowa wielkość skalarna opisująca tzw. właściwą (objętościową) podatność magnetyczną.

Wielkość podatności magnetycznej danej skały zależy od koncentracji i rodzaju ferro-, para- i diamagnetyków w jej składzie. Tylko w niektórych skałach, namagnesowanie  $\vec{M}$  indukowane w próbce o symetrycznym kształcie (np. sześcian, walec) ma jednakową wartość, niezależnie od kierunku przyłożenia magnesującego pola. Są to skały magnetycznie **izotropowe**. W zdecydowanej większości skał natężenie namagnesowania, indukowanego przez słabe pole magnetyczne zależy od orientacji próbki skalnej w przestrzeni względem owego pola. Takie skały są **anizotropowe**. Podatność magnetyczna próbek skalnych ( $k$ ) charakteryzuje się na ogół pewnym stopniem anizotropii. Polega to na tym, że wartości podatności magnetycznej zmierzone dla danej próbki w różnych jej położeniach względem cewki magnesującej w przyrządzie pomiarowym różnią się od siebie. Zmienność podatności magnetycznej w funkcji orientacji w przestrzeni jest opisywana matematycznie przez tensor drugiego rzędu  $k_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ). Macierz opisująca ten tensor:

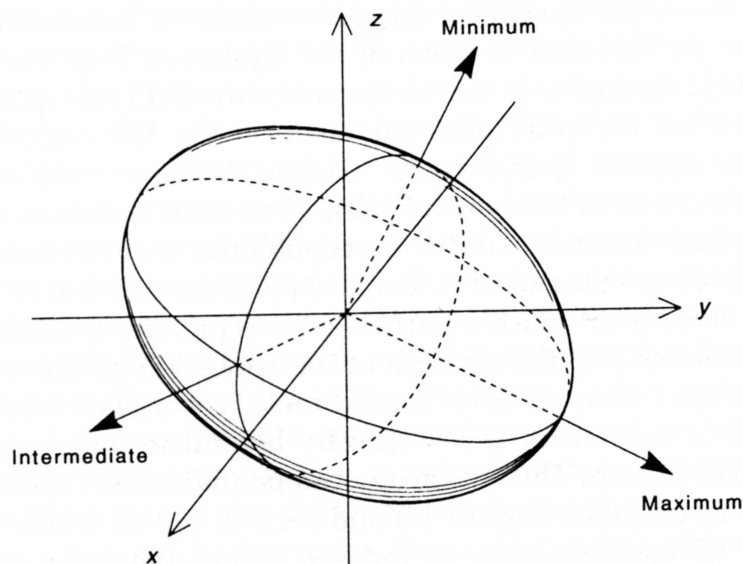
\* Polska Akademia Nauk, Instytut Geofizyki, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa, e-mail: duzy.canis@gmail.com

\*\* Katedra Geomorfologii i Paleogeografii, Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź, e-mail: lucyna.wachecka@geo.uni.lodz.pl

$$\begin{matrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{matrix}$$

jest macierzą symetryczną ( $k_{12} = k_{21}$ ,  $k_{13} = k_{31}$ ,  $k_{23} = k_{32}$ ,  $k_{11} = k_{\max}$ ,  $k_{22} = k_{\text{int}}$ ,  $k_{33} = k_{\min}$ ) co oznacza, że wystarczy zrobić tylko 6 pomiarów,

aby wyznaczyć stopień anizotropii podatności magnetycznej. Tensor anizotropii podatności magnetycznej danej próbki skalnej jest zazwyczaj przedstawiany graficznie w postaci elipsoidy, której trzy wzajemnie prostopadłe osie główne odpowiadają zmierzonym wartościom  $k_{\max}$ ,  $k_{\text{int}}$ ,  $k_{\min}$  (rys. 1).



Rys. 1. Elipsoida anizotropii podatności magnetycznej

Trzy wzajemnie prostopadłe osie główne elipsoidy odpowiadają wartościom maksymalnym, pośrednim i minimalnym podatności magnetycznej ( $k$ ) danej próbki, lub w wypadku wyliczenia średniej elipsoidy anizotropii podatności magnetycznej dla grupy  $N$  próbek opisują ich średnie wartości ( $k_{\max}$ ,  $k_{\text{int}}$ ,  $k_{\min}$ )  $\delta_T$  w danym stanowisku. Orientacja w przestrzeni trzech osi głównych jest definiowana we współrzędnych kartezjańskich ( $x, y, z$ ) lub we współrzędnych biegunowych kątami deklinacji i inklinacji (na podstawie Tarling, Hrouda 1993)

#### The ellipsoid of anisotropy of magnetic susceptibility

It can be calculated for each specimen or as the mean ellipsoid of AMS for the group of  $N$  specimens collected in one locality. Three mutual perpendicular main axes of ellipsoid present maximal, intermediate and minimal values of measured magnetic susceptibility of the each specimen or the calculated average values of  $k_{\max}$ ,  $k_{\text{int}}$ ,  $k_{\min}$  for the group of  $N$  specimens taken in one locality. Orientation in space of the three main axes of AMS ellipsoid can be described in the Cartesian ( $x, y, z$ ) or the pole coordinate system by the angles of declination and inclination (after Tarling, Hrouda 1993)

Numerycznie wyliczane są długości oraz kierunki (w przestrzeni) głównych osi owej elipsoidy, odpowiadające w/w wartościom podatności magnetycznej ( $k_{\max} > k_{\text{int}} > k_{\min}$ ) dla danej próbki, oraz po dwa kąty (deklinacji –  $D$  oraz inklinacji –  $I$ ), określające położenie w przestrzeni każdej z tych osi względem kierunku północy i płaszczyzny poziomej.

Wielkość anizotropii podatności magnetycznej zależy od dwóch czynników, tj. anizotropii pojedynczych ziaren minerałów magnetycznych oraz od stopnia ich uporządkowania

w osadzie. Z kolei anizotropia indywidualnych ziaren magnetycznych zależy tak od ich kształtu, jak i od ich budowy krystalograficznej. Zatem anizotropia podatności magnetycznej danej skały występuje wtedy, gdy osie „łatwego” namagnesowania pojedynczych ziaren minerałów magnetycznych są (statystycznie) w niej uporządkowane (Butler 1992; Tarling, Hrouda 1993). Dla takich minerałów ferromagnetycznych jak np. magnetyt i maghemit (powszechnie występujących w skałach osadowych) osiami łatwego namagnesowania są długie osie ziaren.

## PODSTAWY METODY BADAŃ

### Parametry anizotropii podatności magnetycznej

Parametry anizotropii podatności magnetycznej (AMS), czyli współczynniki określające stopień anizotropii wylicza się na podstawie różnic i wzajemnych stosunków wartości  $k_{\max}$ ,  $k_{\text{int}}$ ,  $k_{\min}$ . W niniejszej pracy wyliczono następujące parametry:

- skorygowany stopień anizotropii  $P_j$ , będący procentową miarą odstępstwa elipsoidy AMS od kształtu kulistego, czyli od przypadku izotropii (wg Jelinek 1981):

$$P_j = \exp \{ 2[(\ln k_{\max} - \ln k_{\text{sr}})^2 + (\ln k_{\text{int}} - \ln k_{\text{sr}})^2 + (\ln k_{\min} - \ln k_{\text{sr}})^2] \}^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{gdzie: } k_{\text{sr}} = (k_{\max} \times k_{\text{int}} \times k_{\min})^{1/3}$$

jest średnią geometryczną tych trzech wartości podatności magnetycznej.

Są różne wzory określające magnetyczną lineację  $L$  i magnetyczną foliację  $F$ . Popularną definicją tych dwóch parametrów, używaną najczęściej przy opracowywaniu wyników pomiarów AMS na mostkach są następujące wzory:

- na magnetyczną lineację  $L$ :

$$L = (k_{\max} - k_{\text{int}}) / k_{\text{sr}} \quad (3)$$

- na magnetyczną foliację  $F$ :

$$F = (k_{\text{int}} - k_{\min}) / k_{\text{sr}} \quad (4)$$

- na parametr kształtu elipsoidy anizotropii podatności magnetycznej  $T$  (wg Jelinek 1981):

$$T = (2 \ln k_{\text{int}} - \ln k_{\max} - \ln k_{\min}) / (\ln k_{\max} - \ln k_{\min}) \quad (5)$$

Splaszczone elipsoidy anizotropii podatności magnetycznej (w kształcie dysku) mają wartości  $T$  w przedziale  $0 < T < 1,0$ , zaś wydłużone elipsoidy anizotropii podatności magnetycznej mają wartości  $T$  w przedziale  $-1,0 < T < 0$ . Oznacza to, że dla  $T = 0$  mamy do czynienia z trójosiową elipsoidą podatności magnetycznej, w której  $L = F$  (elipsoida staje się kulą), zaś wartość  $P_j > 1$ .

Warto dodać, że w wieloletnim okresie badań anizotropii podatności magnetycznej skał przyjmowano początkowo uproszczone definicje w/w parametrów oraz definiowano szereg dodatkowych wielkości opartych zawsze na pomierzonych podatnościach: maksymalnej, pośredniej

oraz minimalnej. Te dawniej powszechnie stosowane definicje parametrów anizotropii podatności magnetycznej zebrane zostały przez Tarlinga i Hroudę (1993) wraz z uzasadnieniem wprowadzenia dokładniejszych wzorów dla poszczególnych parametrów, wynikających z potrzeby uwzględnienia logarytmu normalnego rozkładu wartości tej wielkości fizycznej dla licznych badanych kolekcji różnych skał. Obecnie w powszechnym użyciu są wzory od (2) do (5), co ułatwia porównywanie wyników uzyskiwanych przez różnych autorów i jest formą ich unifikacji.

### Pomiary anizotropii podatności magnetycznej

Pomiary AMS w Zespole Paleomagnetyzmu IGF PAN w Warszawie są wykonywane w obwodzie zrównoważonego mostka prądu zmiennego. Wprowadzenie próbki w przestrzeń cewki wytwarzającej słabe pole magnetyczne o znanej częstotliwości zaburza równowagę mostka, gdyż zmienia się wartość pola magnetycznego wywołana namagnesowaniem owej próbki. Układ elektroniczny mostka doprowadza przyrząd ponownie do równowagi, określając wartość namagnesowania próbki zależną od jej podatności magnetycznej. Aby uzyskać obraz anizotropii podatności magnetycznej próbki o określonej objętości i kształcie, należy powtórzyć pomiar w co najmniej sześciu, a w praktyce w kilkunastu położeniach próbki względem cewki. Liczba pomiarów dla jednej próbki waha się od 12 do 24 w zależności od typu zastosowanego przyrządu. Badaną kolekcję zmierzono mostkiem MFK1-FA „Agico” produkcji czeskiej, którym wykonuje się standardowo 15 pomiarów AMS, w 15 różnych położeniach próbki względem cewki magnesującej.

Wyliczenie tensora anizotropii podatności magnetycznej, osi głównych elipsoidy anizotropii podatności ( $k_{\max}$ ,  $k_{\min}$ ,  $k_{\text{int}}$ ) i ich orientacji w przestrzeni oraz wszystkich parametrów anizotropii dokonywane jest komputerowo w czasie rzeczywistym. Programy obliczeniowe umożliwiają przedstawienie wyników w formie graficznej oraz wykonanie analizy statystycznej uzyskanych rezultatów.

## Statystyczne opracowanie wyników

Aby wyznaczyć w wiarygodny sposób wyżej wymienione parametry anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku, należy posługiwać się zbiorem liczącym co najmniej 10 sztuk. Statystyczna analiza wyników pomiarów AMS prowadzi do wyznaczenia dla każdego stanowiska (odsłonięcia), dla  $N$  pobranych próbek:

- średnich wartości podatności magnetycznej ( $k_{sr}$ );
- średnich wartości parametrów AMS, takich jak  $P_{Jsr}$ ,  $L_{sr}$ ,  $F_{sr}$  i  $T_{sr}$ ;
- uśrednionych wartości kątów deklinacji  $D_{sr}$  (w przedziale  $0^\circ$ – $360^\circ$ ) i inklinacji  $I_{sr}$  (w przedziale  $0^\circ$ – $90^\circ$ ) dla każdej osi głównej elipsoidy AMS (Jelinek 1978). Pozwala to na obliczenie orientacji w przestrzeni osi głównych dla zbioru  $N$  próbek w profilu będących składowymi średniego tensora AMS wraz z podaniem wariancji i przedziałów ufności obliczenia średnich kątów  $D_{sr}$  i  $I_{sr}$  opisujących położenie osi ( $k_{max}$ ,  $k_{int}$ ,  $k_{min}$ ) $_{sr}$ .

W tym ujęciu przedział ufności wyliczenia położenia każdej osi głównej uśrednionej elipsoidy anizotropii podatności magnetycznej jest zobrazowany jako elipsa, której maksymalny i minimalny promień oraz położenie na sferze jest potrzebne do zdefiniowania jej pola (rys. 1). Wyniki dotyczące położenia kierunków osi głównych elipsoidy anizotropii podatności poszczególnych próbek z każdego odsłonięcia wraz z położeniem ich średniego kierunku dla każdej osi głównej uśrednionej elipsoidy AMS prezentowane są graficznie w projekcji stereograficznej, biegunowej (projekcja równopolowa – *equal-area projection*), co oznacza, że wartość kąta inklinacji  $I = ca\ 90^\circ$  zaznaczona jest w środku projekcji, a obwód oznacza płaszczyznę poziomą. Zwyczajowo kierunki osi maksymalnych wartości podatności  $k_{max}$  są wykreślane na stereogramie jako kwadraciki, osi wartości pośrednich podatności magnetycznej  $k_{int}$  jako trójkąciki a osi minimalnych wartości podatności magnetycznej  $k_{min}$  jako kółeczka.

### Przesłanki wnioskowania

Przesłanki wnioskowania o powiązaniu kierunków transportu wodnego plejstoceniowego materiału osadowego z wynikami pomiarów anizotropii podatności magnetycznej oparto na licznych pracach (m.in. Iverson i in. 2008;

Shumway, Iverson 2009), w których stwierdzono występowanie następujących zależności:

- średni kierunek ( $D$ ,  $I$ ) $_{sr}$  położenia osi maksymalnej tensora podatności magnetycznej  $k_{max\ sr}$  wyliczony dla kolekcji  $N$  próbek z danego odsłonięcia skał osadowych często pokrywa się ze średnim kierunkiem transportu. W efekcie obecne w wodnej zawieszynie nawet bardzo drobne cząstki ferro-, para- i diamagnetyków o wydłużonym kształcie mają tendencję do ustawiania się zgodnie z dominującym, średnim kierunkiem przepływu wody tuż przy dnie. To, na ile dokładnie można tą metodą wnioskować o kierunku transportu osadzającego się materiału zależy między innymi od średniej prędkości wód transportujących zawieszinę oraz od kąta nachylenia powierzchni, na której akumulowany jest osad oraz od stopnia anizotropii podatności magnetycznej przenoszonych cząstek;
- w niektórych badaniach AMS skał osadowych obserwowano korelację osi wartości pośrednich  $k_{int}$  z kierunkiem transportu (patrz: Tarling, Hroudá 1993, str. 99). Średni kierunek osi pośredniej wartości podatności magnetycznej  $k_{int\ sr}$  może być zgodny z kierunkiem transportu osadzającej się zawiesziny osadów. Ma to mieć miejsce np. w osadach piaszczystych lub mułkowych i może wiązać się z efektem toczenia się ziaren osadu po powierzchni o niewielkim nachyleniu;
- odchylenie średniego kierunku ( $D$ ,  $I$ ) $_{sr}$  położenia osi minimalnej wartości średniej podatności magnetycznej ( $k_{min}$ ) $_{sr}$  od pionu może być miarą upadu warstw podczas depozycji materiału lub postsedymencyjnych deformacji. Niekiedy kierunki oznaczające położenia osi  $k_{min}$  na stereogramie są rozwleczone i układają się na kole wielkim, co ma miejsce dla elipsoid anizotropii podatności magnetycznej o silnie wydłużonym kształcie.

Należy podkreślić, że pomiar tensora anizotropii magnetycznej umożliwia jedynie wyznaczenie kierunku położenia osi głównych elipsoidy AMS w przestrzeni, natomiast nie dają możliwości określenia zwrotu owych kierunków. Wskazanie zwrotu może nastąpić na podstawie pomiarów biegu i upadu warstw w terenie, a informacje wynikające z uzyskanych wyników pomiarów AMS, np. odchylenie położenia średniego kierun-

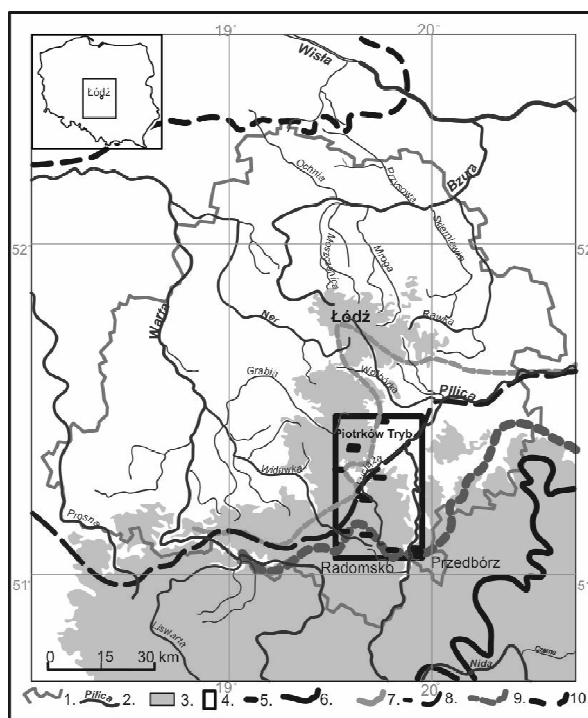
ku osi minimalnej wartości podatności magnetycznej ( $k_{\min}$ )<sub>sr</sub> od pionu ( $I < 90^\circ$ ) są tylko dodatkową przesłanką wzmacniającą (lub negującą) tok

wnioskowania o przebiegu i rozkładzie paleoprądów transportu wodnego na danym obszarze.

## TEREN I POSTĘPOWANIE BADAWCZE

Badania anizotropii podatności magnetycznej (AMS) wykonano w obszarze położonym między Piotrkowem Trybunalskim, Radomskiem a Przedbórzem, w południowo-wschodniej części regionu łódzkiego (rys. 2). Ich wstępne wyniki były już kilkakrotnie anonsowane w literaturze (Wachecka-Kotkowska, Król 2011; Wachec-

ka-Kotkowska i in. 2012; Wachecka-Kotkowska 2015a). Celem niniejszego artykułu jest prezentacja metody wykorzystanej po raz pierwszy w badaniach paleogeograficznych regionu łódzkiego i ocena jej przydatności do wyznaczania kierunków bezpośredniego i pośredniego transportu glacialnego.



Rys. 2. Położenie terenu badań w regionie łódzkim na tle wybranych poglądów na zasięg lądolodu warty (por. załącznik na końcu tomu)

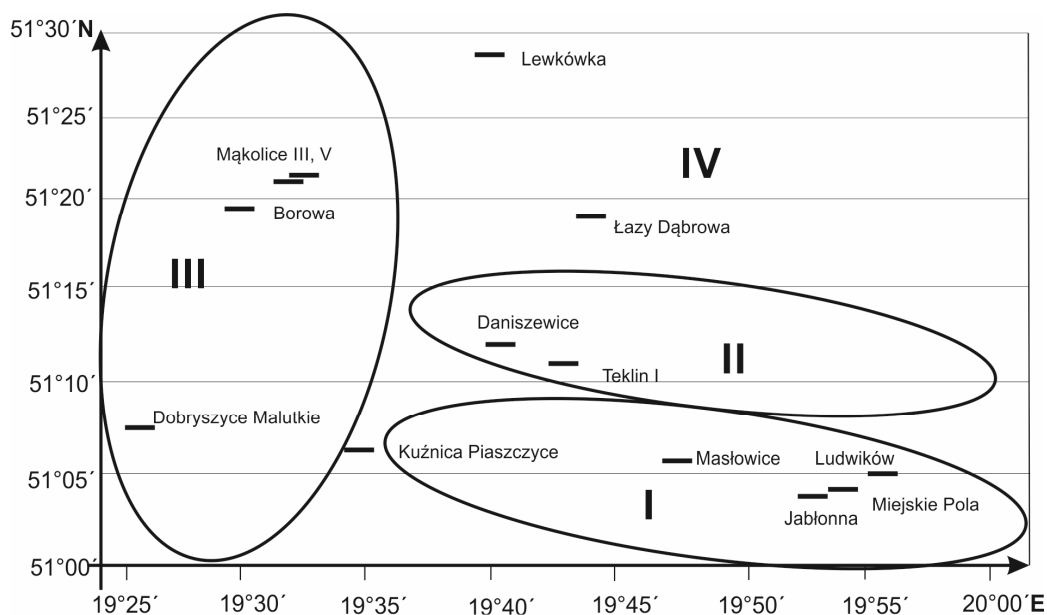
1 – granice województwa; 2 – rzeki; 3 – obszar powyżej 200 m n.p.m.; 4 – obszar badań; 5 – rozmieszczenie analizowanych próbek; zasięgi zlodowaceń: 6 – maksymalny odry według Różyckiego (1972), 7 – stadia warty według Różyckiego (1972), 8 – zlodowacenia warty według Marksa i in. (2006), 9 – stadia warty według Turkowskiej (2006); 10 – zlodowacenia wisły według Roman (2012)

Location of investigated area in the Łódź region against selected views of limit of the Wartanian ice-sheet (compare Annex)

1 – voivodship borders; 2 – rivers; 3 – area over 200 m a.s.l.; 4 – study area; 5 – sample sites; limit of glaciation: 6 – Odranian maximum according to Różycki (1972), 7 – Wartanian stage according to Różycki (1972), 8 – Wartanian glaciation according to Marks *et al.* (2006), 9 – Wartanian stadial according to Turkowska (2006); 10. – LGM according to Roman (2012)

Do badań AMS pobrano 206 próbek w 13 stanowiskach położonych w strefach I–IV wyróżnionych w badanym terenie (rys. 3, tab. 1). Pobór próbek osadów do pomiarów anizotropii podatności magnetycznej wymagał dużej staranności ze względu na konieczność zarejestrowania ich orientacji w przestrzeni. Mało związane

osady czwartorzędowe (np. syplkie piaski i mułki) do analiz i pomiarów laboratoryjnych pobierano do pudełeczek z pleksiglasu o objętości 8 cm<sup>3</sup>, które przetransportowano do laboratorium Instytutu Geofizyki PAN w celu wykonania pomiarów AMS opisaną wcześniej metodą.



Rys. 3. Położenie stanowisk w strefach glacygenicznych I-IV (por. załącznik do tomu)

Sites location in glacial zones I-IV (compare Annex)

Tabela 1

Lokalizacja stanowisk badawczych  
Study area with sampling sites

Stanowisko	Geomorfologia	Lokalizacja		
		wysokość [m n.p.m.]	$\lambda$ [E]	$\phi$ [N]
<b>STREFA I - WZGÓRZA RADOMSZCZAŃSKIE i GRZBIET PRZEDBORSKI</b>				
Kuźnica Piaszczyce	poziom odpływu marginalnego	226,3	19° 33' 51''	51° 07' 24''
Masłowice PGR	poligeniczny pagór glacialny	230,0	19° 47' 56''	51° 06' 24''
Ludwików	poligeniczny pagór glacialny	222,5	19° 55' 06''	51° 05' 45''
Miejskie Pola	ostaniec terasy kemowej	229,0	19° 54' 56''	51° 04' 49''
Jabłonna	sandr dolinny	213,1	19° 53' 26''	51° 04' 36''
<b>STREFA II - WZGÓRZA DOBRYSZYCKIE</b>				
Daniszewice	poligeniczny wał glacialny	220,4	19° 37' 46''	51° 13' 29''
Teklin II	ten sam wał glacialny	233,0	19° 41' 52''	51° 12' 49''
<b>STREFA III - WYSOCZYŻNA BĘŁCHATOWSKA</b>				
Dobryszycze Malutkie	poligeniczne wzgórze glacialne	237,6	19° 25' 54''	51° 07' 19''
Kamieńsk	morena martwego lodu	232,0	19° 29' 54''	51° 10' 58''
Borowa III, Moników	wzgórze kemowe	221,0	19° 30' 16''	51° 19' 45''
Mąkolice V	poligeniczny pagór glacialny	233,4	19° 30' 52''	51° 22' 49''
Mąkolice III	ten sam pagór glacialny	230,0	19° 31' 06''	51° 23' 18''
<b>STREFA IV - RÓWNIANA PIOTRKOWSKA</b>				
Łazy Dąbrowa	poziom odpływu marginalnego	185,1	19° 43' 25''	51° 19' 14''
Lewkówka III	sandr Karlina	212,8	19° 38' 43''	51° 28' 59''

Zbiorcze opracowane statystycznie głównych wyników pomiarów AMS przedstawiono w tabeli 2. Ich omówienie, zilustrowane graficzną i nume-

ryczną prezentacją wyników z kolejnych stanowisk, przedstawiono w następnym rozdziale.

Tabela 2

Wyniki badań anizotropii podatności magnetycznej osadów w stanowiskach  
AMS results for the sediments investigated in the sites

L.p.	Stanowisko	Rodzaj osadu	Liczba próbek	Średnia podatność magnet.	Lineacja	Foliacja	Stopień anizotropii podatności magnet.	Parametr kształtu elipsoidy a.p.m.	Średnie kierunki głównych osi elipsoidy anizotropii podatności magnetycznej:					
									dla $k_{max}$		dla $k_{int}$		dla $k_{min}$	
			N	$k_{sr}$ [ $\times 10^{-6}$ SI]	L	F	$P_j$	T	D $_{int}^o$	I $_{int}^o$	D $_{max}^o$	I $_{max}^o$	D $_{min}^o$	I $_{min}^o$
1.	Kuznica Piaszczyce	piaski	7	113,25	1,006	1,011	1,017	0,299	203,4	11,2	107,3	27,8	313,2	59,6
2.	Mastowice	glina	10	220,8	1,023	1,02	1,044	-0,083	330,7	10,2	237,4	17,8	89,1	69,4
3.	Ludwików	piaski różnoziarniste	4	145,84	1,026	1,031	1,058	0,068	6,4	16,2	97,9	5,2	205,3	73,0
4.	Miejskie Pola	piaski mułkowate	13	156,85	1,008	1,09	1,11	0,834	296,8	5,7	26,5	2,4	319,0	83,9
5.	Jabłonna	glina	8	204,52	1,007	1,02	1,031	0,412	122,3	8,9	29,5	17,1	238,6	70,6
6.	Daniszewice	mułki piaszczyste	30	134,39	1,003	1,048	1,058	0,864	196,8	12,3	291,1	10,0	239,1	74,0
7.	Teklin	mułki piaszczyste	14	34,97	1,008	1,008	1,015	0,004	246,6	9,2	152,2	14,4	188,1	72,8
8.	Mąkolice III	glina zwalowa	10	207,27	1,026	1,016	1,044	-0,235	250,9	5,4	159,8	11,7	185,4	77,1
9.	Mąkolice V	mułki + gleba kopalna	9	60,15	1,018	1,015	1,034	-0,087	341,0	33,5	220,2	37,8	278,0	34,5
10.	Dobryszycie Malutkie	mułki piaszczyste.	19	158,15	1,009	1,05	1,064	0,687	310,2	11,5	41,2	7,0	162,5	78,9
11.	Borowa Góra	mułki piaszczyste	30	187,25	1,01	1,054	1,059	0,685	305,3	14,7	210,4	17,9	252,4	77,1
12.	Lewkowska	piaski drobne	10	159,7	1,038	1,078	1,121	0,342	283,2	26,6	193,6	2,0	280,3	63,4
13.	Łazy Dąbrowa	piaski /mułki z poziomu ekstraglacialnego	23	105,45	1,017	1,039	1,059	0,381	155,5	17,1	62,7	8,7	306,8	70,7

## WYNIKI I INTERPRETACJA BADAŃ

Przegląd pomierzonych wartości średnich podatności magnetycznych obliczonych dla poszczególnych stanowisk poboru próbek, w których występują zróżnicowane rodzaje skał czwartorzędowych wskazał, że mamy do czynienia z typowymi wartościami podatności magnetycznej, charakterystycznymi dla tego rodzaju osadów.

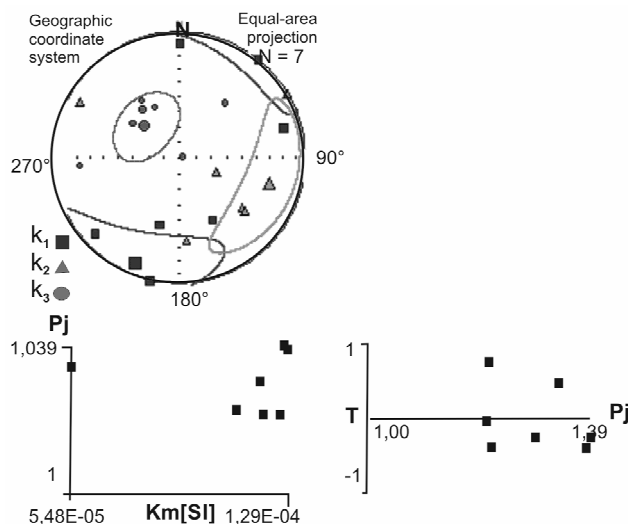
## Strefa I – Wzgórza Radomszczańskie

Stanowisko Kuźnica Piaszczyce

Z osadów piaszczystych zachowanego fragmentarycznie najwyższego poziomu tzw. pradoliny Widawki pobrano 7 próbek. Wyniki AMS (rys. 4, tab. 2) pokazały bardzo niską wartość średniego stopnia anizotropii podatności magnetycznej  $P_j = 1,017$  oraz małą wartość uśrednionego parametru kształtu elipsoidy  $T = 0,3$  tej małej grupy ( $N = 7$ ) osadów piaszczystych. Z powodu dużego rozrzutu położenia poszczególnych osi wszystkich trzech wartości  $(k_{\max}, k_{\text{int}}, k_{\min})_i, i = 1, \dots, N$ , – wyznaczony średni kierunek osi maksymalnej wartości podatności

magnetycznej  $k_{\max}$  o deklinacji:  $203^\circ$  trudno jest porównywać ze średnim biegiem równym  $340^\circ$  warstw piasku, wyliczonym z wielu pomiarów biegu i upadu lamin w tym stanowisku. Linia biegu warstw piasku  $160^\circ\text{--}340^\circ$  przebiega bliżej średniego położenia osi pośrednich wartości  $k_{\text{int}}$  ( $D=107^\circ$ ), co jest zrozumiałe z powodu struktury tego osadu, zawierającego minerały magnetyczne i paramagnetyczne głównie w postaci cienkich warstewek na ziarnach kwarcu.

Skupienie położenia osi minimalnej wartości podatności  $k_{\min}$  ma niski kąt inklinacji (tylko około  $60^\circ$ ), co może świadczyć o tym, że osadzenie się badanych warstw piasku w odsłonięciu Kuźnica mogło przebiegać na powierzchni o nachyleniu dna *ca*  $30^\circ$  w kierunku SSE. Jest to zrozumiałe, gdyż powierzchnia, gdzie dochodziło do depozycji osadu położona jest na północnym skłonie wyżyn Polski. Pobranie większej liczby próbek do pomiaru AMS w tej lokalizacji mogłoby polepszyć dokładność i jakość wyników.



Rys. 4. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Kuźnica Piaszczyce

Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Kuźnica Piaszczyce site

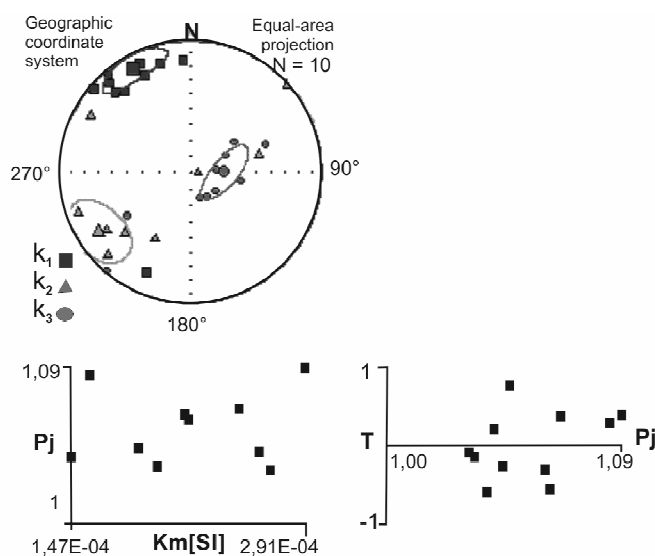


### Stanowisko Masłowice

Zbadano 10 próbek gliny pobranej z morenowego wzgórza akumulacyjnego (rys. 5, tab. 2). Średnia podatność magnetyczna próbek pobranych w tym stanowisku jest wysoka ( $221 \times 10^{-6}$  SI), co jest wartością typową dla glin, w których składzie zazwyczaj występuje kilka procent magnetycznych tlenków żelaza. Średni stopień anizotropii podatności magnetycznej ( $P_{Jsr} = 1,044$ ), odzwierciedla anizotropię nieco wyższą niż 4%. Zbliżone do siebie wartości lineacji (L) i foliacji (F) oraz mała ujemna wartość parametru kształtu T świadczą o regularnym, nieco tylko wydłużonym kształcie elipsoidy. Na stereogramie widać, że położenia trzech głównych osi elipsoid anizo-

tropii podatności magnetycznej ( $N = 10$ ) tworzą trzy oddzielne grupy z zaznaczonymi przedziałami ufności w formie elips o małych promieniach.

Położenie średniego kierunku osi głównej  $k_{max}$  o deklinacji  $331^\circ$  prawie pokrywa się ze zmierzonym średnim biegiem w tym stanowisku ( $345^\circ$ ) i przemawia za tym, że transport osadów gliny w tym morenowym pagórku przebiegał z północnego zachodu na południowy wschód. Akumulacja glin pomiędzy Bąkową Górą a Górą Chełmo mogła przebiegać na nachylonym podłożu, gdyż kąt inklinacji średniego położenia osi minimalnej  $k_{min}$  wynosi  $69^\circ$ , czyli jest o  $20^\circ$  odchylony od pionu na SE.



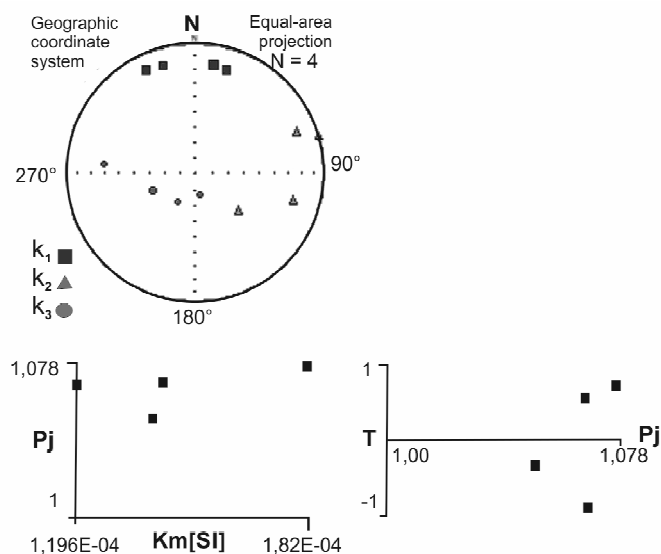
Rys. 5. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Masłowice

Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Masłowice site

### Stanowisko Ludwików

W stanowisku tym występują sypkie, różnoziarniste piaski, z których pobrano i zmierzono AMS tylko dla 4 próbek z *ca* 2,5 m głębokości (rys. 6, tab. 2). Dla próbek odnotowano średnią podatność magnetyczną  $k_{sr} = 146 \times 10^{-6}$  SI, która nie odbiega od tej dla utworów piaszczystych lub piaszczysto-mułkowych w innych stanowiskach. Także wartość parametru anizotropii podatności magnetycznej ( $P_{Jsr} = 1,058$ ) tych kilku próbek jest podobna do parametru  $P_{Jsr}$  na innych odsłonięciach zbudowanych z piasków i mułków. Zbyt mała liczba pobranych próbek ze stanowiska ( $N = 4$ ) nie pozwoliła przeprowadzić analizy statystycznej otrzymanych kierunków osi głównych elipsoid AMS.

Na podstawie czterech próbek ze stereogramu wynika, że położenie osi  $k_{max}$  ( $D = 6,4^\circ$ ,  $I = 16,2^\circ$ ) jest zbliżone do kierunku północy (N), zatem jeśli uwzględnić, że zmierzone biegi i upady warstw piasku leżą w pierwszej ćwiartce stereogramu ( $45^\circ/18^\circ$ ), to można zakładać, że kierunek transportu wodnego piasków w tym miejscu był zgodny z kierunkiem osi  $k_{max}$ . Do tego wniosku skłania też, że w zmierzonych kilku próbkach  $L < F$ . Wyznaczony parametr kształtu elipsoidy podatności magnetycznej T ma bardzo małą, dodatnią wartość (0,068), co wskazuje tylko na lekkie spłaszczenie obliczonej średniej elipsoidy anizotropii podatności magnetycznej. Brak statystycznie istotnej liczby próbek z tego stanowiska ogranicza wiarygodność parametru T.



Rys. 6. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Ludwików

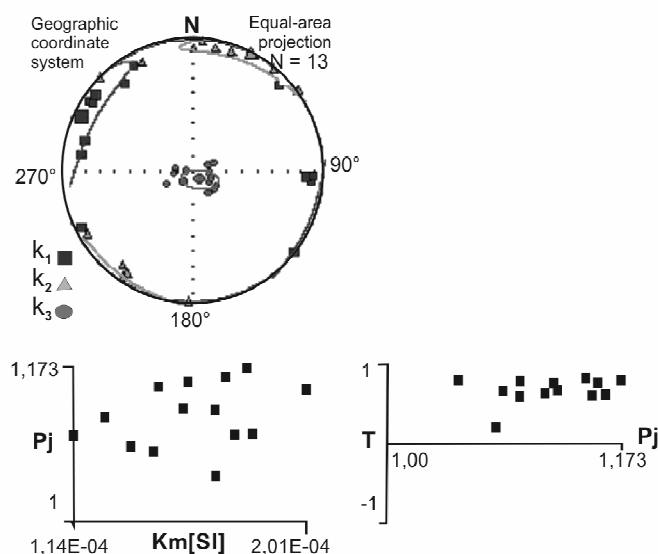
Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Ludwików site

### Stanowisko Miejskie Pola

Pobrano i zmierzono 13 próbek piasków mułkowatych budujących pagór ostańcowy kemu/terasy kemowej (rys. 7, tab. 2). Parametr lineacji AMS jest daleko mniejszy od foliacji ( $1,008 < 1,09$ ). Średnia elipsoida AMS ma mocno spłaszczony kształt ( $T_{sr} = 0,834$ ) a wartość parametru stopnia anizotropii ( $P_{Jsr} = 1,11$ ) należy do najwyższych wśród wszystkich przebadanych osadów.

Na stereogramie zwraca uwagę bardzo dobre zgrupowanie osi minimalnych wartości podatności magnetycznej  $k_{min}$  w centrum siatki stereograficznej, z wysoką wartością ich średniej inklinacji  $I = 83^\circ$ , co świadczy o prawie pozi-

mym zaleganiu warstw tych piaszczysto-mułkowych utworów. Kierunki osi maksymalnej i pośredniej podatności poszczególnych próbek tworzą opaskę w odległości  $90^\circ$  od kierunków podatności minimalnej, na obwodzie stereogramu. Jest to rozkład położenia osi głównych charakterystyczny dla elipsoidy średniej o spłaszczonym kształcie. Średnie położenie osi maksymalnej podatności magnetycznej  $k_{max}$  o deklinacji  $D = 297^\circ$  i  $I = 6^\circ$  jest bliskie zmierzonym kątom biegu i upadu piasków ( $320^\circ/18^\circ$ ). Można przyjąć, że kierunek dany kątami  $D: 297^\circ-117^\circ$  może opisywać średni kierunek transportu wodnego tych osadów, z rozrzutem około  $30^\circ$ .



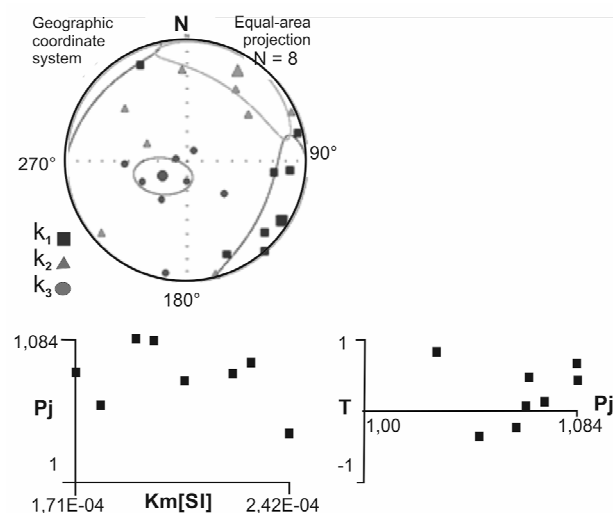
Rys. 7. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Miejskie Pola

Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Miejskie Pola site

### Stanowisko Jabłonna

Z warstwy gliny pobrano 8 próbek o wysokiej wartości średniej podatności magnetycznej ( $208 \times 10^{-6}$  SI) (rys. 8, tab. 2). Średni stopień anizotropii podatności magnetycznej  $P_j$  wynosi 1,031. W próbkach tych foliacja (F) jest wyższa niż lineacja (L), zaś średnia elipsoida AMS ma umiarkowanie spłaszczonego kształtu ze współczynnikiem kształtu  $T = 0,412$ .

Na stereogramie osie minimalnych wartości podatności magnetycznej są zgrupowane wokół średniego położenia o inklinacji  $70^\circ$ , co może oznaczać, że badany pakiet gliny został osadzony na zboczu Grzbietu Przedborskiego o nachyleniu  $20^\circ$ , w kierunku o deklinacji około  $240^\circ$ . Ten wynik nie przeczy pomiarom kierunkowym laminy piaszczystych w odkrywce ( $248^\circ/25^\circ$ ).



Podobnie jak w stanowisku Miejskie Pola, rozkład położenia trzech osi głównych elipsoidy AMS tzn.  $(k_{max}, k_{int}, k_{min})_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  jest typowy dla elipsoidy anizotropii podatności o spłaszczonym kształcie. Na podstawie przeprowadzonej numerycznej i graficznej analizy otrzymanych wyników można przyjąć, że kierunek paleotransportu osadu można wiązać z kierunkiem danym przez średnią deklinację  $D = 30^\circ$  położenia osi głównej pośredniej wartości podatności magnetycznej  $k_{int}$ . Trzeba dodać, że z uwagi na to, że stopień anizotropii podatności magnetycznej badanej gliny z Jabłonna nie jest wysoki, oznaczone średnie położenia osi głównych mają większe przedziały ufnosci, niż np. przedziały ufnosci dla próbek ze stanowisk Maśłowice i Miejskie Pole.

Rys. 8. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Jabłonna

Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Jabłonna site

### Strefa II – Wzgórza Dobryszkie

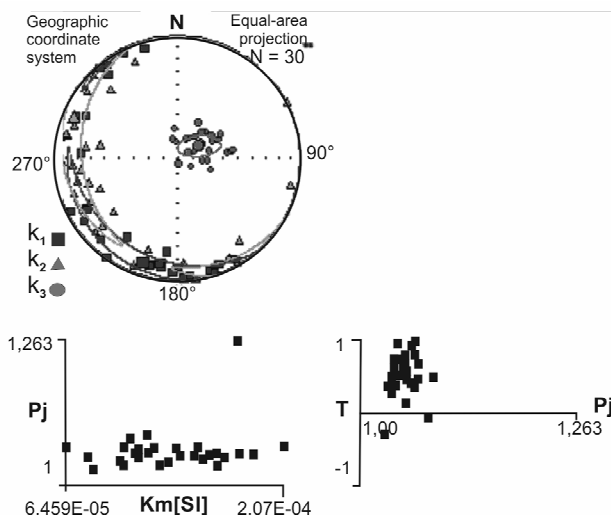
#### Stanowisko Daniszewice

Zbadano zbiór 30 próbek piaszczystych mułków wypełniających obniżenie w partii szczytowej pagóra zbudowanego z warciańskiej gliny morenowej (rys. 9, tab. 2). Ich średnia podatność magnetyczna ( $143 \times 10^{-6}$  SI) jest podobna do podatności magnetycznej piasków z Ludwikowa. Mułki piaszczyste z Daniszewic mają też taki sam średni stopień anizotropii podatności magnetycznej  $P_j = 1,058$ .

Foliacja (F) znacznie przeważa nad lineacją (L), a parametr kształtu średniej podatności magnetycznej  $T = 0,864$  ma najwyższą wartość wśród wszystkich stanowisk i świadczy o silnym spłaszczeniu średniej elipsoidy AMS wyznaczonej dla tych osadów. Także obraz trzech skupień położenia osi głównych  $(k_{max}, k_{int}, k_{min})_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$

$N$  jest typowy dla spłaszczonej elipsoidy. Kąt średniej inklinacji upadu osi  $k_{min}$  wynosi  $74^\circ$ , z dobrym przedziałem ufnosci. Oznacza to, że te mułki osadziły się na dnie odchylonym od płaszczyzny horyzontalnej o średnio  $16^\circ$  w kierunku SW–NE ( $D = 238^\circ$ ).

Porównanie pomierzonych na tym stanowisku średnich biegów (od  $25^\circ$  do  $30^\circ$ ) i średniego minimalnego upadu ( $2^\circ$ ) warstw mułków piaszczystych z wyznaczonym średnim położeniem osi maksymalnych wartości podatności magnetycznej  $k_{max}$  danym przez  $D = 197^\circ$  i inklinację  $I = 12^\circ$  pozwala wnioskować, że kierunek paleoprądów wodnych transportu tych osadów należy wiązać z kierunkiem osi maksymalnej podatności magnetycznej wyznaczonej elipsoidy AMS. Wyniki AMS potwierdziły hipotezę, że badane osady należą już do postglacjalnej jednostki osadowej (Wachecka-Kotkowska 2015a).



Rys. 9. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Daniszewice

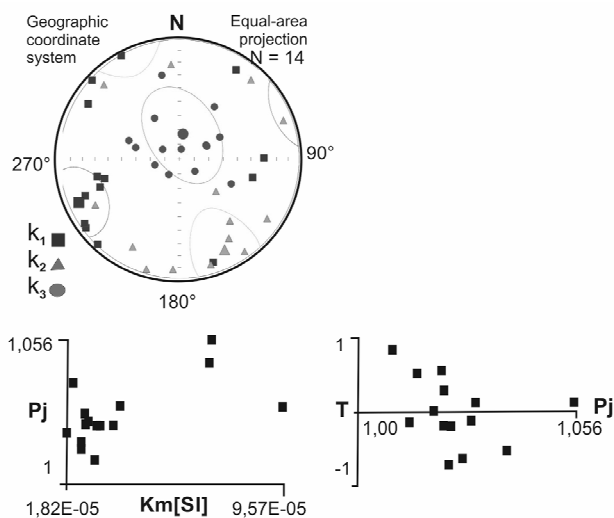
Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Daniszewice site

### Stanowisko Teklin II (nowa odkrywka)

Mułki piaszczyste z Teklina (rys. 10, tab. 2) mają najniższą wartość podatności magnetycznej z całego zbioru próbek badanych na omawianym obszarze. Charakteryzują się one minimalną wartością stopnia anizotropii podatności magnetycznej ( $P_j = 1,015$ ) oraz  $L = F$  o małej wartości 1,008, a także znikomą wartością parametru kształtu elipsoidy podatności ( $T = 1,004$ ), co oznacza brak istotnej anizotropii podatności magnetycznej. Zmierzone 14 próbek, z których tylko w dwóch wystąpiła wyraźna anizotropia podatności magnetycznej. Obraz położenia osi głównych elipsoidy anizotropii podatności magnetycznej jest typowy dla przypadku minimalnej anizotropii. Wyznaczone położenia osi głównych ( $k_{max}$ ,  $k_{int}$ ,  $k_{min}$ ),  $i = 1, 2, \dots, N$  tworzą wprawdzie trzy skupienia, lecz o bardzo dużych przedziałach ufności, co wraz z inklinacją  $I = 72^\circ$

średniego położenia osi minimalnej podatności wskazuje, że mamy do czynienia z akumulacją na powierzchni pochylonej średnio około  $17^\circ$  z N na S.

Średni bieg i upad określony na podstawie licznych pomiarów w Teklinie wynosi  $70^\circ(25-30^\circ)$ , co sugeruje, że położenie osi podatności maksymalnej  $k_{max}$  średniej elipsoidy AMS w stanowisku jest zbliżone do kierunku transportu materiału. Subhoryzontalny kierunek o deklinacji  $247^\circ$  i inklinacji około  $9^\circ$  wynikający z położenia osi głównej bardzo dobrze koresponduje z biegiem i upadem warstw mułów piaszczystych w granicach przedziałów ufności wyznaczenia tych niezależnych wielkości. Ze względu na niską wartość podatności magnetycznej w mułkach piaszczystych z Teklina trzeba podkreślić, że otrzymany rezultat zależy nie tyle od frakcji paramagnetyków, co od wydłużonego kształtu ziaren minerałów.



Rys. 10. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Teklin

Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Teklin site

Strefa III – Wysoczyzna Bełchatowska

Stanowisko Mąkolice III

W stanowisku Mąkolice III (rys. 11, tab. 2) do badań AMS pobrano próbki z gliny u podstawy pagóra, której pochodzenie związane jest ze zlodowaczeniem san 2 (Wachecka-Kotkowska i in. 2012; Czubla 2015, w tym tomie). Niewielkie rozmiary odsłonięcia nie pokazują jak zalega warstwa, a nawet czy przebadany osad nie pochodzi z porwaka.

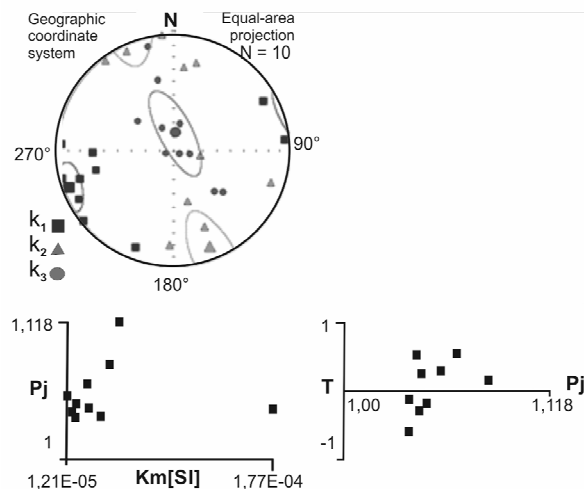
Dużą zawartość minerałów ferromagnetycznych w badanej glinie skutkuje jej wysoką średnią podatnością magnetyczną ( $k_{sr} = 207,25 \times 10^{-6}$  SI). Średni stopień anizotropii podatności magnetycznej  $P_j$  zbioru 10 pobranych próbek wynosi 1,044.

Odnotowano lekką przewagę lineacji magnetycznej ( $L = 1,026$ ) nad foliacją ( $F = 1,016$ ). Kształt elipsoidy AMS jest lekko wydłużony ( $T = -0,235$ ). Przytoczone cechy AMS są dobrze zilustrowane graficznie na stereogramie, typowym dla elipsoid o wydłużonym kształcie, w których położenie osi maksymalnej wartości podatności są dobrze zgrupowane, natomiast położenia osi pośrednich i minimalnych wartości podatności magnetycznej układają się w pasku, na kole wielkim w odległości  $90^\circ$  od położenia maksymalnych osi, których osie  $k_{max}$  są skupione wokół średniego kierunku:  $D_{sr} = 251^\circ$ ,  $I_{sr} = 5^\circ$ . Położenie średniego kierunku osi  $k_{int}$  elipsoidy AMS o  $D = 160^\circ$  i  $I = 12^\circ$  potwierdzono w pomiarach średniego biegu i upadu gładzików w glinie zwałowej (Wachecka-Kotkowska 2015b, w tym tomie). Można przypuszczać, że mamy tu do czynienia z przypadkiem anizotropii podatności magnetycznej zdominowanej przez obecność magnetytu w glinie ( $> 1\%$ ), co warunkuje powstanie elipsoidy i struktury osadu (*fabric*) typu wydłużonego, lecz o niskim stopniu anizotropii (Tarling,

Hrouda 1993; Wachecka-Kotkowska 2015b, w tym tomie).

Obraz położenia osi głównych w elipsoidzie podatności magnetycznej w próbkach gliny zwałowej ze stanowiska Mąkolice III można interpretować na dwa sposoby:

- kierunki pośredniej wartości podatności magnetycznej  $k_{int}$  są zgodne z kierunkiem transportu osadu, na co może wskazywać też imbrykacja widoczna w położeniach osi minimalnych wartości podatności magnetycznej  $k_{min}$ . Kierunek średni położenia tej osi elipsoidy anizotropii ma deklinację:  $D_{sr} = 5^\circ$  i inklinację  $I_{sr} = 77^\circ$ , ale kierunek wzdłuż którego „rozwleczone” są położenia poszczególnych wartości ( $k_{min}$ ) i są zgodne z kierunkiem około  $345^\circ$ , czyli bliskim średniemu kierunkowi  $340^\circ-160^\circ$  osi  $k_{int}$  elipsoidy anizotropii. Ta interpretacja nie uwzględnia możliwych, a nawet wysoce prawdopodobnych deformacji badanej gliny zwałowej;
- średni kierunek osi maksymalnej wartości podatności magnetycznej  $k_{max}$  elipsoidy anizotropii pierwotnie zgodny z kierunkiem transportu został zmieniony postsedymentacyjnie, na przykład glacitektonicznie. Efekt taki mógł wystąpić poprzez działanie pary sił działających prostopadle do pierwotnego kierunku transportu. Dla bardzo drobnych cząstek minerałów magnetycznych obecnych w glinie i odpowiedzialnych za anizotropię jej podatności magnetycznej działanie tych sił mogło być wystarczające do przekręcenia kierunku osi  $k_{max}$ , podczas gdy zmiana kierunku ustawienia gładzików w glinie mogła zajść na daleko mniejszą skalę.

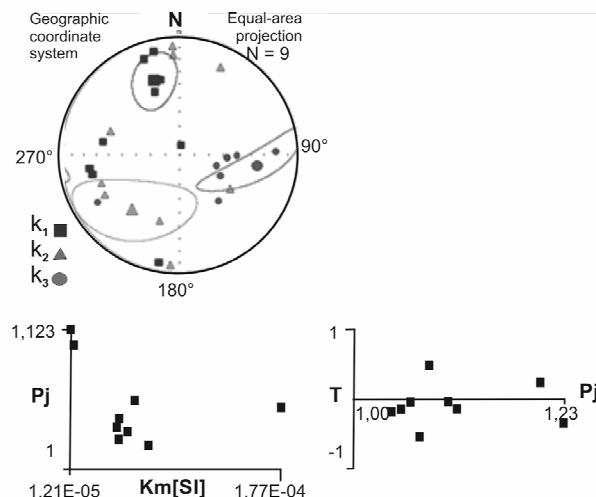


Rys. 11. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Mąkolice III

Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Mąkolice III site

### Stanowisko Mąkolice V

W stanowisku Mąkolice V (rys. 12, tab. 2) pobrano 9 próbek szarych mułów przykrytych późnovistuliańskimi piaskami eolicznymi. Te mułowe utwory charakteryzują się bardzo niskimi wartościami podatności magnetycznej, która wyniosła tylko  $60,15 \times 10^{-6}$  SI. Średnie wartości lineacji i foliacji są prawie sobie równe ( $L = 1,018$ ;  $F = 1,015$ ), a stopień anizotropii podatności magnetycznej  $(P_j)_{sr}$  wynosi zaledwie 1,034. Główne osie tej elipsoidy są określone z mocno rozrzuconych kierunków ( $k_{max}$ ,  $k_{int}$ ,  $k_{min}$ ) zmierzonych dla



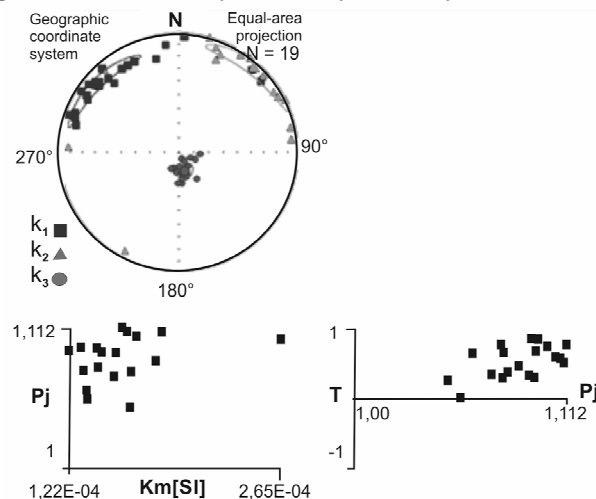
poszczególnych próbek. Ich zbiór ma wachlarzowo rozrzuconą foliację osi ( $k_{min}$ ) z inklinacją  $I_{sr} = 35^\circ$ . Dla kilku z nich kierunki położenia maksymalnych wartości podatności  $k_{max}$  grupują się wokół średniego kierunku  $D = 341^\circ$ ,  $I = 33^\circ$ , co może świadczyć o kierunku transportu piaszczystego osadu z północnego zachodu na południowy wschód. Bardzo niskie wartości podatności magnetycznej, jak i mała liczba próbek o anizotropii podatności  $> 2-3\%$  nie umożliwiła bardziej szczegółowego zbadania masywnych mułów.

Rys. 12. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Mąkolice V

Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Mąkolice V site

### Stanowisko Dobryczyce Malutkie

W Dobryzycach Malutkich (rys. 13, tab. 2) próbki piasków z mułkami o stosunkowo wysokiej średniej podatności magnetycznej ( $158 \times 10^{-6}$  SI) mają wysoki stopień anizotropii podatności  $(P_j)_{sr} = 1,064$ , a lineacja  $L$  jest w nich o wiele mniejsza od foliacji  $F$  ( $1,009 < 1,05$ ). Współczynnik kształtu spłaszczonej elipsoidy AMS, obliczony dla 19 zmierzonych próbek, jest wysoki ( $T = 0,687$ ). Tak jak i w poprzednich próbkach, w których mamy do czynienia ze



spłaszczoną elipsoidą AMS, położenia osi głównych ( $k_{min}$ ) tworzą wyraźne skupienie blisko środka stereogramu z inklinacją  $I = 77^\circ$  o małym przedziale ufności, zaś kierunki osi ( $k_{max}$ ,  $k_{int}$ ) grupują się na obwodzie siatki stereograficznej. Jeśli wziąć pod uwagę pomiary biegów i upadów wykonane w terenie, których uśredniony wynik to  $220^\circ/2^\circ$  należy wnioskować, że kierunek transportu wodnego powinien być zbliżony do średniego kierunku osi głównej  $k_{int}$  elipsoidy AMS o deklinacji  $D = 42^\circ$  i inklinacji  $I = 7^\circ$ .

Rys. 13. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Dobryczyce Malutkie

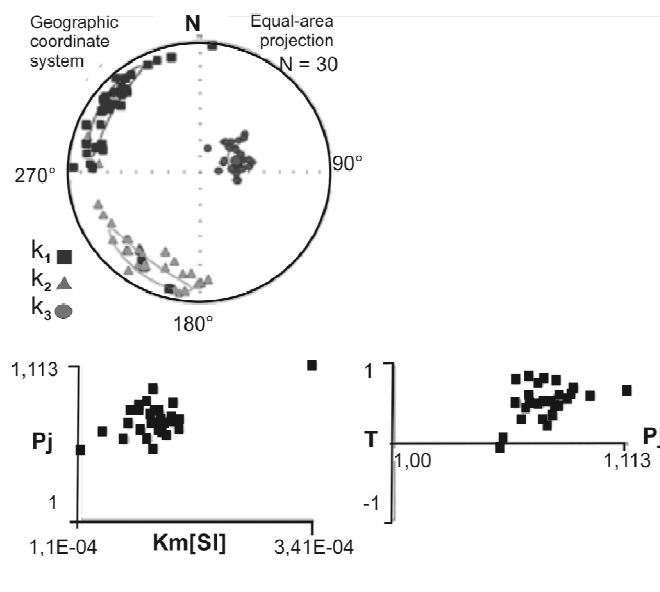
Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Dobryczyce Malutkie site

### Stanowisko Borowa Góra

W stanowisku Borowa Góra (rys. 14, tab. 2) pobrano 30 próbek rytmicznie warstwowanych mułków piaszczystych. Stosunkowo wysoka średnia podatność magnetyczna ( $187 \times 10^{-6}$  SI), wysoki stopień anizotropii podatności magnetycznej ( $P_{Jsr} = 1,059$ ) oraz spłaszczony kształt elipsoidy AMS ( $T = 0,685$ ) spowodowany przewagą foliacją ( $F = 1,054$ ) nad lineacją ( $L = 1,01$ ) są podobne do rezultatów uzyskanych w Dobryszycach Malutkich.

Ponownie rozkład położenia trzech osi głównych ( $k_{max}$ ,  $k_{int}$ ,  $k_{min}$ )<sub>i</sub> na stereogramie jest typowy

dla spłaszczonej elipsoidy AMS. Z powodu struktury tego osadu złożonego z drobnych cząstek para- i diamagnetyków o regularnych kształtach kulistych, z wkładem ferromagnetyków, zapewne w postaci cienkich warstewek na ziarnach piasku, należy wnioskować, że w tych osadach kierunek paleotransportu wodnego powinien być skorelowany z kierunkiem wynikającym z położenia osi pośredniej wartości podatności magnetycznej ( $k_{int}$ )<sub>sr</sub> danym przez  $D = 210^\circ$  i  $I = 18^\circ$ . Pomierzony średni bieg i upad tych warstwowanych mułków jest zgodny z taką interpretacją.



Rys. 14. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Borowa III

Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Borowa III site

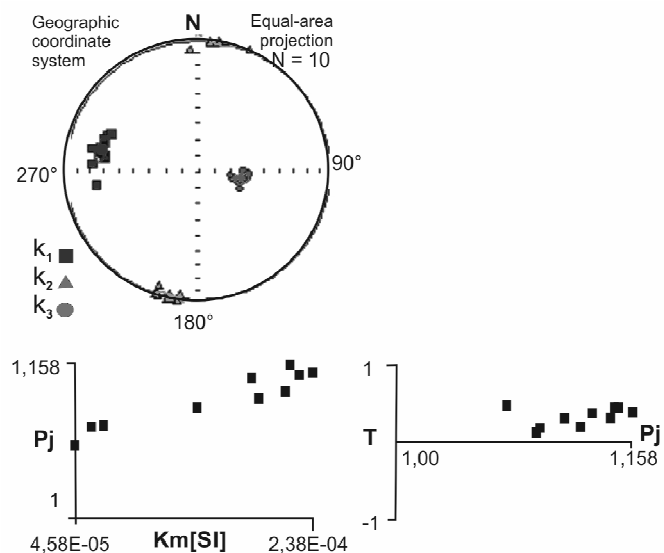
### Strefa IV – Równina Piotrkowska

#### Stanowisko Lewkówka

W Lewkówe, z piasków drobnoziarnistych budujących kopalny sandr Karlina (rys. 15, tab. 2) pobrano 10 próbek, w których średni stopień anizotropii podatności magnetycznej  $P_{Jsr}$  wynosi aż 1,121. Taki wysoki stopień anizotropii wpłynął na bardzo dobre skupienie trzech grup położenia osi głównych średniej elipsoidy AMS tym bardziej, że w badanych piaskach odnotowano większe niż w innych odsłonięciach parametry lineacji ( $L = 1,038$ ) i foliacji ( $F = 1,078$ ). Para-

metr kształtu ( $T = 0,342$ ) wskazuje na umiarkowane spłaszczenie elipsoidy AMS.

Dla tego odsłonięcia pomiary biegu i upadu dały średni wynik  $340^\circ/1^\circ$ . Wraz z analizą numerycznego i graficznego przedstawienia położenia trzech osi głównych elipsoidy AMS skłania do wniosku, że prawdopodobne kierunki transportu materiału osadowego są tu także (jak i w innych osadach piaszczysto-mułkowych z tego obszaru) skorelowane z położeniem osi pośrednich wartości podatności magnetycznej  $k_{int}$  o kierunku danym przez  $D = 193^\circ$  oraz  $I = 2^\circ$ .



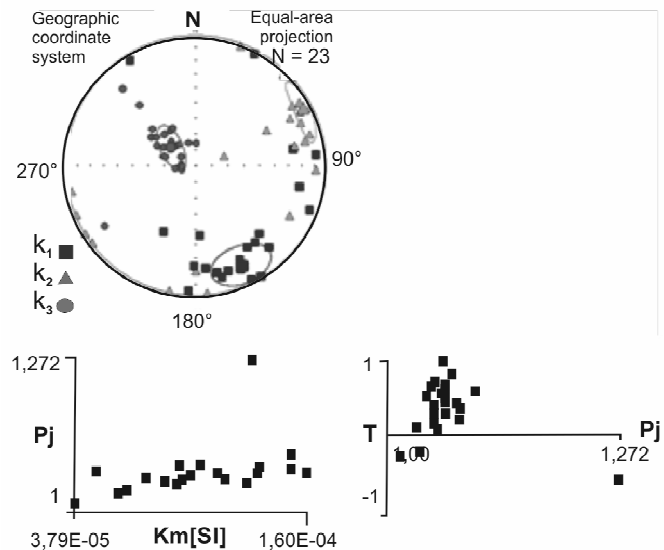
Rys. 15. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Lewkówka III

Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Lewkówka III site

### Stanowisko Łazy Dąbrowa

W dolinie dolnej Łuciąży ze stanowiska w Łazach Dąbrowie (rys. 16, tab. 2), zbadano 23 próbki piasków oraz mułków budujących III poziom dolinny (warciański). Osady charakteryzują się stosunkowo niską średnią podatnością

magnetycznej, nieco przekraczającej wartość  $105 \times 10^{-6}$  SI. W tych utworach foliacja ( $F = 1,039$ ) jest wyższa od lineacji ( $L = 1,017$ ) a stopień anizotropii podatności ( $P_j$ )<sub>sr</sub> wynosi 1,059. Elipsoida AMS ma umiarkowanie spłaszczony kształt ( $T = 0,381$ ).



Rys. 16. Graficzne i numeryczne podsumowanie wyników pomiaru anizotropii podatności magnetycznej próbek pobranych w stanowisku Łazy Dąbrowa

Graphical and numerical summarizing of results of AMS measurements for specimens taken at the Łazy Dąbrowa site

Na stereogramie ponownie rysuje się typowy rozkład osi głównych spłaszczonej elipsoidy AMS. W tym przypadku jednak przedziały ufności położenia średnich kierunków osi  $k_{max}$  i  $k_{int}$  są duże, zaś położenia osi głównych  $k_{min}$ , prócz skupienia, mają cechy imbrakacji (w IV ćwiartce stereogramu).

Kierunek transportu wodnego prowadzący do akumulacji badanego osadu określa  $k_{int}$ , którego wartość wynosi  $D = 63^\circ$ ;  $I = 9^\circ$ . Jest to więc kierunek zgodny z przebiegiem kopalnej doliny Włodzimierzowa (obecna dolina dolnej Łuciąży).



## WNIOSKI

1. Potwierdzono możliwość stosowania metody pomiaru anizotropii podatności magnetycznej do wyznaczenia kierunków paleoprądów w osadach plejstoceniowych, w których stwierdzona anizotropia podatności magnetycznej jest związana z podatnością frakcji paramagnetycznej osadu; uwaga dotyczy także osadów piaszczystych, o bardzo małej wartości podatności magnetycznej.

2. Zadowalające wyniki uzyskuje się dla parametru opisującego stopień anizotropii podatności magnetycznej  $P_j$  równy co najmniej 1,003, pod warunkiem badania w danym stanowisku dostatecznej, z punktu widzenia statystycznego, liczby próbek.

3. W osadach niewarstwowych, na przykład w glinach, AMS umożliwia analizę kierunku transportu klastów przed ich złożeniem. W osadach warstwowych metoda ma charakter komplementarny: może weryfikować i uzupełniać wyniki, ale może także zastępować inne badania kierunkowe, na przykład pomiarów biegów i upadów lamin. Analiza AMS szczególnie zalecana jest w badaniach pilotażowych.

4. Interpretacja średnich kierunków transportu osadów uzyskanych metodą AMS w poszczególnych stanowiskach badawczych może być bardzo pomocna jako uzupełnienie wiedzy ogólnej o obszarze badań oraz hipotez na temat zróżnicowania kierunków transportu osadów lodowcowych wysuwanych na podstawie obserwacji terenowych i wyników innych analiz (np. sedimentologicznych, petrograficznych).

5. Wnioski szczegółowe dotyczące korelacji hipotetycznych kierunków paleoprądów transportujących osady glacialne z wynikami analizy pomiarów anizotropii podatności magnetycznej sprowadzają się do rozróżnienia dwóch odmiennych typów osadów:

- takich, w których kierunki transportu osadów można korelować z położeniami osi  $k_{max}$  na stereogramie (np. gliny w Masłowicach, Jabłonnie i Mąkolicach III),
- takich, w których owe kierunki transportu pokrywają się z położeniami osi  $k_{int}$  (np. utwory piaszczyste i mułkowe w Kuźnicy Piaszczycach, Borowej Górze, Lewkówe, Łazach Dąbrowie).

Prace badawcze zostały sfinansowane z grantu N N306 721140 „Morfogeneza obszaru pomiędzy Radomskiem, Przedborzem i Piotrkowem Trybunalskim jako świadectwo uwarunkowań, przebiegu i roli najmłodszych zdarzeń glacialnych pogranicza Niżu i Wyżyn środkowej Polski”.

Cyfrowy model terenu z wyróżnionymi strefami rzeźby glacialnej oraz zestawienie wszystkich omówionych stanowisk badawczych i ich lokalizację na tle interpretacji kierunków nasunięcia lobów przedstawiono w załączniku na końcu tomu.

## LITERATURA

- Butler R.F. 1992. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geological Terranes. Blackwell.
- Czubla P. 2015. „Analiza zespołów eratyków w glinach lodowcowych i ich znaczenie w rekonstrukcji zasięgu lądolodu warciańskiego w obszarze między Piotrkowem Trybunalskim, Radomskiem a Przedborzem (środkowa Polska)”. *Acta Geographica Lodziensia* 103: 25-43.
- Iverson N.R., T.S. Hooyer, J.F. Thomason, M. Graesch, J.R. Shumway. 2008. „The experimental basis for interpreting particle and magnetic fabrics in sheared till”. *Earth Surface Processes and Landforms* 33: 67-645.
- Jelinek V. 1978. „Statistical processing of magnetic susceptibility measured in groups of specimens”. *Studia Geophysica et Geodaetica* 22: 50-62.
- Jelinek V. 1981. „Characterization of the magnetic fabrics of rocks”. *Tectonophysics* 79: 63-70.
- Marks L., A. Ber, W. Gogołek, K. Piotrowska. 2006. Mapa Geologiczna Polski w skali 1:500 000. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.

- Roman M. 2012. Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 ark. Gostynin (481). Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy.
- Różycki S.Z. 1972. Plejstocen Polski Środkowej na tle przeszłości w górnym trzeciorzędzie. Warszawa: PWN.
- Shumway J.R., N.R. Iverson. 2009. „Magnetic fabrics of the Douglas Till of the Superior lobe: exploring bed-deformation kinematics”. *Quaternary Science Reviews* 28: 107-119.
- Tarling D.H., F. Hrouda. 1993. The magnetic anisotropy of rocks. London: Chapman and Hall.
- Turkowska K. 2006. Geomorfologia regionu łódzkiego. Łódź: Wydawnictwo UŁ.
- Wachecka-Kotkowska L. 2015a. Rozwój rzeźby obszaru między Piotrkowem Trybunalskim, Radomskiem a Przedborzem w czwartorzędzie. Łódź: Wydawnictwo UŁ.
- Wachecka-Kotkowska L. 2015b. „Badania ułożenia klastów w glinach morenowych jako element rekonstrukcji kierunków transportu lodowego w obszarze między Piotrkowem Trybunalskim, Radomskiem a Przedborzem (środkowa Polska)”. *Acta Geographica Lodziensia* 103: 99-111.
- Wachecka-Kotkowska L., I. Olszak. 2009. Nowe wyniki datowań TL a wiek wysoczyzny glacialnej SE części regionu łódzkiego, 577-588. W *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych*. Poznań: Wydawnictwo UAM, t. V. Seria Geografia 88.
- Wachecka-Kotkowska L., E. Król. 2011. Anizotropia podatności magnetycznej osadów warciańskich Wzgórz Radomszczańskich i Równiny Piotrkowskiej – doniesienie wstępne, 112. W *Rozwój i zanik lodolodu fazy pomorskiej zlodowacenia wisły na Pomorzu Wschodnim (Kociewie)*. XVIII Konferencja Naukowo-Szkoleniowa „Stratygrafia Plejstocenu Polski”, Stara Kiszewa, 05.09.–09.09.2011 r., 112. PIG-PIB, Warszawa.
- Wachecka-Kotkowska L., P. Czubła, M. Gór-ska-Zabielska, E. Król. 2012. „Poligeniza pagóra w okolicach Mąkolic na wododziale Wisły i Odry na Wysoczyźnie Bełchatowskiej, region łódzki”. *Acta Geographica Lodziensia* 100: 161-178.

## ANISOTROPY OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY AS A POTENTIAL TOOL OF PALAEOCURRENT DIRECTIONS OF THE GLACIAL SEDIMENTS IN THE PIOTRKÓW TRYBUNALSKI, RADOMSKO AND PRZEDBÓRZ AREA (CENTRAL POLAND)

### SUMMARY

**Abstract.** This article presents the results of measurements of the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of Quaternary sediments collected from 13 sites, located in zones I–IV of glacial forms in SE of the Łódź Region. Based on statistical analysis and graphical position of the principal axes of ellipsoids illustrating the magnetic susceptibility tensors, recreated directions of transport for 206 samples, mainly of glacial sediment of different ages and types. The usefulness of AMS analysis in determining the direction of transport in clasts of the till has been proved and also to verification of the directional results of other measurements in the sediments layered.

**Key words:** anisotropy of magnetic susceptibility, palaeo-transport directions, glacial sediments, Wartanian ice-sheet, Łódź Region, central Poland

Research of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS; Fig. 1) was carried out in the area between Piotrków Trybunalski, Radomsko and Przedbórz, in the southeastern part of the Łódź Region (Fig. 2). The aim of this article is to present the methodology that was used for the first time for palaeogeographical study in the Łódź Region and to assess its suitability for determining the direct and indirect glacial transport in the context of a comparison with the results of other methods used.

For the AMS study 206 samples were collected in 13 sites located in zones I–IV highlighted in

the study area (Fig. 3, Tab. 1). Statistical and graphical main AMS measurements for each sites are shown in Table 2 and in Figures 4–16.

Confirmed was possible use of measuring anisotropy of magnetic susceptibility to designate directions palaeocurrents in the Pleistocene sediments, in which anisotropy of magnetic susceptibility is related to the susceptibility to the paramagnetic fraction of sediments. It also applies to sand with very low magnetic susceptibility values. It was pointed out that satisfactory results are obtained for the parameter describing

the degree of anisotropy of magnetic susceptibility  $PJ$  equal to at least 3%, provided the investigation in a given site is sufficient from the point of view of statistical samples.

AMS study in non-laminated sediments, such as till, allowed to determine the direction of clast transport prior to their submission. That approach is complementary: it can verify and complement results, but can also replace other methods, for example laminae declination measurements. AMS analysis is particularly recommended in pilot studies. Interpretation of average sediment transport directions obtained by AMS in various outcrops can be helpful as a supplementary of knowledge in the field of research and hypotheses on the

diversity of glacial sediment transport directions put forward basing on field observations and results of other studies (eg. sedimentological, petrography).

Specific conclusions of the correlation of hypothetical palaeocurrents directions transporting glacial material with the results of anisotropy of magnetic susceptibility allow to distinguish between two different types of deposits: 1 – those in which the directions of transport of sediments can be correlated in the stereogram with  $k_{\max}$  axis (eg. in clays or tills), 2 – those in which these transport directions coincide with the  $k_{\text{int}}$  axis (eg. sandy and silty sediments).